

The top half of the cover features a wireframe model of a car's front end, overlaid on a background of abstract, overlapping rectangular shapes in shades of teal, orange, and yellow. The text is positioned on the left side of this section.

Gottfried Mayer  
Carsten Pöge  
Sven Spieckermann  
Sigrid Wenzel *Hrsg.*

# Ablaufsimulation in der Automobilindustrie

---

# Ablaufsimulation in der Automobilindustrie

---

Gottfried Mayer • Carsten Pöge  
Sven Spieckermann • Sigrid Wenzel  
Hrsg.

# Ablaufsimulation in der Automobilindustrie

*Hrsg.*

Gottfried Mayer  
BMW AG  
München, Deutschland

Carsten Pöge  
Volkswagen AG  
Wolfsburg, Deutschland

Sven Spieckermann  
SimPlan AG  
Hanau, Deutschland

Sigrid Wenzel  
FG Produktionsorganisation und Fabrikplanung  
Universität Kassel  
Kassel, Deutschland

ISBN 978-3-662-59387-5      ISBN 978-3-662-59388-2 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59388-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort

Im Jahr 2002 ist unter dem Titel „Simulation in der Automobilproduktion“ von Johann Bayer (BMW AG), Thomas Collisi (SimPlan AG) und Sigrid Wenzel (damals Fraunhofer IML) ein Buch herausgegeben worden, das dem Leser ein „aktuelles Stimmungsbild zum Einsatz der Ablaufsimulation in der Automobilproduktion“ vermittelte. Seitdem sind mehr als 16 Jahre vergangen, und in dieser Zeit hat die Bedeutung der Simulation in der Automobilproduktion in Übereinstimmung mit vielen damaligen Prognosen nochmals deutlich an Bedeutung gewonnen, sodass es Zeit ist, dieses Stimmungsbild zu erneuern.

Entstanden ist der vorliegende Sammelband, der in seiner Breite umfassend verdeutlicht, dass die Ablaufsimulation mittlerweile in allen Bereichen der Produktion und Logistik rund um die Fahrzeugherstellung Einzug gehalten hat. Die Simulation ist dabei so wichtig geworden, dass sie Bestandteil der Standardplanungsprozesse von Automobilherstellern und sogar selbst Gegenstand von Standardisierungsbemühungen ist, wie einige Beiträge in diesem Buch zeigen. Auch Entwicklungen zur Digitalen Fabrik und zu Industrie 4.0 spiegeln sich in dem einen oder anderen Beitrag wider – das war vor 16 Jahren in dieser Form noch nicht der Fall.

Die Bedeutung der Ablaufsimulation im Automobilbereich wird auch durch die große Anzahl an Autoren aus einer Vielzahl von Unternehmen und Instituten unterstrichen. Neben zahlreichen Hochschulen sind fast alle in Deutschland aktiven Fahrzeughersteller, eine Reihe von Zulieferern und viele Dienstleister mit Beiträgen vertreten. Jedem einzelnen Autor sind wir als Herausgeber zu großem Dank verpflichtet. Das gilt nicht nur für die Arbeit, die in den Texten steckt, sondern auch für die Bereitschaft, sich immer wieder mit unseren inhaltlichen und formalen Anpassungs- und Änderungswünschen auseinanderzusetzen. Und nicht zuletzt sind wir den Autoren auch für ihre Geduld dankbar – eine Herausgeberschaft mit mehr als 60 Beteiligten erfordert eine gewisse Demut im Umgang mit Terminen. Ein großes Dankeschön geht ferner an Herrn Benjamin Hrycej, der im Rahmen der Schlussredaktion sämtliche Texte ein weiteres Mal Korrektur gelesen hat.

Das Buch selbst versteht sich durchaus in der Kontinuität des Vorgängers aus dem Jahr 2002. Zwar hat es Veränderungen im Kreis der Herausgeber gegeben, aber ein Vergleich von Personen und Firmen zeigt, dass es viele Gemeinsamkeiten gibt. Auch hat es während der Anbahnung dieser Folgeveröffentlichung Abstimmungen zwischen den damaligen und

den heutigen Herausgebern gegeben. Dem Gedanken der Kontinuität folgend wäre es demnach irgendwann zu Beginn der dreißiger Jahre dieses Jahrhunderts an der Zeit für das nächste Stimmungsbild – dann sicher unter anderem mit spannenden Beiträgen rund um die Rolle der Simulation bei der Gestaltung von Fabriken für Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten oder der Nutzung der Simulation als Digitalen Zwilling. Wir freuen uns schon jetzt darauf, wünschen aber natürlich zunächst viel Spaß bei der Auseinandersetzung mit dem aktuellen Stand der Technik.

München, Wolfsburg, Hanau, Kassel

Gottfried Mayer, BMW AG  
Carsten Pöge, Volkswagen AG  
Dr. Sven Spieckermann, SimPlan AG  
Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel, Universität Kassel

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
	Gottfried Mayer, Carsten Pöge, Sven Spieckermann und Sigrid Wenzel	
<b>2</b>	<b>Ablaufsimulation von Karosseriebauteilen</b> .....	<b>21</b>
	Claudia Wick, Michael Lüdemann und Gottfried Mayer	
<b>3</b>	<b>Ablaufsimulation von Karosseriebauanlagen</b> .....	<b>35</b>
	Claudia Wick, Karina Schäfer, Volker Habicht und Gottfried Mayer	
<b>4</b>	<b>Simulation eines Farbsortierspeichers und eines Nacharbeitsbereiches einer Lackiererei der Automobilindustrie</b> .....	<b>53</b>
	Georg Mehlig	
<b>5</b>	<b>Ablaufsimulation in der Fahrzeugendmontageplanung – Eine einheitliche und transparente Simulationsmethodik fördert die Nachvollziehbarkeit und das Vertrauen</b> .....	<b>69</b>
	Joachim Opp	
<b>6</b>	<b>Ablaufsimulation gekoppelt mit Arbeitsplatzsimulation im Bereich der Montage Automobilsitze</b> .....	<b>83</b>
	Heike Wilson und Karsten Wendt	
<b>7</b>	<b>Simulationsbasierte Ausbringungssteigerung der Endmontageprüfstände einer Lkw-Fertigung</b> .....	<b>99</b>
	Niklas Rommelspacher	
<b>8</b>	<b>Simulation in der mechanischen Fertigung im Bereich Antriebsstrang</b> ....	<b>113</b>
	Arnim Steinell, Stefan Sutter, Jörg Kemper und Sven Spieckermann	
<b>9</b>	<b>Möglichkeiten, Grenzen und Herausforderungen der Ablaufsimulation hinsichtlich der Gestaltung moderner Motorenmontagekonzepte</b> .....	<b>125</b>
	Jasmin Pennicke und Thomas Strigl	
<b>10</b>	<b>Simulation der Inbound-Logistik</b> .....	<b>139</b>
	Bernd Noche, Mathias Börs und Nan Liu	

<b>11</b>	<b>Simulation der Transportverkehre</b> .....	155
	Bernd Noche und Mathias Bös	
<b>12</b>	<b>Simulation von Behälterumläufen</b> .....	173
	Bernd Noche, Carsten Stange und Mathias Bös	
<b>13</b>	<b>Bereitstellungssimulation</b> .....	189
	Thorsten Sprock und Frank Hilmer	
<b>14</b>	<b>Einsatz der Ablaufsimulation in der Planung des Zentralen Ersatzteillagers der Porsche AG in Sachsenheim</b> .....	205
	Ulf Peters und Dirk Wortmann	
<b>15</b>	<b>Herausforderungen bei der Dimensionierung eines zentralen Entkopplungsmoduls in der Variantenfließfertigung und Darstellung eines selbstregulierenden Kreislaufsystems für Transportmittel</b> .....	217
	Mareike Müller und Ulrich Burges	
<b>16</b>	<b>Integrierte Simulation von Auftragsabwicklungs- und Supply Chain-Prozessen</b> .....	231
	Axel Wagenitz, Katja Klingebiel, Michael Toth, Marco Motta und Dirk Weibels	
<b>17</b>	<b>Simulation von Lieferantennetzwerken: Grundlagen und Anwendungen bei der ZF Friedrichshafen AG</b> .....	247
	Kai Gutenschwager und Philipp Arnold	
<b>18</b>	<b>Simulationsbasierte kombinierte Instandhaltungs- und Produktionsplanung</b> .....	261
	Berend Denkena, Karl Doreth, Marian Köller, Sören Wilmsmeier und Florian Winter	
<b>19</b>	<b>Virtuelle Inbetriebnahme mittels Ablaufsimulation in der Automobilindustrie</b> .....	275
	Torben Meyer und Ulrich Grillitsch	
<b>20</b>	<b>Simulation des Personaleinsatzes in der Automobilindustrie</b> .....	289
	Gert Zülch	
<b>21</b>	<b>Der Energiebedarf der Automobilproduktion im Fokus der Simulation</b> ...	303
	Dieter Geckler, Holger Fliege, Joachim Nagel, Uwe Bracht, Marco Seewaldt und Daniel Wolff	
<b>22</b>	<b>Bereitstellung und Verwaltung von Simulationseingangsdaten</b> .....	319
	Marielouise Mieschner und Gottfried Mayer	
<b>23</b>	<b>Automatische Modellgenerierung – Stand, Klassifizierung und ein Anwendungsbeispiel</b> .....	333
	Sören Bergmann und Steffen Straßburger	

---

<b>24</b>	<b>Methoden und Werkzeuge der Simulationsassistenz</b> . . . . .	<b>349</b>
	Kristina Sokoll und Matthias Clausing	
<b>25</b>	<b>Einsatzmöglichkeiten von Simulation und Optimierung in der Planung der Automobilindustrie</b> . . . . .	<b>365</b>
	Lothar März	
<b>26</b>	<b>3D-Visualisierung von simulierten Montageprozessen</b> . . . . .	<b>379</b>
	Steffen Masik, Thomas Schulze, Paul Greif und Marco Lemessi	
<b>27</b>	<b>Ausblick</b> . . . . .	<b>397</b>
	Gottfried Mayer, Carsten Pöge, Sven Spieckermann und Sigrid Wenzel	

---

## Über die Autoren



**Philipp Arnold** Nach dem Bachelorstudium Wirtschaftsingenieurwesen/Logistik an der HS Neu-Ulm (2008–2012) Masterstudium Systems Engineering and Management Logistics HS Ulm (M. Eng.) bis 2012. Seit 2013 Angestellter bei der ZF Friedrichshafen AG in der Logistikplanung mit Schwerpunkt auf Supply Chain Simulation.



**Dr. Sören Bergmann** Abschluss des Studiums der Wirtschaftsinformatik an der TU Ilmenau 2004. Anschließend Tätigkeit als Berater und Projektleiter insbesondere bei Unternehmen der Energiewirtschaft. 2007–2018 Mitarbeiter am Fachgebiet Wirtschaftsinformatik für Industriebetriebe der TU Ilmenau. Seit August 2018 Mitarbeiter am Fachgebiet Informationstechnik in Produktion und Logistik der TU Ilmenau. 2013 Promotion (Dr. rer. pol.) zum Thema Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen.



**Mathias Bös** Seit dem Abschluss des Studiums des Maschinenbaus an der TU Dortmund im Jahr 1997 zunächst Projekt-Ingenieur bei der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH; später Leiter für Simulationsprojekte in den Bereichen Logistik, Produktion und Flughafen. Seit 2001 Geschäftsführer der SDZ GmbH. Fachausschussmitglied im Verein Deutscher Ingenieure für Digitale Fabrik und Logistiksysteme und -management. Mitglied in der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) und im Innovationsbeirat des LOG-IT-Club.



**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht** Studium Maschinenbau an der Universität Hannover. Nach der Promotion am dortigen Institut für Fabrikanlagen und Logistik Wechsel zu Daimler mit leitenden Funktionen in der Technischen Planung. 1996 erfolgte der Ruf auf die Professur für Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik der TU Clausthal. Gründungsmitglied des Arbeitskreises Rechnergestützte Fabrikplanung im Verband der Automobilindustrie (VDA). Mitglied Fachbeirat in der Gesellschaft für Produktion und Logistik des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI-GPL). Gründer und langjähriger Leiter des VDI-Fachausschusses 205 Digitale Fabrik.



**Dr. Ulrich Burges** Nach dem Studium der Physik an der RWTH Aachen wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Jülich. In dieser Zeit Promotion auf dem Gebiet der Festkörperforschung. Im Jahr 1998 Einstieg bei der SimPlan AG als Consultant Simulation mit dem Schwerpunkt Automobilindustrie. 2015 Berufung in den Vorstand der SimPlan AG und in diesem verantwortlich für den Bereich IT und das operative Simulationsgeschäft.



**Matthias Clausing** Studium der Wirtschaftsinformatik an der TU Darmstadt. 2008 Einstieg bei der AUDI AG in Ingolstadt in das Team SimOffice, einer internen, zentralen Anlaufstelle für das Thema Ablaufsimulation. 2009–2013 Sprecher des Gewerketteams Ablaufsimulation im Rahmen des Konzernprojektes Digitale Fabrik des Volkswagen Konzerns. Von 2009 bis 2018 Vertreter der AUDI AG in der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation im Verband der Automobilindustrie (VDA).



**Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena** Nach dem Studium des Maschinenbaus an der Leibniz Universität Hannover wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) an der Leibniz Universität Hannover von 1987–1992. Nach der Promotion 1992 Leiter in der Entwicklung bei Thyssen Production Systems und Gildemeister Drehmaschinen. Seit 2001 Professor an der Leibniz Universität Hannover und Leiter des IFW. Seit 2009 Mitglied und stellvertretender Sprecher des Sonderforschungsbereichs SFB 871 „Regeneration komplexer Investitionsgüter“ sowie seit 2018 Präsident der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP).



**Karl Doreth** Nach dem Studium des Maschinenbaus mit Fachrichtung Produktionstechnik an der Leibniz Universität Hannover wissenschaftlicher Mitarbeiter des Institutes für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen. Dort bis 2017 technischer Geschäftsführer des Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums in Hannover. Aktuell Senior Produkt Manager für Digitalisierung bei einem führenden deutschen Werkzeugmaschinenhersteller.



**Holger Fliege** Studium Maschinenbau im Praxisverbund an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Kooperation mit der Volkswagen AG in Wolfsburg. Im Anschluss wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik an der Ostfalia. Betreuung des Themenbereiches Energieeffizienz in der Produktion. Berufsbegleitender Masterstudiengang Energiesystemtechnik mit dem Schwerpunkt Energie- und Gebäudetechnik. Seit 2013 in der Konzernforschung der Volkswagen AG im Bereich Umwelt Produktion – Zentrales Energiemanagement tätig.



**Dr.-Ing. Dieter Geckler** Studium Maschinenbau an der Universität Hannover. Ab 1986 Projektleiter (CAD, PPS, Logistik) bei der Space GmbH in Hannover. Seit 1991 in der Planung der Volkswagen AG, Wolfsburg. Mitarbeit bei Fabrik- und Fahrzeugprojekten. Koordinator des IT-Arbeitskreises der Planung. Mitwirkung in den Großprojekten TI-Syncro (Stückliste) und Digitale Fabrik. Mitglied im Fachausschuss 205 Digitale Fabrik im Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Seit 2010 Teilprojektleiter für das Thema Energieeffizienz in der Digitalen Fabrik.



**Paul Greif** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Universität Karlsruhe und 1985 Abschluss als Diplom-Wirtschaftsingenieur. Beginn der Tätigkeit bei John Deere. Seit dieser Zeit Tätigkeiten auf mehreren Positionen in operativen und strategischen Bereichen der Logistik, Fabrik- und Arbeitsplanung mehrerer Fabriken und des zentralen europäischen Ersatzteillagers sowie der globalen John Deere IT-Organisation. Seit 2010 verantwortlich in der Abteilung Advanced Manufacturing Innovation für das Thema Digital Manufacturing. In dieses Aufgabengebiet fallen die strategischen Entwicklungen von John Deere zu Virtual Reality, Augmented Reality sowie Virtuelle Fabrik- und Werkzeugplanung.



**Ulrich Grillitsch** Studierte zwischen 1980 und 1985 Maschinenbau an einer österreichischen höheren technischen Lehranstalt und begann 1987 seine Tätigkeit für die BMW AG. Zwischen den Jahren 2000 und 2008 beschäftigte er sich als Simulationsexperte mit Materialflusssimulation in der Produktionssteuerung. Seit dem Jahr 2008 liegt sein Aufgabenfokus auf der virtuellen Inbetriebnahme in der Prozess-IT.



**Prof. Dr. Kai Gutenschwager** Nach dem Studium der Wirtschaftsinformatik an der TU Braunschweig wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Wirtschaftsinformatik und Informationsmanagement der TU Braunschweig. Nach der Promotion 2001 Niederlassungsleiter der SimPlan AG am Standort Braunschweig von 2002 bis 2009. Ab 2009 Professor an der Hochschule Ulm (Lehrstuhl IT in der Logistik) und seit 2013 Professor an der Fakultät Informatik der Ostfalia Hochschule für Angewandte Wissenschaften Braunschweig/Wolfenbüttel (Lehrstuhl Wirtschaftsinformatik). Geschäftsführender Leiter des Institutes für Information Engineering der Ostfalia Hochschule seit 2016.



**Volker Habicht** Studierte Maschinenbau an der Fachhochschule in Frankfurt. Danach stieg er bei EDAG als Planer im Bereich Simulationsgestützte Planung ein und beschäftigte sich mit verschiedenen Software-Werkzeugen sowie der Modellierung und Simulation der Prozesse in der Automobilindustrie. Seit 2008 ist er in der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation des Verbands der Automobilindustrie (VDA) und vertritt die Belange der Engineering-Dienstleistungsbranche. Seit 2006 ist er Senior-Projektleiter bei EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG im Bereich der Ablaufsimulation in Fulda.



**Dr. Frank Hilmer** Studium der Physik an der TU Braunschweig und der Universität Marburg, anschließend wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich Physik in Marburg. Dort 1996 Promotion auf dem Themengebiet der Simulation thermischer Solaranlagen. 1996–1998 Mitarbeiter in der Entwicklungsabteilung bei Wagner & Co Solartechnik. Seit 1998 Berater und Projektleiter bei der SimPlan AG, aktuell dort verantwortlich für die Wartung und Weiterentwicklung des Automotive Bausteinkastens des Verbands der Automobilindustrie (VDA).



**Jörg Kemper** Nach Abschluss seines Studiums des allgemeinen Maschinenbaus an der Ruhr-Universität Bochum im Jahr 1991 verantwortlich für den Software- und Projektvertrieb im Bereich Simulation bei der Thyssen Maschinenbau GmbH und ab dem Jahr 1994 Gruppenleiter Ablaufsimulation bei einem Logistikplaner in Dortmund. Mit der Gründung der SimPlan Integrations GmbH im Jahr 2001 Geschäftsführender Gesellschafter und verantwortlich für die Bereiche Vertrieb und kommerzielle Projektabwicklung.



**Prof. Dr.-Ing. Katja Klingebiel** Nach dem Studium der Wirtschaftsmathematik an der Universität Dortmund wissenschaftliche Mitarbeiterin von 2000 bis 2006 am Lehrstuhl für Fabrikorganisation der Universität Dortmund und am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund. Anschließend als Managerin für die Business Services Simulation & Research bei der ebp Consulting GmbH, Stuttgart tätig. Nach der Promotion an der Fakultät für Maschinenbau der TU Dortmund erfolgt in 2009 die Rückkehr zum Lehrstuhl für Fabrikorganisation und zum Fraunhofer IML als Leiterin des Grundlagenforschungszentrums Assistenzsysteme. Seit 2013 an die Fachhochschule Dortmund berufen als Professorin für das Lehrgebiet BWL, insb. Wirtschaftsmathematik und Logistik.



**Dr.-Ing. Marian Köller** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Leibniz Universität Hannover und der Keio University, Yokohama. Bis 2015 Bereichsleiter Fertigungsplanung und -organisation am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover. Aktuell Leiter der Geschäftsstelle des Netzwerks Industrie 4.0 Niedersachsen.



**Dr. Marco Lemessi** Im Jahre 1998 erhielt er den Master in Civil Engineering von der Universität von Rom La Sapienza. Von 1998 bis 2002 Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität von Rom verbunden mit einer Tätigkeit in verschiedenen EU-Projekten zum Thema Logistik. In dieser Zeit wurden eigenständige Lehrveranstaltungen zur Logistik und Simulation an den Universitäten Perugia und Rom gehalten. 2002 erfolgte die Promotion an der Universität von Rom La Sapienza auf dem Gebiet des Transportation Engineering. Seit 2002 Mitarbeiter im Simulationsteam von John Deere und seit 2011 Manager des Corporate Simulation Teams bei John Deere.



**Dr.-Ing. Nan Liu** Geb. am 27.11.1981 in Shaanxi (China), war vom 15.08.2010 bis 31.08.2013 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Transportsysteme und -logistik, Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Duisburg-Essen tätig und promovierte im Jahr 2015. Vom 01.08.2008 bis 01.10.2015 war er bei der SDZ Simulations-Dienstleistungszentrum GmbH in Dortmund als Projektleiter beschäftigt.



**Michael Lüdemann** Nach Abschluss des Diplomstudiums im Bereich Konstruktionsmanagement an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Wechsel zur Icarus Consulting GmbH, dort tätig in den Bereichen Konstruktion, Offline Programmierung und schließlich im Bereich Ablaufsimulation. Leitung zahlreicher Projekte für große deutsche OEMs. Seit 2009 verantwortlich für den Bereich Ablaufsimulation bei der Icarus Consulting GmbH.



**Dr.-Ing. Lothar März** 1987 bis 1993 Studium Maschinenbau an der TU Darmstadt und Ingenieurwissenschaften an der Ecole Centrale de Lyon, Promotion am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart. Seit 1995 Führungs- und Beratungserfahrung u. a. bei Fraunhofer IPA, Dürr-Schenck Engineering und LOM Innovation. 2006 Gründung der Arbeitsgruppe Simulation und Optimierung innerhalb der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM). Seit 2012 COO bei der STREMLER AG Supply Chain Engineering.



**Steffen Masik** Studium der Computervisualistik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) in Magdeburg. Seit 2007 verantwortlich für das 360° Mixed Reality Labor Elbedome im Virtual Development and Training Centre VDTC des Fraunhofer IFF. Seit 2012 stellvertretender Leiter des Geschäftsfeldes Virtueller-Interaktives Training und seit 2016 auch Leiter der Geschäftsstelle Elbedome 2.0.



**Gottfried Mayer** Seit 1990 Mitarbeiter der BMW AG. Nach einer Ausbildung zum Industrieelektroniker Fachbereich Produktionstechnik folgte die Instandhaltung im Karosseriebau. Von 1994–1997 nebenberufliche Ausbildung zum Techniker der Elektronik mit Fachbereich Datenverarbeitungstechnik. 1996 Wechsel zur übergeordneten Steuerungstechnik mit Schwerpunkt BDE-Systeme. Seit 1999 im Bereich der Ablaufsimulation, zuerst Karosseriebau Werk München, danach Karosseriebauten weltweit bis hin zur Verantwortung über alle Gewerke. Seit 2011 in der BMW Group IT verantwortlich für die Themenfelder Simulation, virtuelle Produktion und Digitale Fabrik. Seit 2018 IT Projektleiter Additive Manufacturing.



**Georg Mehlig** Jahrgang 1962, studierte nach seiner Ausbildung zum Maschinenbauer an der FH Wiesbaden Maschinenbau. Sein Diplom legte er im Jahre 1998 bei Prof. Dr.-Ing. Lindner ab. Seitdem arbeitet er bei der Adam Opel AG, zuerst im Bereich Fahrzeugvorschriften, seit 2004 als Systemingenieur für Durchsatz- und Ergonomie-Simulation. Für die Opel Automobile GmbH ist er Mitglied der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation im Verband der Automobilindustrie (VDA). Herr Mehlig ist freiberuflich als Dozent für Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen an der FH Bingen und als Dozent für Materialfluss, Logistik und Simulation an der Hochschule Darmstadt tätig.



**Dr. Torben Meyer** Studierte bis 2010 Wirtschaftsingenieurwesen an der FH Wedel, der Nottingham Trent University und der TU Ilmenau. Herr Meyer hat über mehrere Jahre die VDA-Arbeitsgruppe Virtuelle Inbetriebnahme geleitet. Das derzeitige Aufgabenfeld von Herrn Meyer im Bereich des Werkzeug- und Anlagenbaus der Volkswagen AG in Wolfsburg umfasst die Einführung eines Produktlebenszyklusmanagements (PLM).



**Marielouise Mieschner** Nach dem Maschinenbaustudium an der Leibniz Universität Hannover (2004–2010) tätig als Produktionsplanerin im Bereich Materialflusssimulation bei der MBtech Group GmbH & Co. KGaA. Seit Ende 2011 Mitarbeiterin der BMW AG. Von 2011–2018 im Fachbereich Ablaufsimulation und Mitglied der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation des VDA. Seit 2018 im Prozessmanagement Order-to-Delivery.



**Marco Motta** Studium des Maschinenbaus an der TU Dortmund. Seit 2004 Mitarbeiter und seit 2013 Leiter der Abteilung Supply Chain Engineering am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund (Schwerpunkte: Supply Chain Management, logistische Entscheidungsunterstützung in Supply Chains und Simulation). Zudem Mitbegründer des Logistik- und IT-Beratungsunternehmens LogProIT GmbH (logistics processes & IT consulting) sowie Geschäftsführer des Unternehmens in den Jahren 2009 bis 2014. Seit 2013 Leiter des Geschäftsfeldes Planung, Steuerung und Logistik in der Fraunhofer Allianz Automobilproduktion. Dozent für Supply Chain Management und Logistik im Verbundstudium Wirtschaftsinformatik der Fachhochschulen Dortmund & Köln.



**Mareike Müller** Geb. 1986, studierte Management Science an der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt. Seit März 2011 Planerin im Bereich Fahrzeugsteuerung bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. U. a. Projektleitung im Handlungsfeld Steuerung und IT im Rahmen des Baus eines neuen Entkopplungsmoduls, Ablaufsimulation im Kontext digitaler Planungsmethoden sowie Neuausrichtung Sequenzierung. Seit Mai 2012 externe Doktorandin an der KU Eichstätt-Ingolstadt am Lehrstuhl Supply Chain Management & Operations, mit dem Schwerpunkt reihenfolgestabile Produktion und Pufferallokation in der Variantenfließfertigung.



**Joachim Nagel** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Diplomarbeit zum Thema Flussorientierte Energiesparsteuerung von Fertigungsanlagen. Seit 2013 Programmverantwortlicher am Institut für Produktion, Logistik und Komponente, Volkswagen AG, AutoUni, Wolfsburg.



**Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche** Nach dem Studium der Technischen Kybernetik an der Universität Stuttgart wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Förder- und Lagerwesen der Universität Dortmund von 1982–1983 und am Fraunhofer-Institut für Transporttechnik und Warendistribution, dem heutigen Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund, von 1983–1987. Im Jahr 1989 Promotion an der Universität Dortmund. Seit 1987 Geschäftsführer der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH in Dortmund und seit 2000 Professor an der Universität Duisburg-Essen und Inhaber des Lehrstuhls Transportsysteme und -logistik. Ab 2014 Vorstandsvorsitzender des Zentrums für Logistik und Verkehr als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Duisburg-Essen.



**Joachim Opp** Von 1987 bis 1992 Studium des Maschinenbaus an der Bergischen Universität Wuppertal. 1992–1996 Berater für Ablaufsimulation bei AT&T Istel in Düsseldorf. Von 1996 bis 2001 Projekt- und Gruppenleiter für Ablaufsimulation bei der Fa. EDAG in Fulda und Köln mit Schwerpunkt Automobilproduktion. Seit 2001 technischer Spezialist für FORD Europa im Bereich Ablaufsimulation von Karosseriebauanlagen. Ab 2013 Abteilungsleiter Simulation und Steuerung, FORD Europa für die Bereiche Presswerk, Karosseriebau, Lackanlagen und Endmontage.



**Jasmin Pennicke** Maschinenbaustudium an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg in Stuttgart als Auszubildende der Daimler AG mit anschließendem Einstieg in den Konzern 2009. Von 2011 bis 2014 Mitarbeiterin im Bereich Digitale Fabrik mit dem Schwerpunkt Materialflussoptimierung und Mitglied der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation im Verband der Automobilindustrie (VDA). Seit 2016 Teamleiterin im Bereich Layout- und Materialflussplanung Vorbetriebe (Gießerei und Schmiede) Powertrain im Mercedes-Benz Werk Untertürkheim.



**Ulf Peters** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens mit der technischen Fachrichtung Maschinenbau an der TU Darmstadt (1993–1999). Langjährige Projekterfahrung in der Automobilindustrie mit Schwerpunkt Produktion/Logistik als Senior-Berater bei der intra-Unternehmensberatung GmbH sowie als Projektleiter Logistik bei der Robert Bosch GmbH. Seit 2007 bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG zunächst als Projektleiter Logistik im Rahmen des Aufbaus des neuen Standorts Sachsenheim und seit 2013 als Leiter Lagerorganisation.



**Carsten Pöge** Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg mit dem Abschluss Diplom-Kaufmann. Seit 2001 bei der Volkswagen AG am Standort Wolfsburg in der Konzern IT tätig und zunächst verantwortlich für die Themen Ablaufsimulation, Betriebsmittelbibliotheken und Systembebauungsplanung. Seit 2006 im Programm Digitale Fabrik IT-Projektleitung für die Methode Ablaufsimulation. Seit 2005 Mitglied und seit 2008 zweiter Sprecher der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation im Verband der Automobilindustrie (VDA).



**Niklas Rommelspacher** Im Jahr 2013 Abschluss seines Masterstudiums des Wirtschaftsingenieurwesens mit dem technischen Schwerpunkt Maschinenbau an der TU Darmstadt. Schwerpunkte während des Studiums waren außerdem Produktion, Logistik und Operations Research. Praxiserfahrung bei der AUDI AG in der Produktionsplanung und der Entwicklung von Fertigungskonzepten. Seit 2013 Berater und Projektmanager in Simulationsprojekten bei der SimPlan AG, dadurch u. a. tiefgehende Einblicke in die Produktions- und Logistikprozesse der Automobilindustrie.



**Karina Schäfer** Studierte Maschinenbau an der Fachhochschule Fulda. Danach stieg sie bei EDAG als Fachverantwortliche für den Unternehmensbereich Digitale Fabrik zur Führungskraft auf. Die Themen reichten von der Vernetzung mit der Produktentwicklung, der digitalen Vorplanung bis hin zur virtuellen Inbetriebnahme. Seit 2013 ist sie Teamleiterin der Ablaufsimulation bei EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG in Fulda mit dem Schwerpunkt der Weiterentwicklung in der Mobilitätsbranche.



**Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Schulze** Nach dem Studium der Fabrikplanung an der damaligen TH Magdeburg wissenschaftlicher Mitarbeiter von 1974 bis 1978. Nach der Promotion auf dem Gebiet der Fabrikplanung wissenschaftlicher Mitarbeiter in einer Forschungsgruppe zur Modellierung sozio-ökonomischer Prozesse. 1991 Habilitation auf dem Gebiet der Angewandten Informatik und tätig an der Fakultät für Informatik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Von 2005 an Leiter des Kompetenzzentrums Simulation am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) in Magdeburg. Seit 2005 Professur an der Fakultät für Informatik an der Universität Magdeburg.



**Marco Seewald** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der TU Clausthal. Seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, Abteilung für Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik. Mitglied im Fachausschuss 205 Digitale Fabrik des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI).



**Kristina Sokoll** Studium der Computervisualistik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. 2006–2008 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Simulation der Universität Magdeburg in Forschung und Lehre tätig. Seit 2008 als Simulationsingenieurin im SimOffice der AUDI AG in Ingolstadt verantwortlich für die Betreuung und Durchführung von Produktions- und Logistiksimulationen und die Weiterentwicklung der Methode Ablaufsimulation.



**Dr. Sven Spieckermann** Jahrgang 1967, seit dem Abschluss seines Studiums der Wirtschaftsinformatik an der TU Darmstadt im Jahr 1994 Berater und Projektleiter Simulation bei der SimPlan Gruppe. 1997 Berufung in die Geschäftsleitung und heute Sprecher des Vorstands der SimPlan AG. Promotion über Simulations- und Optimierungsaufgabenstellungen im Jahr 2002 an der TU Braunschweig. Lehrbeauftragter für Simulation an den Technischen Universitäten in Braunschweig, Darmstadt und Karlsruhe (KIT).



**Thorsten Sprock** Studium der Elektrotechnik an der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven (FHOOW) in Emden als duales Studium in Kooperation mit der Volkswagen AG am Standort Emden. Vertiefung im Studium in der Automatisierungstechnik und im Bereich der Ablaufsimulation. Seit 2009 zuständig für das Themenfeld Ablaufsimulation im Volkswagen Werk Emden mit Projektdefinition, Modellierung und Experimenten im Bereich Fertigung und Logistik.



**Carsten Stange** Abschluss des Informatik-Studiums an der Universität Dortmund im Jahr 1997. Seit 1997 als Mitarbeiter bei der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH in Dortmund beschäftigt. Bis 2008 als Projektmanager im Bereich der Simulationsprojekte tätig mit den Schwerpunkten Simulation und Optimierung von Materialflusssystemen und Bewertung von Auftragssteuerungssystemen in der Automobilindustrie. Unterstützende Tätigkeiten in den Bereichen Softwareentwicklung und Training. Seit 2008 Leiter des Geschäftsfeldes Simulation innerhalb der SDZ GmbH.



**Arnim Steinel** Studierte Allgemeinen Maschinenbau mit Schwerpunkt Fertigungstechnik an der TH Darmstadt. Seit Februar 1993 ist er Angestellter der Adam Opel GmbH in Rüsselsheim. Nach fünfjähriger Tätigkeit in der Fertigungsplanung als Process Engineer ist er aktuell im Bereich Throughput Simulation & Management Systems beschäftigt. Hier ist er verantwortlich für die simulative Abbildung von Bearbeitungs- und Montagesystemen in der Motoren- und Getriebefertigung.



**Prof. Dr.-Ing. Steffen Straßburger** Abschlüsse als Dipl.-Inf. (1998) und Dr.-Ing. (2001) der Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg. 2001–2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschung der DaimlerChrysler AG in Ulm. 2003–2007 Abteilungsleiter am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung in Magdeburg. Seit 2007 Universitätsprofessor an der TU Ilmenau und Leiter der Fachgebiete Wirtschaftsinformatik für Industriebetriebe (2007–2018) und Informationstechnik in Produktion und Logistik (seit 08/2018). Seit 2010 stellvertretender Direktor des fakultätsübergreifenden Institutes für Automobil- und Produktionstechnik.



**Dr. Thomas Strigl** Nach dem Maschinenbaustudium der Fachrichtung Produktionstechnik an der TH Karlsruhe und der INSA de Lyon von 1996–2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH und Promotion am Institut für Fabrikanlagen der Universität Hannover. Von 2000–2015 Geschäftsführer der iSILOG GmbH, einem Simulationsdienstleister mit Sitz in Baden-Baden. Seit 2015 Leiter Business Development Simulationsdienstleistungen und Software der EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG mit Hauptsitz in Fulda.



**Stefan Sutter** Erlangte seinen Abschluss im Fach Maschinenbau mit Schwerpunkt Produktionstechnik an der TU Kaiserslautern. Seit 2003 ist er im Bereich Materialflusssimulation bei der Adam Opel GmbH tätig. Zunächst lag das Arbeitsgebiet in der Erstellung von Simulationsmodellen von Fertigungs- und Montagesystemen und der Durchführung von Simulationsstudien sowie Workshops mit den Werken im Rahmen der kontinuierlichen Verbesserung. Im Jahr 2014 übernahm er die Leitung der Arbeitsgruppe Throughput Simulation & Management Systems in der Hauptabteilung Manufacturing Engineering Propulsion Systems.



**Prof. Dr.-Ing. Michael Toth** Studium der Wirtschaftsinformatik an der Universität Paderborn und Promotion zum Doktor-Ingenieur an der TU Dortmund. Zwischen 2003 und 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter und ab 2011 Leiter der Abteilung Supply Chain Engineering am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund (Schwerpunkte: Supply Chain Management, logistische Assistenzsysteme und Simulation). Zudem Mitbegründer des Logistik- und IT-Beratungsunternehmens LogProIT GmbH (logistics processes & IT consulting) sowie Geschäftsführer des Unternehmens in den Jahren 2009 bis 2011. Seit Februar 2013 Professor für Produktionsmanagement und Logistik an der Hochschule Bochum.



**Prof. Dr.-Ing. Axel Wagenitz** Studierte Informatik an der Universität Bremen und ist seit 1996 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML). Er promovierte an der TU Dortmund zum Dr.-Ing. und leitete bis 2011 die Abteilung Supply Chain Engineering, für die er auch nach seinem Wechsel an die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (Lehrgebiet Wirtschaftsinformatik) weiter beratend tätig ist. Axel Wagenitz ist Mitbegründer und Gesellschafter der LogProIT GmbH.



**Dirk Weibels** Seit der Ausbildung zum Werkzeugmacher 1983–1986 tätig bei Volkswagen Nutzfahrzeuge. Auf den staatlich geprüften Maschinenbau-Techniker im Jahr 1986–1990 folgte ein Studium der Wirtschaftsinformatik an der Verwaltungs- und Wirtschaftsakademie, das er 1995 erfolgreich abschloss. 1996–2005 Aufbau und Leitung der Markenprogrammplanung. 2005 Übernahme der Leitung der Marken-Disposition sowie des Bedarfs- und Kapazitätsmanagements von Volkswagen Nutzfahrzeuge.



**Dr.-Ing. Karsten Wendt** Absolvierte 2007 sein Diplom im Studiengang Informationssystemtechnik an der TU Dresden. Anschließend arbeitete er bis 2014 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am dortigen Lehrstuhl für Hochparallele Systeme und Neuromikroelektronik und forschte im Rahmen von internationalen Projekten in den Bereichen angewandte Mehrzieloptimierung, maschinelles Lernen und Verarbeitung von großen Datenmengen. Im gleichen Zeitraum war er als Softwareentwickler mit den Schwerpunkten Optimierung, Simulation und Softwarearchitekturen bei der Dualis GmbH IT Solution tätig. 2015 promovierte Dr. Wendt zum Thema Multi-Objective Optimization and Unsupervised Learning und arbeitet seitdem am Lehrstuhl für Softwaretechnologie der TU Dresden als Leiter von Forschungsprojekten zur Adaption von KI-Technologien für große Optimierungsprobleme.



**Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel** Nach dem Studium der Informatik an der Universität Dortmund wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen der Universität Dortmund von 1986–1989 und am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund, von 1990–2004; in dieser Zeit 1998 Promotion an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Rostock sowie 2001–2004 Geschäftsführerin des Sonderforschungsbereichs SFB 559 „Modellierung großer Netze in der Logistik“ an der Universität Dortmund. Seit 5/2004 Professorin an der Universität Kassel und Leiterin des Fachgebietes Produktionsorganisation und Fabrikplanung; u. a. Sprecherin der Fachgruppe Simulation in Produktion und Logistik sowie im Vorstand der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), Mitglied im Fachbeirat in der Gesellschaft für Produktion und Logistik des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI-GPI). Leiterin des VDI-Fachausschusses 204 Modellierung und Simulation.



**Claudia Wick** Studium der Betriebswirtschaftslehre mit Fachrichtung Datenverarbeitung im dualen System der Berufsakademie bei Daimler in Stuttgart. Danach tätig am Standort Sindelfingen in der Anwenderbetreuung für individuelle Datenverarbeitung mit dem Schwerpunkt Reportgeneratoren und Auswertungen. Ab 1995 verantwortlich für die Realisierung von Systemen im kaufmännischen Bereich; 2001 Aufbau einer weltweit eingesetzten Anwendung für Pressteil- und Pressenanlagenplanung. Seit 2009 im Bereich Digitale Fabrik verantwortlich für die Themen Rohbauplanung und Materialflusssimulation.



**Sören Wilmsmeier** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Leibniz Universität Hannover. Von August 2014 bis Februar 2016 Mitarbeiter der Qualitätssicherung im Projektmanagement der Firma ENERCON. Seit März 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover. Tätig in Forschungsprojekten zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung sowie zur adaptiven Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung.



**Heike Wilson** 1972 in Dresden geboren; Beendigung des Studiums als Dipl.-Volkswirtin an der TU Dresden im Jahr 2000. Seit 2003 Geschäftsführende Gesellschafterin der DUALIS GmbH IT Solution in Dresden. Langjährige Projekterfahrung in den DUALIS-Geschäftsbereichen Materialflusssimulation, multikriterielle Optimierung und Produktionsplanung/Scheduling; Expertin für Industrie 4.0-Lösungen zur Prozessoptimierung in der Fertigung. Engagement in Industrie 4.0-Initiativen wie dem SEF Smart Electronic Factory e. V. und geschätzte Expertin in Podiumsdiskussionen und als Referentin zu Themen wie Fabrikplanung der Zukunft.



**Dr.-Ing. Florian Winter** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Leibniz Universität Hannover und der Technical University of Denmark, Kopenhagen. Seit der Promotion am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen an der Leibniz Universität Hannover im Jahr 2017 tätig als Leiter der Forschung und Entwicklung bei der Fauser AG, Softwarehersteller für die Produktionsplanung und -steuerung.



**Daniel Wolff** Studium Maschinenbau mit den Schwerpunkten Fabrikplanung und Arbeitswissenschaften an der TU Chemnitz. 2003–2004 Materialflusssimulation in Industrieprojekten. Seit 2004 als Projektmitarbeiter bei inpro, Berlin, mit den Schwerpunkten Digitale Fabrik, Informations- und Wissensmanagement, Energieeffizienz. Seit 2009 Guest Lecturer im Fach Logistikmanagement an der SRH Hochschule Berlin. 2011–2014 Koordination des Clusters Energieoptimierende Planung bei inpro. Mitglied im Fachausschuss 146 Energiemanagement mit MES im Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Seit 2014 Leitung des Bereichs Produktionssysteme & Informationsprozesse bei inpro.



**Dirk Wortmann** Nach seinem Abschluss als Fachinformatiker Entwicklung von Simulationssoftware sowie Durchführung von Simulationsstudien in einem Frankfurter Ingenieurbüro. Seit 1991 selbstständig und seit Gründung der Firma SimPlan im Jahr 1992 bis 2013 Mitglied der Geschäftsleitung/des Vorstandes. Seit 2010 Managing Director der SimPlan Tochtergesellschaft in Shanghai/China sowie Verantwortlicher für das Asien-Geschäft der SimPlan AG.



**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gert Zülch** Jahrgang 1946. Nach dem Studium des Maschinenbaus an der TU Braunschweig und wirtschaftswissenschaftlichem Aufbaustudium an der RWTH Aachen Leiter der Abteilung Arbeitsstrukturierung im Zentralbereich Forschung und Technik der Siemens AG in München. Von 1985 bis 2012 Lehrstuhlinhaber und Leiter des Institutes für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, nunmehr Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Von 1984 bis 2018 wissenschaftlicher Leiter der gefora – Beratungs-Gesellschaft für Organisation und Arbeitswirtschaft mbH, Weingarten (Baden).



# Einleitung

# 1

Gottfried Mayer, Carsten Pöge, Sven Spieckermann  
und Sigrid Wenzel

Diese Einleitung führt zunächst kurz in die ereignisdiskrete Simulation zur Analyse und Bewertung von Produktions- und Logistiksystemen ein und erläutert ebenfalls ihre Rolle im Kontext der Digitalen Fabrik für die Automobilindustrie. Zudem werden einige Hinweise zum Aufbau des Buches gegeben. In Abschn. 1.2 verdeutlicht ein kurzer Überblick den aktuellen Stand der Technik zu den verwendeten Simulationswerkzeugen in der deutschen Automobilindustrie. Abschn. 1.3 stellt ergänzend die Facetten der Standardisierung zur Unterstützung der Simulationsexperten und zur Einbindung der Ablaufsimulation in die betriebliche Organisation vor.

---

G. Mayer  
BMW AG, München, Deutschland

C. Pöge  
Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg, Deutschland

S. Spieckermann  
SimPlan AG, Hanau, Deutschland

S. Wenzel (✉)  
FG Produktionsorganisation und Fabrikplanung, Universität Kassel, Kassel, Deutschland  
E-Mail: [s.wenzel@uni-kassel.de](mailto:s.wenzel@uni-kassel.de)

## 1.1 Simulation in der Automobilindustrie

In der Automobilindustrie werden Simulationsmodelle seit mehr als 30 Jahren zur Analyse und Bewertung von Produktions- und Logistiksystemen eingesetzt. Simulationsmodelle schaffen eine Basis, um nicht nur statische Bewertungen vorzunehmen, sondern das Verhalten dynamischer Systeme zu analysieren und zu prognostizieren. Damit wird ein umfassender Erkenntnisgewinn für die Planung und den Betrieb komplexer Systeme geschaffen.

Mit der ereignisdiskreten Simulation (auch Ablaufsimulation genannt), die im Fokus dieses Buches steht, können Produktions- und Logistikabläufe mit diskreten Produktions- und Logistikeinheiten (Stückgut oder zu diskreten Einheiten abstrahierte Stoffströme oder Schüttgüter) analysiert und hinsichtlich ihres Verhaltens bewertet werden. Die ereignisdiskrete Simulationsmethode geht davon aus, dass in dem Simulationsmodell zu beliebigen Zeitpunkten Ereignisse eintreten können, die einen Wechsel zwischen diskreten Zuständen auslösen (vgl. Gutenschwager et al. 2017, Kap. 3). Die Abbildung stochastischer Zusammenhänge in den Simulationsmodellen erlaubt die ergänzende Betrachtung von zufälligen Verhaltensmustern auch komplexer Produktions- und Logistiksysteme. Die VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1, definiert den Begriff Simulation für den Bereich Produktion und Logistik daher allgemein als „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 2014, S. 3). Über den Zusatz „Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“ grenzt sie den Begriff zu den rein statischen Analysemethoden wie z. B. Tabellenkalkulationen ab. Die Experimentierbarkeit in der Begriffsdefinition verdeutlicht die Möglichkeit, mittels verschiedener Parameterkonfigurationen eine umfassende Entscheidungsgrundlage zu schaffen.

In der Automobilindustrie wird schon seit Jahren gefordert, dass eine Fabrik nur dann in Betrieb gehen darf, wenn zuvor das Zusammenspiel von Produkt, Produktionsprozess und Produktionsstätte simuliert wurde (vgl. Gutenschwager et al. 2017, Kap. 1). Nur mittels einer Ablaufsimulation lassen sich Planungen komplexer Systeme hinreichend absichern, ausreichend nachvollziehen und umfassend begründen. Zudem hat sich mit der zunehmenden Komplexität, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Produktions- und Logistiksysteme bei gleichzeitiger Verkürzung der Planungszeiträume die Relevanz der Ablaufsimulation als Analysemethode kontinuierlich erhöht. Auch die zunehmende Digitalisierung in der Fabrikplanung hat dazu geführt, dass die Ablaufsimulation einen klaren Platz als unterstützende Planungsmethode erhalten hat. Innerhalb des Methodenkanons der Digitalen Fabrik (vgl. Bracht et al. 2018) ist die Simulation daher explizit Bestandteil. Auch die Begriffsdefinition VDI 4499 zur Digitalen Fabrik (VDI 2008, S. 3) benennt die Simulation neben der Visualisierung als die entscheidende Methode, um eine Planung und Verbesserung aller Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik zu unterstützen. Aktuelle Entwicklungen in Richtung Industrie 4.0 und die Umsetzung eines Digitalen Zwillings, der das Verhalten eines Produktions- oder Logistiksystems nachbildet und als Entscheidungsbasis das reale Systeme ergänzen soll, verdeutlichen ebenfalls, dass die Relevanz der Ablaufsimulation für Planung und Betrieb weiter steigen wird.

Die Bandbreite der Anwendungen in der Automobilindustrie ist vielfältig, zieht sich durch alle Gewerke und behandelt alle Ebenen vom Werk bis zum einzelnen Produktionsbereich.

Das vorliegende Buch versucht dieser Bandbreite gerecht zu werden und geht in 18 Kapiteln auf verschiedene Anwendungen in der Automobilproduktion ein. So wird der Einsatz der Ablaufsimulation im Karosseriebau in Kap. 2 und 3, in der Lackiererei in Kap. 4, in der Montage in den Kap. 5, 6 und 7 sowie in der Antriebsstrangfertigung in den Kap. 8 und 9 diskutiert. Darüber hinaus werden unterschiedliche Facetten der Intralogistik und der Werklogistik in sechs weiteren (vgl. Kap. 10, 11, 12, 13, 14 und 15) Kapiteln behandelt. Werkübergreifenden Aspekten wie der Betrachtung von Lieferketten und Lieferantennetzwerken widmen sich die Kap. 16 und 17. Zwei weitere (vgl. Kap. 18 und 19) Kapitel behandeln spezielle Anwendungen der Simulation in Instandhaltung und Nacharbeit sowie bei der virtuellen Inbetriebnahme.

Ergänzende zwei Kapitel beschäftigen sich mit speziellen Betrachtungsgegenständen in der Ablaufsimulation. So behandelt das 20. Kapitel Aspekte des Personaleinsatzes und das 21. Kapitel energetische Einflussfaktoren in der Automobilproduktion.

Weitere fünf Kapitel beschäftigen sich mit Querschnittsthemen rund um die Ablaufsimulation, die im Kontext der Automobilproduktion und der aktuellen Entwicklungen zur Digitalen Fabrik und zu Industrie 4.0 heute verstärkt eine Rolle spielen. Themen sind in diesem Zusammenhang die Verwaltung von Simulationseingangsdaten (Kap. 22), die Möglichkeiten der automatischen Modellgenerierung (Kap. 23), die Unterstützung der Simulation durch ergänzende Assistenzwerkzeuge (Kap. 24) und die Nutzung von Optimierungs- (Kap. 25) sowie 3D-Visualisierungsmethoden (Kap. 26).

Über die unterschiedlichen Autorengruppen wird nicht nur die Bandbreite der Anwendungen, sondern auch die jeweilige Sichtweise der Fahrzeughersteller, Zulieferer, Dienstleister und Hochschulen verdeutlicht. Alle Kapitelinhalte liegen daher in der Verantwortung der jeweiligen Autorengruppen. Mögliche Überschneidungen in den Kapitelinhalten sind ausdrücklich gewünscht.

---

## 1.2 Stand der Technik

Dieser Abschnitt widmet sich den Werkzeugen zur Ablaufsimulation in der deutschen Automobilindustrie. Der Schwerpunkt der Ausführungen liegt auf einem kurzen Überblick über die im Einsatz befindlichen Werkzeuge sowie einer Erläuterung der Aspekte Datenhaltung, Verifikation und Validierung (V&V) sowie Animation.

### 1.2.1 Eingesetzte Simulationswerkzeuge und ihre Eigenschaften

Grundsätzlich gibt es für die ereignisdiskrete Simulation in Produktion und Logistik eine Vielzahl verschiedener Simulationswerkzeuge. Einen umfassenden und im zweijährigen Turnus aktualisierten internationalen Überblick über diese Werkzeuge bietet Swain (2017).

In der Literatur findet sich ferner eine Reihe von Kriterien zur Bewertung von Simulationswerkzeugen (vgl. z. B. Noche und Wenzel 1991, S. 33–34, 41–44; VDI 1997; Hlupic et al. 1999 oder auch Verma et al. 2008). Dazu gehören Kriterien zur Abfrage von kaufmännischen Randbedingungen wie Lizenzarten und Lizenzpreisen oder Kosten für Wartung und Unterstützung, funktionale Kriterien zur Bedienoberflächengestaltung und Visualisierung, zur Unterstützung von Modellbildung, Verifikation und Validierung sowie Experimentdurchführung bis hin zu Kriterien zur Programmcodierung, -effizienz und Kompatibilität mit anderen Softwarewerkzeugen (vgl. Gutenschwager et al. 2017, S. 232–235). Einige dieser Kriterien spielen auch bei Beiträgen in diesem Buch eine Rolle, wenn es etwa um 2D- oder 3D-Darstellungen von Simulationsabläufen, die Ausführungsgeschwindigkeit von Simulationsläufen oder den Datenaustausch mit Datenbanken geht.

Zur Auswahl eines geeigneten Simulationswerkzeugs haben beispielsweise Noche und Wenzel (1991, S. 29–32) einen einfachen dreistufigen Prozess vorgeschlagen. Allerdings spielt ein solcher mehrstufiger Auswahlprozess für Simulationsanwendungen in der Automobilindustrie seit einigen Jahren nur noch eine untergeordnete Rolle. Das liegt daran, dass sich Ende der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts abgezeichnet hat, dass sich die internationalen Automobilhersteller auf die Anwendung einiger weniger Simulationswerkzeuge konzentrieren. Darunter sind die Werkzeuge Witness der Fa. Lanner Group, Automod der Fa. Applied Materials und Plant Simulation von Siemens PLM. Dabei finden Witness und Automod überwiegend in der britischen und nordamerikanischen Automobilindustrie Anwendung. Wie Hollocks (2006) in einem Überblick zur Historie von Simulationswerkzeugen zeigt, gehen die Ursprünge dieser Festlegungen bis weit in die 1970er-Jahre zurück, als Vorläufer von Witness bei British Leyland zum Einsatz gekommen sind. Die Nähe von Witness und Automod zu Automobilunternehmen mit Wurzeln in England und den USA spiegelt sich auch in diesem Buch wider. Das Beispiel von Ford baut auf dem umfassenden Einsatz von Witness auf, und ein Beispiel von Opel (als ehemaliger deutscher Tochter des amerikanischen General Motors Konzerns) geht auf die Anwendung von Automod zurück.

Bei den übrigen Automobilherstellern mit deutschen Wurzeln überwiegt der Einsatz von Plant Simulation. Diese Entwicklung hat – von Automobilhersteller zu Automobilhersteller leicht zeitversetzt – ebenfalls in der zweiten Hälfte der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts eingesetzt. Mittlerweile gibt es im Verband der Automobilindustrie (VDA) eine Arbeitsgruppe zum Thema Ablaufsimulation, die aufbauend auf Plant Simulation umfangreiche Bibliotheken entwickelt hat und zahlreiche Handreichungen in Form von Dokumentationen, Schulungsunterlagen und Ausführungsanweisungen zur Verfügung stellt (vgl. Mayer und Pöge 2010, 2013 sowie Abschn. 1.3). Das ist in Deutschland insoweit prägend für die gesamte Branche, als sämtliche Lieferanten von Anlagen oder Ingenieurdienstleistungen, die Simulationen im Auftrag von Audi, BMW, Daimler, Volkswagen oder ZF durchführen, in fast allen Fällen gehalten sind, Plant Simulation zusammen mit der Bausteinbibliothek des VDA zum Einsatz zu bringen. Das trägt erheblich zu einer hohen Durchdringung der gesamten Automobilzulieferindustrie mit Plant Simulation bei und auch in diesem Buch finden sich einige Anwendungsfälle, die auf der Software von Siemens und der Bibliothek des VDA aufbauen.

Einige weitere Beispiele in diesem Buch verwenden andere Simulationswerkzeuge. Eine Gemeinsamkeit dieser Anwendungsfälle ist, dass sich ihr Untersuchungsgegenstand nicht auf Abläufe zwischen den Toren eines Werkes beschränkt, sondern dass standortübergreifende Transport- oder Liefervorgänge untersucht werden. Die in diesen Fällen verwendeten Werkzeuge sind OTD-Net, Anylogic und DOSIMIS-3.

## 1.2.2 Datenhaltung

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat die Bedeutung der Eingangsdaten in seiner Richtlinie für Simulation in Produktion in Logistik in einem Leitsatz zusammengefasst, der vereinfacht besagt, dass Simulationsergebnisse wertlos sind, wenn die Datenbasis fehlerhaft ist (vgl. VDI 2014, S. 6). Insofern ist es nur folgerichtig, dass in fast allen Beiträgen dieses Buches Daten eine wichtige Rolle spielen. Dabei geht es nicht nur um die Bereitstellung von Eingangsdaten für Simulationsstudien, sondern ebenso um die Sammlung der Ergebnisdaten aus Simulationsläufen. In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass sich die Bedeutung von Daten für Simulationsstudien in der Automobilindustrie nicht grundsätzlich von der in anderen Industriezweigen unterscheidet.

In Anlehnung an die Einteilung in VDI (2014, S. 22) werden für den Aufbau eines Simulationsmodells Daten zur Beschreibung der Systemstruktur (in vielen Fällen etwa in Form eines CAD (Computer Aided Design) Layouts oder eines Blocklayouts), Daten zur Charakterisierung der Systemkomponenten (z. B. Verfügbarkeiten oder Taktzeiten), Daten zur Systemorganisation (z. B. Steuerungen oder Arbeitszeitmodelle) und Daten zur Angabe der Systemlast (z. B. Angaben zu den zu produzierenden Aufträgen und ihren Arbeitsplänen) benötigt. Diese Eingangsdaten finden sich (sofern sie vorhanden sind und keine gesonderte Datenerhebung erforderlich ist) in unterschiedlichen Datenquellen. Layouts werden in den entsprechenden CAD-Systemen erstellt. Für die Verwaltung von Arbeitsplandaten bieten beispielsweise Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme Unterstützung. Viele relevante Angaben liegen in Tabellenkalkulationswerkzeugen vor, was in der Regel die Nachverfolgung und Sicherstellung von Aktualität und Vollständigkeit der Daten nicht erleichtert. Das ist einer der Gründe, warum die Automobilindustrie daran arbeitet, Daten in datenbankbasierten Systemen wie etwa der Verfügbarkeitsdatenbank VDB abzulegen, die in drei Beiträgen eine Rolle spielt. Im weiteren Sinne fallen unter diese datenbankbasierten Systeme auch Planungssysteme, wie sie etwa bei der Karosseriebauplanung zum Einsatz kommen. Die Aufgabe dieser Planungssysteme ist es, eine Fabrikplanung durchgängig zu begleiten und die dabei anfallenden Daten zu konsolidieren. Die Vision, möglichst viele der simulationsrelevanten Eingangsdaten aus solchen Planungssystemen übernehmen zu können, wird im Rahmen der Digitalen Fabrik seit einigen Jahren diskutiert.

Der bis zu einer Realisierung dieser Vision durch den Modellierer zu berücksichtigenden Vielfalt bei den Datenquellen gilt es bei der Konzeption und dem Aufbau von Simulationsmodellen (oder bei der Definition von Standards, auf die in Abschn. 1.3 eingegangen wird) gerecht zu werden. Die eingesetzten Simulationswerkzeuge bieten (nicht alle im

gleichen, aber doch in vergleichbarem Maß) Unterstützung für die Handhabung von Daten an. Eine Möglichkeit ist daher die Datenhaltung, -pflege und -sammlung innerhalb des Werkzeugs bzw. innerhalb des mit dem Werkzeug erstellten Simulationsmodells. Dafür muss das Simulationstool interne Datenstrukturen mit den dazugehörigen Funktionen bereitstellen. Ein wesentlicher Nachteil dieses Umgangs mit Daten ist, dass dabei die Datenpflege nicht vom Simulationsmodell getrennt erfolgen kann. Das macht es für den Simulationsspezialisten unter Umständen relativ schwierig, die Datenpflege den Fabrik- oder Logistikplanern zu übertragen, da die Planer typischerweise nicht in die Handhabung der Simulationstools eingewiesen sind. Dieser Nachteil wird vermieden, wenn die Daten modellextern gehalten und gepflegt werden. Diese Datenhaltung kann in den oben erwähnten originären Datenquellen wie ERP- oder CAD-Systemen erfolgen oder, wie im Fall der erwähnten Verfügbarkeitsdatenbank, in eigens für die Simulationsanwendung eingerichteten Datenquellen. Teilweise kommt, wie etwa bei der Nutzung von Assistenzwerkzeugen für die Simulation, auch eine projektbezogene Filterung und Aufbereitung von Daten außerhalb des Simulationstools zum Einsatz. Die Simulationssoftware muss in all diesen Fällen den Zugriff auf Datenbanken oder Dateien (zum Beispiel von Tabellenkalkulationsprogrammen) erlauben.

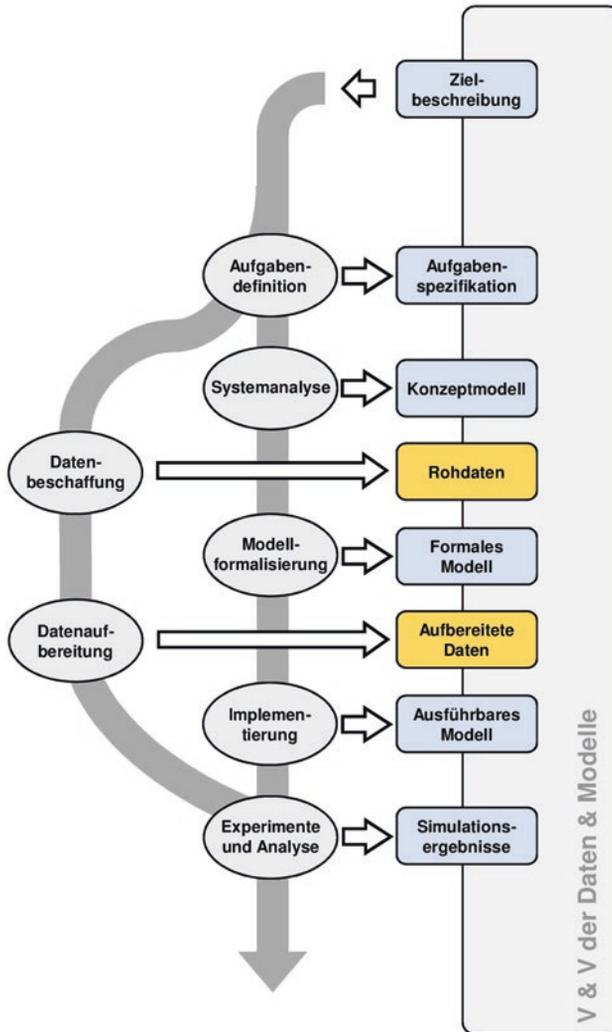
Ähnlich wie die Eingangsdaten können Ergebnisdaten modelintern oder modellextern verwaltet werden. So können Ergebnisdaten im Simulationsmodell gesammelt oder in externe Werkzeuge wie Datenbanken oder Tabellenkalkulationsprogramme exportiert werden. In vielen Fällen geschieht tatsächlich beides, d. h., während eines Simulationslaufs werden die Daten gesammelt und im Anschluss in externe Werkzeuge exportiert.

Insgesamt sind beliebige Kombinationen zur simulationstoolinternen oder -externen Datenhaltung sowie zur Nutzung einfacher Dateiformate bis zu umfassenden Datenbanken möglich. In den einzelnen Fallbeispielen dieses Buches spiegeln sich die unterschiedlichen Lösungen wider.

### 1.2.3 Verifikation und Validierung

Die plakative Formulierung für die Verifikation ist die Frage, ob ein Arbeitsergebnis (z. B. Konzeptmodell, ausführbares Simulationsmodell, Simulationsergebnis) richtig ist. Validierung dient der Überprüfung, ob sich mit den jeweiligen Arbeitsergebnissen der Zweck, für den sie erstellt wurden, erreichen lässt. Das lässt sich plakativ in eine auf den ersten Blick ganz ähnliche Frage fassen, nämlich ob die richtigen Ergebnisse erarbeitet worden sind, wobei im Sinne der Validierung ein „richtiges“ Arbeitsergebnis geeignet ist, den Zweck der Simulationsstudie zu erfüllen. Bei Verifikation geht es also um Korrektheit und bei Validierung um Zweckentsprechung. Insgesamt sollen Verifikation und Validierung (V&V) dafür sorgen, dass in einer Simulationsstudie möglichst glaubwürdige Arbeitsergebnisse entstehen.

Wie sich aus dem Vorgehensmodell in Abb. 1.1 erkennen lässt, sollen V&V eine Simulationsstudie von Beginn bis Ende begleiten. Das verdeutlicht, dass V&V integraler Be-



**Abb. 1.1** Vorgehensmodell für die Simulation inklusive Verifikation und Validierung (Rabe et al. 2008, S. 5)

standteil einer Simulationsstudie sind. Gibt es beispielsweise zu Simulationsmodellen oder zu Simulationsergebnissen keine V&V, heißt das nichts anderes, als dass über die Glaubwürdigkeit von Modell und Ergebnissen keine gesicherten Aussagen gemacht werden können.

Umfangreiche theoretische Überlegungen (vgl. z. B. Rabe et al. 2008) erörtern, wie bei V&V im Detail zu verfahren ist, welche Techniken zur V&V es im Einzelnen gibt, in welchen Phasen einer Simulationsstudie diese Techniken einzusetzen sind und wie die Ergebnisse von V&V dokumentiert werden. In der Automobilindustrie haben sowohl

der VDA als auch einzelne Hersteller diese Überlegungen aufgegriffen und für ihre Belange angepasst. So finden sich Hinweise zur V&V etwa in der VDA-Ausführungsanweisung zur Ablaufsimulation (VDA 2016), in der VDA-Empfehlung zu Qualitätskriterien in der Simulation (VDA 2013) oder in unternehmensinternen Richtlinien von OEMs und Zulieferern.

Einzelne Aspekte der in diesen Unterlagen enthaltenen V&V-bezogenen Vorgaben haben Eingang in die Beiträge dieses Buches gefunden, etwa wenn es um die Bedeutung der (in weiten Teilen unabhängig vom Modell durchführbaren) V&V von Daten oder um den Vergleich von Simulationsergebnissen mit dem tatsächlichen Systemverhalten oder mit planerischen Vorgaben geht.

### 1.2.4 Animation

VDI (2009, S. 3) definiert Animation als die „Erzeugung und Präsentation von Bildfolgen, in denen Änderungen (z. B. [...] Bewegungen von Modellelementen) einen visuellen Effekt bedingen“. Damit ist Animation eine Form der Visualisierung, die in der Simulation eine Rolle spielt. Eine andere Form ist beispielsweise die Darstellung von Simulationsergebnissen mit Hilfe von Histogrammen oder Liniendiagrammen, wobei im Folgenden aufgrund der Bedeutung der Animation für die Simulation in Produktion und Logistik diese Visualisierungsform herausgegriffen wird. Für eine umfassendere Darstellung zur Visualisierung und Animation sei z. B. auf Gutenschwager et al. 2017, S. 25–27, verwiesen.

Animationen in 2D haben eine lange Tradition in Simulationsstudien in der Automobilindustrie. Sie helfen dem Simulationsspezialisten bei der Modellvalidierung, dienen zur Veranschaulichung von Abläufen für die Fachteams, die für die Planung verantwortlich sind, und werden bei der Präsentation von Simulationsergebnissen mit eingebunden. Insgesamt sind sie aus der praktischen Simulationsanwendung nicht wegzudenken. Dabei können die 2D-Darstellungen stark vereinfacht sein und eher symbolischen Charakter haben oder realitätsnah am Layout der Fertigungsanlagen orientiert sein.

2D-Animationen werden mittlerweile regelmäßig als nicht mehr zeitgemäß wahrgenommen. Das mag mit den Fortschritten der visuellen Darstellungen mit Hilfe von Computern im Allgemeinen zusammenhängen und wird in der industriellen Anwendung sicher dadurch zusätzlich befördert, dass sich 3D-Darstellung und -Konstruktion im CAD-Bereich immer mehr durchsetzen. Diese Entwicklung hat dazu geführt, dass es schon seit vielen Jahren Ansätze zu 3D-Animationen in der Materialflusssimulation gibt.

Nun haben viele Simulationswerkzeuge, darunter auch die in der Automobilindustrie verbreiteten Tools Witness und Plant Simulation (vgl. Abschn. 1.2.1), bis vor einigen Jahren ausschließlich eine 2D-Visualisierung zur Verfügung gestellt. Das ändert sich zunehmend, ist aber sicher einer der Gründe, warum fast alle der in diesem Buch dargestellten Anwendungen zweidimensionale, teilweise schematische und teilweise layoutorientierte Visualisierungen umfassen. Mit der Historie der beiden Softwarepakete und dem gleichzeitigen Bedürfnis nach Animationen in 3D hängt es zusammen, dass in diesem Buch ein

umfassendes Beispiel für eine 3D-Visualisierung auf ein ergänzendes Softwarepaket zurückgreift. Der Weg, für die 3D-Animation zusätzliche Tools einzusetzen, ist in den zurückliegenden Jahren sehr häufig beschritten worden. Er bedeutet allerdings in der Regel einen unvermeidlichen Mehraufwand gegenüber einer unmittelbaren Erstellung der Animation im Simulationsmodell.

Mittlerweile sind die Möglichkeiten zur 3D-Animation in den gängigen Simulationswerkzeugen deutlich besser geworden, der Aufwand für die Erstellung der Animationen sinkt und der Anteil der Studien, bei denen auf 3D-Animation zurückgegriffen wird, nimmt zu. Insbesondere bei unübersichtlichen Anordnungen von Fördertechnik oder Produktionsanlagen kann die 3D-Darstellung die Vermittlung der Abläufe in der Simulation deutlich erleichtern.

Gleichwohl ist die 3D-Animation in den meisten Simulationswerkzeugen immer noch vereinfacht und nicht fotorealistisch, sodass es nach wie vor Fälle gibt, in denen auf externe Tools zurückgegriffen wird. Die Vision in der Automobilindustrie ist allerdings eine integrierte, fotorealistische 3D-Animation aller Abläufe einschließlich der Darstellung des Gebäudes, und es wird spannend sein, die entsprechenden Fortschritte in den nächsten Jahren zu verfolgen.

---

## 1.3 Standardisierung und organisatorische Einbindung

Neben Kenntnissen zum eingesetzten Simulationswerkzeug werden von einem Simulationsexperten selbstverständlich auch Kenntnisse zu den abzubildenden Prozessen erwartet. Darüber hinaus sind weitere Faktoren für den Erfolg des Einsatzes der Ablaufsimulation in der Industrie ausschlaggebend. Für die Automobilindustrie sind in diesem Zusammenhang vor allem verschiedene Aspekte der Standardisierung, wie eine Standardisierung der Bausteine, eine Standardisierung des Aufbaus von Simulationsmodellen und eine standardisierte Durchführung von Simulationsstudien zu nennen. Hierzu zählen auch die softwaretechnische Unterstützung der Simulationsexperten über alle Phasen eines Simulationsprojektes sowie die ideale Einbindung der Ablaufsimulation in die betriebliche Organisation.

### 1.3.1 Aktuelle Herausforderungen der Ablaufsimulation in der Planung (der Automobilproduktion)

Die Automobilindustrie ist seit Jahren großen Veränderungen ausgesetzt. Waren vor zwanzig Jahren die Modellzyklen, in denen ein Fahrzeugtyp gebaut wurde, noch relativ lang und die Modellapalette überschaubar, so geht inzwischen der Trend zu mehr Fahrzeugtypen und Varianten mit kürzeren Laufzeiten. Auch die Produktionsstandorte haben sich von einer eher nationalen Fertigung zu internationalen Produktionsverbänden verändert. Dies bedingt zum Teil sogar Fabriken, die Fahrzeuge mehrerer Marken innerhalb der Konzerne fertigen. Auch klare Zuordnungen von Fahrzeugtypen zu einem Produktionsstandort sind seltener geworden, Fahrzeuge mit hohem Volumen werden vermehrt in

mehreren Standorten produziert. Weitere Aspekte sind die strengeren gesetzlichen Umweltauflagen sowie steigende Energiekosten.

Diese Veränderungen führen zu einer signifikanten Steigerung der Anzahl an Planungsprojekten. Auch die Komplexität der Planung steigt aufgrund der deutlich komplexer werdenden Fertigungsstrukturen. So ergeben sich beispielsweise aus der wachsenden Anzahl an Fahrzeugtypen und Varianten steigende Anforderungen an die Flexibilität der Anlagen. Hiervon ist vor allem der durch die hohe Automatisierung strukturell wenig flexible Karosseriebau betroffen.

Zusätzliche Herausforderungen ergeben sich durch die internationalen Produktionsverbände. Hier ist eine Austauschbarkeit der Simulationsprojekte sowie eine einfache Möglichkeit der Integration mehrerer, von verschiedenen Modellerstellern stammender (Teil-) Modelle in ein Gesamtmodell erforderlich, vor allem, wenn gleiche Fahrzeugtypen an mehreren Standorten gebaut werden sollen.

Die steigenden Anforderungen an die Produktionsplanung haben signifikante Auswirkungen auf die Ablaufsimulation. Die Simulation als eine Methode, um Komplexität beherrschbar zu machen, leistet einen entscheidenden Beitrag zur Absicherung der Planungsprojekte und kommt in der Automobilindustrie verbreitet zum Einsatz. Daher müssen inzwischen immer mehr und immer komplexere Simulationsprojekte in immer kürzerer Zeit bewältigt werden.

Aus diesem Grund wurden in der Automobilindustrie in den letzten Jahren im Wesentlichen drei Maßnahmen ergriffen, um mit diesen Anforderungen umzugehen. Erstens wurden viele wiederkehrende Problemstellungen in einer gemeinsamen Lösung zusammengeführt und verallgemeinert (Abschn. 1.3.2). Zweitens wurden Lösungen der Simulationsassistenz eingeführt, die den Simulationsexperten bei der Bewältigung von komplexen Simulationsprojekten durch Entlastung von zeitaufwendigen wiederkehrenden Arbeiten unterstützen (Abschn. 1.3.3). Diese ermöglichen auch die Datenübernahme aus Planungssystemen zur Entlastung der Experten. Drittens wurde die Ablaufsimulation adäquat in die betrieblichen Abläufe eingebunden (Abschn. 1.3.4).

## **1.3.2 Standardisierung**

### **1.3.2.1 Notwendigkeit der Standardisierung**

Die Aufgaben und Problemstellungen für die Ablaufsimulation in der Automobilproduktion sind meist wiederkehrend. Als Beispiel sei hier die Errichtung einer neuen Fertigungseinheit für ein neues Fahrzeug im Karosseriebau eines Automobilherstellers genannt. Zur Herstellung der Karosserie werden die vom Presswerk gefertigten Teile sowie Zukaufteile wie Schrauben oder Bolzen durch Industrieroboter zusammengefügt. Dies geschieht meist durch die Prozesse Schweißen, Schrauben oder Kleben. So verschieden die einzelnen Fahrzeuge auch sind, so unterliegt der Fertigungsprozess einer hohen Standardisierung. Diese Aussage trifft sowohl auf die Fertigung selbst als auch auf die logistische Verbindung der Anlagen durch die Fördertechnik zu.

Für die Abbildung solcher Fertigungsprozesse wäre es wenig sinnvoll, die einzelnen zu modellierenden Elemente für jeden Einsatz in einer Simulationsstudie neu zu entwickeln. Aus diesem Grund sind in der Automobilindustrie Bibliotheken mit standardisierten Bausteinen entstanden, die häufig verwendete Funktionalitäten gekapselt zur Verfügung stellen und so die Modellerstellung beschleunigen sowie – unterstützt durch entsprechende Modellierungsrichtlinien – einen weitgehend einheitlichen Modellaufbau fördern. Als Beispiel sei hier der VDA Automotive Bausteinkasten, eine Bibliothek für das Simulationswerkzeug Plant Simulation, genannt, der unternehmensübergreifend in der Automobilindustrie im Einsatz ist (vgl. Mayer und Pöge 2010) und auf dem deshalb auch zahlreiche Anwendungsbeispiele in diesem Buch aufbauen. Diese Bibliothek fördert nicht nur einen einheitlichen Aufbau von Simulationsmodellen durch die Verwendung der in der Bibliothek enthaltenen Bausteine, auch die Bausteine selbst sind standardisiert aufgebaut. So gibt es in jedem Bibliotheksbaustein einen „public“-Bereich, in dem der Anwender Parametrierungen vornehmen sowie individuelle, auf den konkreten Anwendungsfall bezogene, Logiken programmieren kann und einen „private“-Bereich, der die interne Logik des Bausteins enthält. Für die Umsetzung individueller Logiken durch den Simulationsexperten stehen im „public“-Bereich der Bausteine spezielle Interaktionsobjekte zur Verfügung, die zu definierten Zeitpunkten während des Simulationslaufs aktiviert werden. Werden diese Interaktionsobjekte durch den Modellierer tatsächlich zur Abänderung des (Standard-)Verhaltens eines Bausteins verwendet, so wird dies durch eine Änderung ihres Symbols angezeigt. Dadurch wird die Einarbeitung in Modelle anderer Experten deutlich erleichtert, da so individuelle Anpassungen leichter aufzufinden sind. Zusätzlich unterliegen die in den Bausteinen enthaltenen Variablen und Methoden einer vorgegebenen Namenskonvention und einem Farbschema, das signalisiert, ob Variablenwerte oder Quelltexte vom Anwender geändert werden dürfen oder nicht. Nicht zuletzt sind die Parametermasken des VDA Automotive Bausteinkastens einheitlich gestaltet. Ähnliche Bibliotheken gibt es in vielen anderen Unternehmen und für verschiedene Simulationswerkzeuge.

Ein weiteres Kriterium für eine Standardisierung in der Ablaufsimulation ist die Lebensdauer eines Simulationsmodells. Soll dieses über längere Zeit genutzt werden, so ist eine Standardisierung der Bausteine und des Aufbaus zu empfehlen.

Am Beispiel eines Karosseriebaumodells könnte eine längerfristige Nutzung wie folgt aussehen:

- Absicherung und Planung der Fördertechnikkreisläufe zwei Jahre vor Produktionsbeginn (SOP, Start of Production),
- Engpassanalyse während des Anlaufs,
- Optimierung des Fertigungsflusses ein Jahr nach SOP,
- Absicherung und Optimierung einer Stückzahlerhöhung zwei Jahre nach SOP,
- Absicherung und Optimierung eines Facelifts des gebauten Fahrzeugs und
- Absicherung einer nötigen Strukturumbaumaßnahme fünf Jahre nach SOP.

Dieses Beispiel illustriert die Nutzung eines Modells über mehrere Jahre. Bei einem nicht-standardisierten Aufbau wäre die Pflege und Weiterentwicklung des Modells aus verschiedenen Gründen sehr aufwendig. Zum einen gibt es softwaretechnische Abhängigkeiten von neuen Versionen des gewählten Simulationswerkzeugs, die eine Aktualisierung des Modells erforderlich machen, zum anderen können personelle Veränderungen, wie z. B. der Wechsel eines Simulationsexperten, auftreten. Selbst wenn der Experte über die Lebenszeit des Simulationsmodells nicht wechselt, haben die Erfahrungen gezeigt, dass es auch hier nach einiger Zeit ohne direkte Beschäftigung mit dem Modell wieder zu einer längeren Einarbeitungszeit kommt.

Aber nicht nur der Aufbau der Simulationsmodelle kann standardisiert werden. Auch die Simulationsprojekte selbst laufen überwiegend sehr ähnlich ab, sodass es sich lohnt, auch die Projektdurchführung zu standardisieren, um die Erfahrungen aus dem Verlauf vergangener Projekte zu nutzen, den organisatorischen Aufwand zu verringern und Fehler zu vermeiden. Bei vielen OEMs und Zulieferern ist dieses Vorgehen in einem Prozessmodell und in den für Simulationsprojekte relevanten Lastenheften dokumentiert.

Über diese organisatorischen Standards in den einzelnen Unternehmen hinaus gibt es auch innerhalb des VDA Aktivitäten zur Standardisierung im Umfeld der Durchführung von Simulationsprojekten. Als Ergebnis dieser Bemühungen sind bisher zwei VDA-Empfehlungen entstanden, die Aussagen zu Begriffsdefinitionen für die Logistiksimulation (vgl. VDA 2011) und Qualitätskriterien für Simulationsprojekte (vgl. VDA 2013) enthalten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Die Vorteile der Standardisierung der Bausteine und des Modellaufbaus liegen in einer effizienteren und qualitativ hochwertigeren Erstellung eines Simulationsmodells sowie in einer zu einem gewissen Grad erzwungenen einheitlichen Modellierung, die eine langfristige und vom ursprünglichen Modellersteller unabhängige Nutzbarkeit des Simulationsmodells ermöglicht.

### **1.3.2.2 Vor- und Nachteile einer Standardisierung**

Um die Sinnhaftigkeit einer Standardisierung realistisch abwägen zu können, ist es wichtig, die Vor- und Nachteile zu betrachten. Die nachfolgenden Abschnitte beleuchten diese jeweils aus Sicht der Automobilindustrie.

Neben dem oben bereits genannten Vorteil der Zeitersparnis bei der Modellierung gibt es eine Reihe weiterer Vorteile. So wird es durch eine Standardisierung von Simulationsbausteinen bzw. des Aufbaus eines Simulationsmodells möglich, Personal gezielt zu schulen. Auch eine Weitergabe und eine Nutzung von Modellen über viele Jahre sind möglich (vgl. Mayer und Spieckermann 2008). Dies fördert auch die Anpassbarkeit der Modelle an neue Versionen des Simulationswerkzeugs.

Für eine Zusammenarbeit mehrerer Simulationsexperten, auch über mehrere Standorte bzw. mit externer Unterstützung, ist Standardisierung unabdingbar. Diese kann es hier sogar ermöglichen, dass das Modell selbst in logische Einzelteile, wie z. B. Baugruppen im Karosseriebau, unterteilt wird und die Teilmodelle von unterschiedlichen Stellen bearbeitet und später wieder zusammengeführt werden.

Auch für die Datenübernahme aus Planungs- oder Produktionssystemen ist Standardisierung hilfreich. So können Schnittstellen oder Funktionen zur automatischen Modellgenerierung einmalig als Bausteine realisiert und dann in allen Modellen verwendet werden.

Durch die größere Verbreitung einer Bausteinbibliothek sind deren einzelne Elemente eher fehlerfrei, als es neu und einmalig implementierte Funktionen sein werden. Eine Standardisierung der Bausteine sowie des Modellaufbaus selbst garantiert eine Mindestqualität der Simulationsmodelle (vgl. VDA 2013).

Auch neue Anforderungen an die Ablaufsimulation lassen sich in eine bereits existierende Modelllandschaft leichter integrieren, falls diese mit einheitlichen Bausteinen aufgebaut wurde. Als Beispiele für neue Anforderungen seien hier die Themen Betrachtung energetischer Faktoren in der Ablaufsimulation und 3D-Visualisierung genannt.

Als letzte aber nicht unwichtige Punkte können ein auf eine Standardbibliothek fokussierter Support und eine Senkung der Kosten genannt werden. Letztere tritt zwar nicht immer sofort mit dem ersten Simulationsprojekt ein, aber je mehr Projekte auf eine Standardbibliothek aufsetzen, umso effizienter und damit günstiger werden auch die Simulationsstudien.

Neben den genannten Vorteilen können auch Nachteile durch die Standardisierung im Bereich der Ablaufsimulation auftreten. Als Erstes ist die zunehmende Komplexität der Bausteine zu nennen, die dadurch entsteht, dass eine Standardbibliothek – im Unterschied zu Funktionen zur Lösung einer spezifischen Simulationsaufgabe – alle denkbaren Einsatzszenarien berücksichtigen muss. Je mehr Funktionen aber in einem Simulationsbaustein implementiert werden, desto komplexer werden Aufbau und Bedienung sein. Hier besteht die Gefahr, zu viele Funktionen in einen Baustein zu integrieren, sodass dieser für den Anwender nur noch schwer verständlich ist. Die Alternative dazu wäre die Aufspaltung der komplexen Bausteine in mehrere weniger komplexe mit jeweils eingeschränktem Funktionsumfang. Dies erhöht allerdings die Anzahl der Bausteine in der Standardbibliothek und macht diese dadurch unübersichtlich.

Durch ein hohes Standardisierungsniveau kann es auch dazu kommen, dass durch die in der Regel erst einmal vollständig in das Simulationsmodell geladenen Bausteinsammlungen viele Funktionalitäten ungenutzt bleiben, wodurch sich die Größe der Modelle unnötigerweise erhöht. Eine Modularisierung der Funktionen kann hier in gewissem Umfang Abhilfe schaffen.

Eine grundsätzliche Herausforderung beim Einsatz von Standards ist die Gefahr, dass ein einmal eingeführter Standard zu träge ist, um sich an neue Rahmenbedingungen oder technische Möglichkeiten anzupassen, was dazu beitragen kann, Innovationen zu verlangsamten oder ganz generell zu behindern. Hier muss durch ein Gremium die Anwendbarkeit in regelmäßigen Abständen überprüft und neu bewertet werden. Idealerweise sollte dieses Gremium auch in die Weiterentwicklung der Standards eingebunden sein bzw. diese selbst steuern. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass Standards die Kreativität von Anwendern einschränken. Um diese negativen Auswirkungen zu reduzieren, sollte das Niveau, auf dem die Standardisierung erfolgt, so gewählt werden, dass ihre positiven Effekte genutzt werden können, ohne größere Einschränkungen in der Nutzung zu erzeugen.

Als letzter Punkt sei genannt, dass es durch die Einführung standardisierter Bausteinbibliotheken und eines einheitlichen Vorgehens zur Durchführung von Simulationsprojekten zu zusätzlichem Schulungs- und Einarbeitungsbedarf kommt. Dies beginnt mit dem Kennenlernen der standardisierten Bausteine sowie der Einhaltung eines standardisierten Modellaufbaus und reicht bis hin zur standardisierten Projektdurchführung.

### 1.3.2.3 Von der Idee zum standardisierten Baustein

Grundsätzlich eignen sich häufig wiederkehrende Tätigkeiten eher für eine Standardisierung als Tätigkeiten, die selten oder gar nur einmal durchgeführt werden. Ein Argument für eine Standardisierung kann die Forderung nach einer leichteren Austauschbarkeit von Arbeitsergebnissen zwischen den an einer Tätigkeit beteiligten Partnern sein. Ein weiteres Argument ist die Möglichkeit, unterschiedliche Personen mit der Durchführung der Tätigkeiten zu betrauen. Ist die Entscheidung für eine Standardisierung gefallen, sollte der Umfang so gewählt werden, dass zunächst die wesentlichen Tätigkeiten und Arbeitsergebnisse in den Standard aufgenommen werden. Häufig kann dabei nach dem Pareto-Prinzip vorgegangen werden, d. h., dass in der Regel 80 Prozent der Umfänge mit 20 Prozent des Aufwandes umgesetzt werden können. Die verbleibenden 20 Prozent benötigen 80 Prozent des Aufwandes und können bei Bedarf später in den Standard aufgenommen werden. Ferner sollte der Standard so gestaltet sein, dass er möglichst breite Anwendung finden kann. Bei einer geplanten internationalen Anwendung bietet sich z. B. die Verwendung der englischen Sprache an.

Bei der Erstellung standardisierter Bausteinbibliotheken ist ein zentraler Punkt der Aufbau der einzelnen Bausteine. Meist sollen viele Funktionalitäten durch wenige Bausteine bereitgestellt werden. Daher ist es wichtig, sich vor der Erstellung Gedanken über die Anwenderfreundlichkeit zu machen. Idealerweise werden Elemente, die vom Anwender geändert werden können oder sollen, von solchen entkoppelt, die unverändert bleiben sollen. Auch Parametermasken tragen zur Akzeptanz der standardisierten Bausteine bei, da sie die Anwenderfreundlichkeit erhöhen. Diese Masken sind idealerweise zu- bzw. abschaltbar, da es auch Simulationsexperten gibt, die es bevorzugen, ohne diese zu arbeiten.

Als bedeutender Punkt bei der Umsetzung von Bausteinbibliotheken hat sich herausgestellt, dass es vorteilhaft ist, die Bausteine nicht zu verschlüsseln, falls dies lizenztechnisch möglich ist. Die Gründe hierfür liegen darin, dass Software zum einen nie völlig fehlerfrei ist und der Simulationsexperte so mögliche Fehler direkt beheben kann und nicht auf eine Fehlerbehebung seitens des Supports warten muss, zum anderen ein offener Quelltext das Verständnis der implementierten Funktionen erleichtert und auch direkte Eingriffe durch den Simulationsexperten ermöglicht.

Sehr aufwendig, aber immens wichtig ist eine vollständige Dokumentation der standardisierten Umfänge. Diese sollte nach Möglichkeit in allen von den Anwendern benötigten Sprachen vorliegen. Als Ergänzung sind Schulungsunterlagen, Demonstrationsmodelle oder Tutorials hilfreich. Gerade Demonstrationsmodelle können bei der Einarbeitung in einen neuen Standard sehr nützlich sein.

Da es sich bei der Erstellung von Standardbausteinen für die Ablaufsimulation per se um Softwareentwicklung handelt, ist es ebenfalls notwendig, sich Gedanken über die Prozesse

zum Testen, zur Fehlerbehebung und zur Veröffentlichung neuer Versionen zu machen. Bei der Versionsplanung für die Bausteinbibliothek ist auch die Versionsplanung des eingesetzten Simulationswerkzeugs zu beachten, da hier in der Regel Abhängigkeiten bestehen.

Als letzter Punkt ist noch die Verwaltung der Bibliotheken zu nennen. Diese kann, wenn die Funktionalität nicht vom Simulationswerkzeug bereitgestellt wird, auch in Werkzeugen der Softwareentwicklung stattfinden. Als Beispiele seien hier die freien Softwarepakete CVS (Concurrent Versions System), SVN (Apache Subversion) oder Git genannt.

### 1.3.3 Simulationsassistentz

Während die oben dargestellten Maßnahmen zur Standardisierung – mit Ausnahme der standardisierten Projektdurchführung – hauptsächlich das Ziel verfolgen, den Simulationsexperten bei der Modellerstellung zu unterstützen und damit auch die dafür benötigte Zeit zu verkürzen, ist das Ziel einer Simulationsassistentz, den Simulationsexperten auch in allen anderen Schritten einer Simulationsstudie zu unterstützen und dadurch weiteres Effizienzpotenzial zu heben (vgl. Abb. 1.1). Simulationsassistentzwerkzeuge stellen Funktionen bereit, die von der Datenaufbereitung und -analyse über die Experimentplanung und -durchführung bis hin zur automatisierten Auswertung und Visualisierung der Ergebnisdaten reichen.

Zur Verkürzung der Projektlaufzeiten können hier unterschiedliche Funktionen herangezogen werden. Das Portfolio reicht von der Definition einer Standard-Projektvorgehensweise über den Datenimport aus Planungs- oder Produktivsystemen mit (teil-)automatischer Modellgenerierung bis hin zu Auswertungen, in Form von Durchlaufzeitendiagrammen und Füllstandsverläufen, die durch die Verbindung einer Vorlage mit der jeweils aktuellen Datenbasis automatisch erstellt werden. Moderne Assistentzsysteme ermöglichen es auch, vorgegebene Konzern- oder Markenfarbvorgaben (CI, Corporate Identity) zu verwalten und interaktiv umzuschalten.

Oft wird mit Simulationsassistentzsystemen auch eine einheitliche Datenbasis, meist basierend auf einem Datenbanksystem, geschaffen. Hier ist es zusätzlich möglich, Zugänge zu anderen Planungssystemen oder dem Produktivsystem zu schaffen, um deren Daten direkt nutzbar zu machen. Dies hat neben einer Beschleunigung des Datenhandlings auch eine Verbesserung der Datenqualität zur Folge.

### 1.3.4 Organisatorische Einbindung

Die Einbindung der Ablaufsimulation in die Unternehmen ist aktuell sehr unterschiedlich umgesetzt. Begonnen wurde mit dem Einsatz der Ablaufsimulation meist dezentral in der Planung einzelner Gewerke in den Produktionsstandorten. Dies hat den Vorteil, dass die Simulation dort angesiedelt ist, wo auch die aktuelle Fertigung stattfindet bzw. die neue Fertigung geplant wird. Somit ergeben sich kurze Wege von der Planung zur Ablaufsimulation und weiter zur Produktion, sodass auch der Zugang zu den Planungs- oder Fertigungsdaten deutlich erleichtert wird.

Problematisch ist hier die zumeist fehlende Vernetzung mit anderen Ablaufsimulationsexperten im eigenen Unternehmen. Wird dann nicht zumindest diese Vernetzung zentral organisiert, findet sie oft nicht statt. Ein anderer Nachteil eines dezentralen Ansatzes ist die oft ungenügende Auslastung der Simulationsexperten mit simulationsbezogenen Tätigkeiten, sodass diese auch zusätzliche, über die Simulation hinausgehende, Aufgaben abdecken müssen. Durch die dadurch entstehenden Pausen zwischen den Simulationsprojekten geht dem Experten ein Teil seiner erworbenen Fähigkeiten wieder verloren, was zu erhöhtem Einarbeitungsaufwand beim nächsten Simulationsprojekt führt. Zusätzlich ist zu beobachten, dass dieser Zustand sehr oft der Grund für einen dauerhaften Wechsel der Experten in den ursprünglich nur als Nebentätigkeit gedachten nicht simulationsbezogenen Aufgabenbereich ist.

Eine weitere Herausforderung der dezentralen Organisation ist das Thema Wissenstransfer. Zumeist werden Simulationsmodelle von einem einzelnen Simulationsexperten erstellt, was eine langfristige Nutzung der Modelle erschweren kann. Wird beispielsweise bei einem Wechsel des Simulationsexperten seine Position nicht zeitnah nachbesetzt, geht – bei nicht hinreichender Dokumentation – das Wissen über das Modell und dessen Historie verloren. Dies führte in der Vergangenheit oft dazu, dass die Simulationsmodelle nach jedem Personalwechsel neu aufgebaut wurden. Hier können einheitliche Vorgaben zum Modellaufbau und zur Dokumentation sowie die Verwendung standardisierter Bausteinbibliotheken einen Beitrag zur Abmilderung der beschriebenen negativen Effekte leisten.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte erscheint eine zentrale Organisation auf den ersten Blick besser, wobei diese aber nicht immer darstellbar ist. Wichtige Faktoren für die Wahl der Organisationsform sind Anzahl und räumliche Verteilung der Standorte in einem Unternehmen. Bei einer großen Anzahl weltweit verteilter Standorte sind die Simulationsexperten in einer rein zentralen Einbindung zu großen Teilen mit Reisen beschäftigt, was wiederum den wertschöpfenden Anteil bei der Bearbeitung der Simulationsstudie reduziert. Zusätzlich ergeben sich durch eine organisatorische Trennung von den jeweiligen Planungsabteilungen zusätzliche Schnittstellen, was z. B die interne Finanzierung der Simulationsprojekte oder den Zugang zu Planungsdaten erschweren kann. Da hier somit kein klares Votum für eine zentrale oder dezentrale Organisation gegeben werden kann, weil beide Organisationsformen ihre Vor- und Nachteile haben, soll an dieser Stelle versucht werden, einige Empfehlungen für die Organisation der Ablaufsimulation im Unternehmen zu geben.

Der wichtigste Punkt ist die Vernetzung der Simulationsexperten. Ist dies durch eine direkte strukturelle Einbindung nicht umsetzbar, so ist es ratsam, virtuelle Teams zu bilden (sogenannte Centers of Competence). In diesen Teams ist es dann möglich, Probleme zu besprechen und Wissen zu vermitteln bzw. zu halten. Weiterhin sollten die Simulationsexperten untereinander sowie mit den Planern und den Betreibern gut vernetzt sein. Eine Simulationsstudie kann immer nur so gut sein, wie es die Eingangsdaten sind, und diese sollten idealerweise immer direkt von Planung oder Betrieb bereitgestellt werden. Zusätzlich sollten Erkenntnisse aus der laufenden (Serien-)Produktion auch wieder als Eingangsgrößen in die Ablaufsimulation zurückfließen.

Idealerweise ist die Ablaufsimulation auch in die Planungsprozesse der Digitalen Fabrik bzw. des Produktentstehungsprozesses eingebunden. Dies sichert die Prüfung der Simulationswürdigkeit durch einen Simulationsexperten zu gewissen Synchronisationspunkten, auch wenn der Planungsverantwortliche die Methodik der Ablaufsimulation nicht kennt.

---

## Literatur

- Bracht U, Geckler D, Wenzel S (2018) *Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele*, 2. Aufl. Springer, Berlin
- Gutenschwager K, Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S (2017) *Simulation in Produktion und Logistik – Grundlagen und Anwendungen*. Springer Vieweg, Berlin
- Hlupic V, Irani Z, Paul RJ (1999) Evaluation framework for simulation software. *Int J Adv Manuf Technol* 15:366–382
- Hollocks BW (2006) Forty years of discrete-event simulation: a personal reflection. *J Oper Res Soc* 57:1383–1399
- Mayer G, Pöge C (2010) Auf dem Weg zum Standard – Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation, Personal*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 29–36
- Mayer G, Pöge C (2013) Quo vadis Ablaufsimulation – Eine Zukunftsvision aus Sicht der Automobilindustrie. In: Dangelmaier W, Laroque C, Klaas A (Hrsg) *Simulation in Produktion und Logistik – Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, S 11–20
- Mayer G, Spieckermann S (2008) Lebenszyklus von Simulationsmodellen: Anforderungen und Fallbeispiele aus der Automobilindustrie. In: Rabe M (Hrsg) *Advances in simulation for production and logistics applications*. Fraunhofer IRB, Stuttgart, S 61–69
- Noche B, Wenzel S (1991) *Marktspiegel Simulationstechnik in Produktion und Logistik*. Verlag TÜV Rheinland, Köln
- Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S (2008) *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Springer, Berlin
- Swain JJ (2017) Simulation software survey: simulation takes over – reality is for sissies. *OR/MS Today* 44:38–49
- VDA (2011) VDA-Empfehlung 4810 Ausprägung der Logistiksimulationen. Resource document, Verband der Automobilindustrie. [https://www.vda.de/dam/vda/publications/Ausprägung%20der%20Logistiksimulationen/1311851683\\_de\\_1583075918.pdf](https://www.vda.de/dam/vda/publications/Ausprägung%20der%20Logistiksimulationen/1311851683_de_1583075918.pdf). Zugegriffen am 03.12.2018
- VDA (2013) VDA-Empfehlung 4811 Qualitätskriterien für Simulationsstudien der Ablaufsimulation. Resource document, Verband der Automobilindustrie. [https://www.vda.de/dam/vda/publications/4811%20Qualitätskriterien%20für%20Simulationsstudien%20der%20Ablaufsimulation/1395759260\\_de\\_358330402.pdf](https://www.vda.de/dam/vda/publications/4811%20Qualitätskriterien%20für%20Simulationsstudien%20der%20Ablaufsimulation/1395759260_de_358330402.pdf). Zugegriffen am 03.12.2018
- VDA (2016) VDA-Ausführungsanweisung Ablaufsimulation, Version 2.6. Resource document, Verband der Automobilindustrie. [http://www.vda-ablaufsimulation.de/images/6/62/Ausfuehrungsanweisung\\_VDA\\_Vers2-6\\_20160418.pdf](http://www.vda-ablaufsimulation.de/images/6/62/Ausfuehrungsanweisung_VDA_Vers2-6_20160418.pdf). Zugegriffen am 03.12.2018
- VDI (1997) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4: Auswahl von Simulationswerkzeugen – Leistungsumfang und Unterscheidungskriterien. Beuth, Berlin
- VDI (2008) VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1: *Digitale Fabrik – Grundlagen*. Beuth, Berlin
- VDI (2009) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 11: *Simulation von Materialfluss- und Produktionssystemen – Simulation und Visualisierung*. Beuth, Berlin

VDI (2014) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Beuth, Berlin

Verma R, Gupta A, Singh K (2008) Simulation software evaluation and selection: a comprehensive framework. *J Automat Syst Eng* 2:221–234



**Gottfried Mayer** Seit 1990 Mitarbeiter der BMW AG. Nach einer Ausbildung zum Industrieelektroniker Fachbereich Produktionstechnik folgte die Instandhaltung im Karosseriebau. Von 1994–1997 nebenberufliche Ausbildung zum Techniker der Elektronik mit Fachbereich Datenverarbeitungstechnik. 1996 Wechsel zur übergeordneten Steuerungstechnik mit Schwerpunkt BDE-Systeme. Seit 1999 im Bereich der Ablaufsimulation, zuerst Karosseriebau Werk München, danach Karosseriebauten weltweit bis hin zur Verantwortung über alle Gewerke. Seit 2011 in der BMW Group IT verantwortlich für die Themenfelder Simulation, virtuelle Produktion und Digitale Fabrik. Seit 2018 IT Projektleiter Additive Manufacturing.



**Carsten Pöge** Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg mit dem Abschluss Diplom-Kaufmann. Seit 2001 bei der Volkswagen AG am Standort Wolfsburg in der Konzern IT tätig und zunächst verantwortlich für die Themen Ablaufsimulation, Betriebsmittelbibliotheken und Systembebauungsplanung. Seit 2006 im Programm Digitale Fabrik IT-Projektleitung für die Methode Ablaufsimulation. Seit 2005 Mitglied und seit 2008 zweiter Sprecher der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation im Verband der Automobilindustrie (VDA).



**Dr. Sven Spieckermann** Jahrgang 1967, seit dem Abschluss seines Studiums der Wirtschaftsinformatik an der TU Darmstadt im Jahr 1994 Berater und Projektleiter Simulation bei der SimPlan Gruppe. 1997 Berufung in die Geschäftsleitung und heute Sprecher des Vorstands der SimPlan AG. Promotion über Simulations- und Optimierungsaufgabenstellungen im Jahr 2002 an der TU Braunschweig. Lehrbeauftragter für Simulation an den Technischen Universitäten in Braunschweig, Darmstadt und Karlsruhe (KIT).



**Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel** Nach dem Studium der Informatik an der Universität Dortmund wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen der Universität Dortmund von 1986–1989 und am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund, von 1990–2004; in dieser Zeit 1998 Promotion an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Rostock sowie 2001–2004 Geschäftsführerin des Sonderforschungsbereichs SFB 559 „Modellierung großer Netze in der Logistik“ an der Universität Dortmund. Seit 5/2004 Professorin an der Universität Kassel und Leiterin des Fachgebietes Produktionsorganisation und Fabrikplanung; u. a. Sprecherin der Fachgruppe Simulation in Produktion und Logistik sowie im Vorstand der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), Mitglied im Fachbeirat in der Gesellschaft für Produktion und Logistik des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI-GPL). Leiterin des VDI-Fachausschusses 204 Modellierung und Simulation.



Claudia Wick, Michael Lüdemann und Gottfried Mayer

## 2.1 Einleitung

Die Planung und die dazugehörige Auslegung und Absicherung von gesamten Karosseriebauten ist durch die hohe Automatisierung der zu planenden Anlagen geprägt. Die Karosseriebauplanung steht im Spannungsfeld zwischen hohen Investitionskosten auf der einen und flexiblen Anlagen auf der anderen Seite. Bedingt durch die hohe Automatisierung ist es oft schwierig, die vorgegebenen Kostenziele zu erreichen und dabei flexibel hinsichtlich der Typen-Belegung der Rohbau-Produktionslinien zu bleiben.

Bevor ein Karosseriebau geplant wird, muss zuerst festgelegt werden, welche Typen in welchen Ausprägungen in welchen Zeiträumen produziert werden sollen. Dazu muss eine Zielausbringung definiert werden. Das bedeutet, dass der Vertrieb prognostiziert, wie viele Fahrzeuge von welchem Typ über wie viele Jahre hinweg voraussichtlich auf dem Fahrzeugmarkt abgesetzt werden können. Von den ersten Festlegungen im Planungsprojekt bis zu dem Tag, an dem das erste Serienfahrzeug die Anlagen durchfährt, vergehen einige Jahre. Ab diesem Serienstart wird die jeweilige Baureihe mehrere Jahre

---

C. Wick  
Daimler AG, Sindelfingen, Deutschland

M. Lüdemann  
Icarus Consulting GmbH, Lüneburg, Deutschland

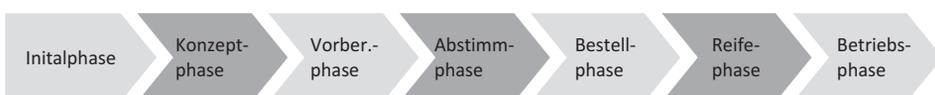
G. Mayer (✉)  
BMW AG, München, Deutschland  
E-Mail: [gottfried.mayer@bmw.de](mailto:gottfried.mayer@bmw.de)

produziert. Um die hohen Investitionskosten wirtschaftlich zu vertreten, werden einige Anlagen auch für die Nutzung über zwei Baureihen geplant. Das bedeutet, dass mit den Entscheidungen während der Planungsphase eine Anlage entsteht, mit der weit länger als zehn Jahre produziert werden muss. In dieser Zeit wandelt sich der Markt, Kundenwünsche verändern sich und die Karosseriebauproduktion soll auf diese Änderungen hinsichtlich Stückzahlverteilungen flexibel reagieren können. Dadurch ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Wie hoch ist der Durchsatz bzw. die Ausbringung von einzelnen Anlagen sowie kompletten Fertigungsbereichen?
- Wie hoch ist die Ausbringung im Gesamtverbund des Karosseriebaus, inklusive einer Abbildung der verbindenden Fördertechnik?
- Wo befindet sich der Engpass in der geplanten oder realen Fertigung?
- Wie können Integrationsszenarien (Integration anderer Typen) bestmöglich geplant und abgesichert werden?
- Wie verhält sich der geplante oder reale Karosseriebau hinsichtlich Verwirbelung bzw. Perlenkettenfertigung? In welchem Umfang und von welcher Art müssen Resortierungsmaßnahmen mit eingeplant werden?
- Wie ist eine ideale Dimensionierung von Puffern bzw. Entkopplungsgrößen?
- Wie können Schichtfahrweisen oder Stückzahlmixe abgesichert werden?
- Wie können unterschiedliche Produktionskonzepte wie z. B. Pulk-/Sequenzfahrweise oder Zuführung von Teilen abgesichert und optimiert werden?
- Was ist die ideale Anzahl von Fahrzeugen bzw. Förderhilfsmitteln bei Skidsystemen, Palettenkreisläufen und Elektrohängebahnen?
- Wie müssen Richtwerte für die Planung (Taktzeiten, Verfügbarkeiten, Schutzbereichsaufteilungen, Kapazitätsauslegungstabelle) aussehen?
- Welche Verbesserungen für Steuerungskonzepte lassen sich erarbeiten?

## 2.2 Ablaufsimulation im Karosseriebau-Planungsprozess

So vielschichtig wie die Fragestellungen selbst sind auch die Einsatzzeitpunkte für die Ablaufsimulation von Karosseriebauten. Stellt man diese auf einem Zeitstrahl analog des Produktentstehungsprozesses (PEP) dar, so ergeben sich die in Abb. 2.1 dargestellten Phasen, die in den folgenden Abschnitten näher beleuchtet werden.



**Abb. 2.1** Phasen der Planung (in Anlehnung an Mayer und Spieckermann 2008, S. 63)

### 2.2.1 Initialphase

Zu Beginn eines neuen Projekts wird untersucht, ob die benötigten Flächen für den Karosseriebau in einem Bestandswerk zur Verfügung stehen. Falls nicht, muss ggf. über Strukturmaßnahmen, wie die Erweiterung oder den Neubau von Hallen, nachgedacht werden. Ebenfalls wird geprüft, ob die verbindende Fördertechnik den künftigen Anforderungen gerecht wird oder ob teure und zeitaufwändige Baumaßnahmen eingeplant werden müssen. Dafür wird ein sehr abstraktes Simulationsmodell eingesetzt, in dem die einzelnen Baugruppen lediglich als Blackbox abgebildet werden. Mit Hilfe dieses Modells können zum Beispiel Kreuzungen oder gemeinsam genutzte Fördertechnikstrecken auf Basis von Prämissen wie Stückzahlmixszenarien und Arbeitszeitmodellen untersucht und bewertet werden. Aber auch bei neuen Karosseriebauanlagen können mit diesem Vorgehen erste Konzepte abgesichert und eine Dimensionierung der übergeordneten Fördertechnik bestätigt werden.

### 2.2.2 Konzeptphase

Durch die Ablaufsimulation wird die Konzeptplanung des Karosseriebaus unterstützt, damit ein gemeinsamer Zielrahmen mit der Planung vereinbart werden kann. Es wird festgelegt, welche Stückzahlen der gesamte Karosseriebau erreichen soll. Dafür werden die Zielausbringung in „Einheiten pro Stunde“ sowie die Taktzeit für jede einzelne Anlage festgelegt. Neben der Produktionsordnung, in welcher der Aufbau des künftigen Rohbaus mit einer oder mehreren Linien und der Belegung dieser Linien mit Derivaten festgelegt wird, sind die Stückzahlverteilung, das Arbeitszeitmodell und der Betriebsnutzungsgrad wichtige Einflussgrößen. Außerdem muss vereinbart werden, inwieweit Ersatzteile oder CKD-Umfänge (Completely Knocked Down: besondere Form der Herstellung, bei dem das Fahrzeug aus vorgefertigten Komponenten zusammengebaut wird) in die Auslegung der Anlagenkapazitäten einfließen sollen. In dieser Phase wird auch untersucht, ob Komponenten selbst hergestellt oder zugekauft werden sollen (Untersuchung der Fertigungstiefe). Dies hat Auswirkungen auf die benötigten Anlagenflächen, aber auch auf die Investitionskosten und die erforderliche Logistik.

Während der Konzeptphase werden ferner Steuerungskonzepte erarbeitet und bewertet sowie erste Aussagen zu Fahrzeugsequenzen gemacht.

### 2.2.3 Vorbereitungsphase

In der Vorbereitungsphase wird im Planungssystem ein detailliertes Mengengerüst als Basis für die Anfrage der Rohbauanlagen bei potenziellen Anlagenlieferanten aufgebaut. Gleichzeitig wird das Anlagenlayout erstellt, damit bewertet werden kann, ob die geplanten Anlagen in die dafür vorgesehenen Hallenbereiche passen. Auf Basis dieses Planungsstandes wird ein detailliertes Simulationsmodell aufgebaut, mit dem die

Ausbringung der einzelnen Anlagen ermittelt wird. Liegt die Ausbringung unter der vereinbarten Zielausbringung, müssen die Planer Maßnahmen ergreifen, um die Ausbringung zu erhöhen. Wenn es Stationen mit schlechter Verfügbarkeit gibt, muss geprüft werden, ob und wie die Arbeitsinhalte dieser Stationen aufgeteilt werden können. Eventuell kann auch der Wechsel von sequenziellen auf wahlfreie Puffer die Ausbringung erhöhen, oder es werden zusätzliche Puffer in die Anlagen eingefügt bzw. Pufferkapazitäten erhöht. Diese Beurteilung kann mit Hilfe des Simulationsmodells vom Simulationsingenieur gemeinsam mit dem Anlagenplaner in iterativen Schritten durchgeführt werden.

Parallel dazu werden Fördertechniklayout und Steuerungskonzepte weiter detailliert festgelegt. Es wird ein erstes Modell des gesamten Rohbaus aufgebaut, mit dem die Ausbringung auf Basis dieses Planungsstandes ermittelt und beurteilt werden kann. Auch hier erarbeitet der Simulationsingenieur gemeinsam mit dem Fördertechnikanlagenplaner Alternativen unter Verwendung des Simulationsmodells mit dem Ziel, möglichst flexible Fördertechnikanlagen passend zu den Anforderungen der Produktion – jedoch unter Einhaltung der Kostenziele – aufzubauen.

## **2.2.4 Abstimmphase**

Während der Abstimmphase muss im Simulationsmodell nachgewiesen werden, dass die Zielausbringung mit dem für die Anfrage erarbeiteten Mengengerüst und mit dem vereinbarten Steuerungskonzept erreicht werden kann. Es wird weiter am Gesamtmodell gearbeitet, Änderungen werden eingepflegt und Prämissen werden vor der Bestellung der Anlagen noch einmal überdacht. Während dieser Phase werden unterschiedliche Stückzahlenszenarien simuliert. Dabei wird oft von einem ‚worst-case‘-Ansatz ausgegangen, d. h., es werden extreme Stückzahlverteilungen (Maximalstückzahlen eines Derivats) angesetzt, und auf dieser Basis wird simuliert, ob die erforderliche Ausbringung auch in diesen Extremfällen erreicht werden kann.

Während dieser Phase wird auch über den Einbau von größeren Entkopplungspuffern entschieden. So kann zum Beispiel ein Schichtentkopplungspuffer dazu genutzt werden, in den unterschiedlichen Aufbaubereichen mit unterschiedlichen Arbeitszeitmodellen fahren zu können. Dies ist ein wesentlicher Beitrag zur Flexibilisierung der Produktion, die an deutschen Standorten unter hohem Kostendruck hinsichtlich eines möglichst effizienten Personaleinsatzes steht.

## **2.2.5 Bestellphase**

Mit der Bewertung der Karosseriebau-Anlagenkonzepte der unterschiedlichen Lieferanten unterstützt die Ablaufsimulation das Projekt in der Bestellphase. Es werden Modelle der Lieferanten überprüft und verglichen, Pufferstrategien beurteilt und die Anlagen hinsichtlich Stabilität und Flexibilität bewertet. Diese Informationen fließen in die Gesamtbewertung der Lieferanten während der Bestellphase ein.

### 2.2.6 Reifephase

In dieser Phase sind die Anlagen bestellt, die Steuerungsstrategien stehen fest und ein detailliertes Gesamtmodell liegt vor. Dieses Modell wird jeweils aktualisiert, wenn sich während Konstruktion und Anlagenaufbau Änderungen ergeben. In dieser Phase werden ggf. Auslaufstrategien für die ‚alten‘ Baureihen simuliert, Fahrweisen gegenübergestellt und die Szenarien bewertet, die während eines Umbaus erforderlich sein können. Wird zum Beispiel ein neuer Typ in Bestandsanlagen integriert, muss genau überdacht werden, wann die Umbaumaßnahmen vorgenommen werden können und wie die erforderliche Stückzahl in der verbleibenden Zeit produziert werden kann.

Anschließend werden der Anlauf des neuen Typs simuliert, weitere Derivate integriert und die jeweiligen Anläufe begleitet. Während dieser Phase ist es von großem Vorteil, wenn die Fördertechnikumbauten bereits abgeschlossen sind, denn dann können die Pufferkapazitäten während der Umbauphasen genutzt werden, um trotz der erforderlichen Baumaßnahmen in den Anlagen eine kontinuierliche Abgabe an die nachfolgenden Gewerke zu gewährleisten.

### 2.2.7 Betriebsphase

Während der Betriebsphase kann ein Simulationsmodell, das dem aktuellen Stand der Anlagen entspricht, genutzt werden, um Steuerstrategien vorab zu testen und in der Simulationsumgebung zu optimieren. Auch energetische Maßnahmen wie z. B. das teilweise Abschalten von Bereichen können simuliert und die entsprechenden Auswirkungen bewertet werden.

Ein wichtiger Aspekt während der Betriebsphase ist die Simulation von notwendigen Umbaumaßnahmen. Diese können bedingt sein durch strukturelle Maßnahmen oder die Vorbereitung der Integration des nächsten Typs.

Durch eine Kopplung des Simulationsmodells mit den operativen Produktionssystemen können diese Aufgaben auch durch aktuelle Anlagendaten unterstützt werden, wodurch ein realitätsnahes Bild der aktuellen Fertigung ermöglicht wird.

---

## 2.3 Beispielprojekt

Für die weiteren Ausführungen soll folgendes Beispielprojekt dienen. Abb. 2.2 zeigt den Ablaufplan eines virtuellen Karosseriebaus, der für 50 Einheiten pro Stunde ausgelegt werden und einen Gesamtnutzungsgrad von 85 % und maximal 5 % Verkettungsverluste aufweisen soll. Die in der Abbildung verwendeten Abkürzungen sind in Tab. 2.1 im Überblick dargestellt.

Dieses Beispielprojekt zeigt einen Karosseriebau, der aus drei Untergruppen (hier: Vorderbau mit drei Anlagen VB01, VB02, VB03, Bodenblech mit zwei Anlagen BB01, BB02 und Hinterbau wiederum mit drei Anlagen HB01, HB02, HB03) eine Bodengruppe erzeugt. Letzteres geschieht in der Anlage BG01. Nach einer Ausschweißstation (BG02) folgen parallele Bolzenanlagen (BG03).



**Tab. 2.1** Im Karosseriebau verwendete Abkürzungen

Var: Varianten	HB: Hinterbau	BB: Bodenblech	VB: Vorderbau
BG: Bodengruppe	KG: Karosseriegerippe	SRI: Seitenrahmen Innen	SRA: Seitenrahmen Außen
FIFO: First In First Out	Sort.: Sortenrein	SEQ: Sequentielles Fahren	FI: Finishband
KG xx A: KG Ausschweißen	St: Anzahl Stationen	Tk: Taktzeit	Vt: technische Verfügbarkeit

Im Anschluss wird der Aufbau mit zwei Seitenrahmen in den Stationen KG01 und KG02 ergänzt. Die Seitenrahmen selbst werden in den Stationen „Seitenrahmen Innen, SRI“ und „Seitenrahmen Außen, SRA“ zusammengesetzt. Die Stationen KG01 A und KG02 A sind wiederum reine Ausschweißstationen.

Zum Schluss folgt das Finishband. Da dort meist manuell gearbeitet wird und sich dahinter oft ein großer Speicher zur Sortierung der Farbpulks für die Lackiererei befindet, wird auf diese Anlage nicht im Detail eingegangen.

Die Speichergößen sind hier nur als Platzhalter eingetragen. Sie werden im Anschluss durch die Simulation ermittelt. Hierbei ist auch definiert, ob es sich über einen reinen Durchlaufspeicher (FIFO) handelt, einen Speicher, der in sequenzieller Reihenfolge gefahren wird (SEQ) oder aber einen Sortierspeicher (Sort.).

### 2.3.1 Eingangsdaten

Als Eingangsdaten werden folgende Angaben benötigt:

- Ein Anlagenlayout oder eine Konzeptzeichnung der Anlagen. Aus diesen geht hervor, wie die Anlagen konzipiert sind und wie sie in der Fabrikhalle stehen.
- Ein Fördertechniklayout oder ein Grobkonzept der Fördertechnik, um die Zusammenhänge der Anlagen zu zeigen oder z. B. bauliche Abhängigkeiten wie zusätzliche Wege bei Überbrückung von Hallen oder Wegen innerhalb der Fabrikhalle darzustellen.
- Die detaillierte Anlagenplanung. Diese enthält im Prinzip die Ergebnisse der Detailsimulation der Karosseriebau-Anlagen wie z. B. die Taktzeit (Planwert oder Ergebnis vorheriger Simulationen), die Detailstruktur der Anlage, den Verfügbarkeitsreport inklusive MTTR (Mean Time To Repair; mittlere Reparaturzeit) und MTBF (Mean Time Between Failure; mittlere Zeit zwischen zwei Störungen) sowie eventuell Angaben zu den Formfaktoren für beide Werte, falls mathematische Verteilungen wie die Erlang-Verteilung verwendet werden.
- Eine Prämissensammlung. Diese besteht z. B. aus den Planstückzahlen oder Stückzahl-szenarien, Arbeitszeitinformatoren, der Planauslegung, den geplanten Varianten inklusive der Orte, an denen die Varianten im Fertigungsfluss entstehen, bereits bekannten Integrations-szenarien, etc.

- Ein grober Entwurf des geplanten Steuerungskonzeptes.
- Restriktionen der Entkopplungen, z. B. Integration der Puffer in die Anlagen, bauliche Restriktionen, etc.

Idealerweise werden die Eingangsdaten bereits digital bereitgestellt und sind vom Simulationswerkzeug direkt einlesbar.

Für eine direkte Übernahme von Eingangsdaten aus Planungssystemen seien hier zwei Beispiele genannt:

Die VDA (Verband der Automobilindustrie e.V.) Arbeitsgruppe Ablaufsimulation hat eine Schnittstelle zwischen Planungssystemen, z. B. dem Process Designer (Siemens PLM) oder dem Process Engineer (Dassault Systèmes), und der Ablaufsimulation erstellt. Dabei erfolgt der Datenaustausch über die sogenannte Verfügbarkeitsdatenbank, kurz VDB. Diese Schnittstelle übernimmt die Mengengerüste aus den Planungssystemen und reichert sie um Komponenten-Verfügbarkeitsdaten an, bevor die Struktur und die Parameter in das Simulationsmodell übernommen werden können.

Ein zweites Beispiel für die Übernahme von Eingangsdaten ist die Möglichkeit, aus vorhandenen Fördertechniklayouts Simulationsmodelle zu erstellen. Auch hier gibt es im VDA eine Lösung, die aus einem CAD (Computer Aided Design) System die Parameter und Strukturen der Fördertechnikplanung ausliest und mit dem Ergebnis Simulationsobjekte erzeugt, parametriert und verknüpft.

### 2.3.2 Datenaufbereitung und -analyse

Sind die Eingangsdaten gesammelt, ist der nächste Schritt, diese zu verifizieren und zu validieren. Hierzu existieren viele Möglichkeiten (vgl. Rabe et al. 2008).

Als Beispiel soll hier die Berechnung der theoretischen Ausbringung dienen. In unserem Projekt gehen wir von einer Zielausbringung von 50 Einheiten pro Stunde aus. Die Anlage VB01 weist folgende Kennwerte auf: Taktzeit 60 Sekunden, Verfügbarkeit 89,3 %. Wird jetzt nach der Formel

$$Ausbringung = \frac{1\text{Stunde}}{Taktzeit} * Verfüegbarkeit \quad (2.1)$$

die zu erwartende Ausbringung der Anlage VB01 ermittelt, so ergibt sich für die Anlage eine theoretische Ausbringung von 53,58 Einheiten pro Stunde.

Dieser Vorgang kann für alle Anlagen durchgeführt werden. Liegt einer der errechneten Werte unter der geforderten Zielausbringung von 50 Einheiten pro Stunde, so kann diese auch durch eine unendliche Anzahl an Pufferplätzen nicht mehr erreicht werden. Auch wenn die theoretische Ausbringung nur wenig größer als die Zielausbringung ist, werden viele Pufferplätze benötigt, um das Ziel zu erreichen. In solchen Fällen sollte vor Beginn der Simulation zunächst mit dem Anlagenplaner über Möglichkeiten zur Veränderung von Taktzeit oder Verfügbarkeit gesprochen werden.

Anlage	Stationen	Taktzeit [s]	Verfügbarkeit	theor. Ausbringung
VB01	1	60	89,3%	53,58
VB02	1	61,2	90,1%	53,00
VB03	1	60,8	92,1%	54,53
BB01	1	60,7	91,1%	54,03
BB02	1	60,3	90,2%	53,85
HB01	1	60,3	89,2%	53,25
HB02	1	60,7	91,2%	54,09
HB03	1	60,2	89,7%	53,64
BG01	1	59,5	89,2%	53,97
BG02	1	60	89,9%	53,94
BG03 1/2	2	122	91,3%	53,88
SRI01	1	60,5	89,8%	53,43
SRI02	1	61,1	90,3%	53,20
SRA01	1	60,2	90,3%	54,00
SRA02	1	61,2	89,9%	52,88
KG01	1	58	88,7%	55,06
KG01 A	1	61	91,7%	54,12
KG02	1	58	88,8%	55,12
KG02 A	1	61	90,1%	53,17
FI	1	65,5	98,4%	54,08

**Abb. 2.3** Berechnung der theoretischen Ausbringung

Die Anlage mit der geringsten theoretischen Ausbringung ist auch fast immer der Flaschenhals einer Karosseriebauplanung. Im gezeigten Beispiel in Abb. 2.3 wäre dieser Flaschenhals also die Anlage Seitenrahmen Außen 02 (SRA02).

Weitere Möglichkeiten der Datenanalyse und Datenvalidierung sind:

- Berechnung der Pufferplätze und Ausbringung über mathematische Warteschlangenansätze.
- Kombination aus Grenzwert- und Festwerttest, d. h. alle Verfügbarkeiten werden auf 100 % gesetzt und es wird dann geprüft, ob die erwartete Stückzahl erreicht wird.
- Test mit unendlichen großen Puffern: Die Entkopplungspuffer werden auf eine beliebige große Zahl gesetzt (mit null Sekunden Durchlaufzeit) und die Ausbringung sowie die Entwicklung der Pufferfüllstände wird überprüft.

### 2.3.3 Simulation

Bei der Modellierung von Simulationsmodellen im Bereich Karosseriebau kommt in den meisten Fällen nur eine geringe Anzahl von verschiedenen Bausteinen zum Einsatz. Häufig unterscheiden sich die Bereiche nur durch die verwendeten Kennzahlen (Taktzeiten

und Verfügbarkeiten), Kapazitäten und das gefertigte Bauteil. Es ist somit sinnvoll, sich eine Sammlung von Grundbausteinen zu erstellen oder auf eine bereits vorhandene Bibliothek zurückzugreifen.

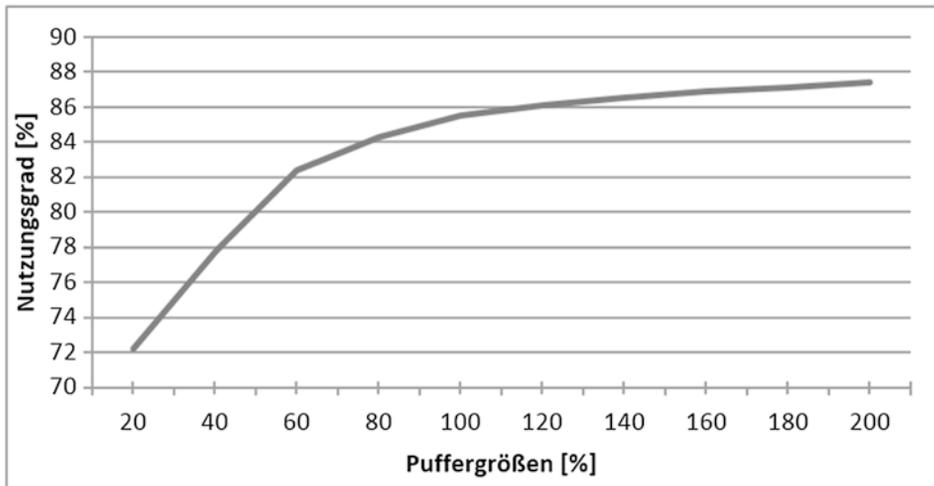
Die Objekte eines Simulationsmodells für Karosseriebauteile lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- **Fertigung:**  
Alle Bereiche in denen der eigentliche Fertigungsprozess stattfindet gehören zu dieser Gruppe. Dies können einzelne Bearbeitungsstationen, Schutzkreise oder ganze Bereiche sein, in denen die Wertschöpfung stattfindet. Der Abstraktionsgrad richtet sich nach der Aufgabenstellung und den zur Verfügung stehenden Eingangsdaten.
- **Fördertechnik:**  
Die Verbindung der Fertigungsbereiche wird über Fördertechnikobjekte hergestellt. Sie bestimmen den möglichen Fluss der Bauteile durch das System. Förder- und Pufferstrecken gehören ebenso zu dieser Gruppe wie Elektrohängebahn-Kreisläufe oder Flurtransportsysteme. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal für die Fördertechnikobjekte ist die Platz- bzw. Längenorientierung. Platzorientierte Objekte erfordern weniger Rechenleistung und Modelle lassen sich damit schneller aufbauen, während längenorientierte Objekte die Realität genauer abbilden.
- **Steuerung:**  
Diese „nicht physischen“ Objekte können zahlreiche Aufgaben haben. Beispiele sind die Erzeugung von Bauteilvarianten in einer Quelle, die Steuerung von Pufferbeständen über Kanban oder die Aufteilung des Materialflusses an Entscheidungsstellen innerhalb von Fördertechnikelementen.
- **Datenverwaltung:**  
Sowohl die Eingangsdaten, als auch die Ergebnisdaten müssen im Simulationsmodell gespeichert werden. Dafür bietet sich eine zentrale Struktur an, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen.

Beim Aufbau eines Simulationsmodells sollte im Vorfeld eine Einteilung in verschiedene Abschnitte festgelegt werden. Bei größeren Anlagen ergeben sich die Abschnitte in der Regel automatisch durch die einzelnen Fertigungsschritte.

Wichtig ist es, den Bezug zur Planung bzw. Realität möglichst klar dazustellen. Einheitliche Namen, Symbole und die Verwendung von 2D-Layouts im Simulationsmodell erleichtern es später vor allem Dritten, sich im Modell zu Recht zu finden.

Nach der Validierung des Gesamtmodells können die Experimente durchgeführt werden. In diesem Beispiel geht es hauptsächlich um die Dimensionierung der Puffer zwischen den einzelnen Bereichen. In einem iterativen Prozess können möglichst günstige Puffergrößen ermittelt werden. Viele Simulationsprogramme bieten hierzu hilfreiche Tools an, aber auch das manuelle Anpassen der Puffer führt meistens schnell zum Ziel. Die äußeren Vorgaben sind dabei immer zu beachten. In heutigen Produktionsanlagen ist die benötigte Fläche ein wichtiger Faktor, der die Puffergröße häufig limitiert.



**Abb. 2.4** Diagramm Nutzungsgrad in Abhängigkeit von der Puffergröße

Der Prozess der Optimierung lässt sich bei überschaubaren Modellen auch gut innerhalb eines Workshops mit mehreren Teilnehmern durchführen. Unnötige Schleifen innerhalb eines Simulationsprojektes können dadurch vermieden und es kann somit schneller die bestmögliche Lösung für alle gefunden werden.

Bei der Entscheidung über die Effektivität von zusätzlichen Pufferplätzen kann ein Diagramm von Nutzen sein (vgl. Abb. 2.4). Theoretisch lässt sich der Nutzungsgrad durch weitere Pufferplätze immer weiter erhöhen, in der Realität wird es aber eine wirtschaftlich sinnvolle maximale Puffergröße geben.

## 2.4 Ausblick

Der Karosseriebau ist ein klassischer Anwendungsfall für die Ablaufsimulation. Diverse Anforderungen beleben seit Jahrzehnten die Aktivitäten. Dies wird sich auch in Zukunft nicht ändern, da Karosseriebauten durch den hohen Grad der Automatisierung streng abhängig von der Auslegung der Entkopplung zwischen den Anlagen und Bereichen bleiben werden.

Der Detaillierungsgrad der Abbildung innerhalb eines Simulationsmodells wird weiterhin steigen. Dies ist bedingt durch die höheren Anforderungen an Flexibilität innerhalb der Fertigung und der Notwendigkeit von Integrationen in vorhandene Fertigungen und Gebäude.

Eine Vereinfachung des Simulationsprozesses kann sicherlich durch die Anstrengungen des Zukunftsprojektes Industrie 4.0 erfolgen. Durchgängige Daten sind auch eine Grundvoraussetzung für die Ablaufsimulation. Wenn diese Daten dann auch in elektronisch abfragbaren Quellen vorliegen, ist eine Übernahme in die Ablaufsimulation ein Leichtes. Auch die

Bestrebungen, mit großen Datenmengen umzugehen bzw. diese einfach auswerten zu können (diskutiert unter dem Stichwort „Big Data“), werden die Ablaufsimulation beeinflussen und möglicherweise vereinfachen.

---

## Literatur

Mayer G, Spieckermann S (2008) Lebenszyklus von Simulationsmodellen: Anforderungen und Fallbeispiele aus der Automobilindustrie. In: Rabe M (Hrsg) *Advances in simulation for production and logistics applications*. Fraunhofer IRB, Stuttgart, S 61–69

Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S (2008) *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Springer, Berlin



**Claudia Wick** Studium der Betriebswirtschaftslehre mit Fachrichtung Datenverarbeitung im dualen System der Berufsakademie bei Daimler in Stuttgart. Danach tätig am Standort Sindelfingen in der Anwenderbetreuung für individuelle Datenverarbeitung mit dem Schwerpunkt Reportgeneratoren und Auswertungen. Ab 1995 verantwortlich für die Realisierung von Systemen im kaufmännischen Bereich; 2001 Aufbau einer weltweit eingesetzten Anwendung für Presse- und Pressenanlagenplanung. Seit 2009 im Bereich Digitale Fabrik verantwortlich für die Themen Rohbauplanung und Materialflusssimulation.



**Michael Lüdemann** Nach Abschluss des Diplomstudiums im Bereich Konstruktionsmanagement an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Wechsel zur Icarus Consulting GmbH, dort tätig in den Bereichen Konstruktion, Offline Programmierung und schließlich im Bereich Ablaufsimulation. Leitung zahlreicher Projekte für große deutsche OEMs. Seit 2009 verantwortlich für den Bereich Ablaufsimulation bei der Icarus Consulting GmbH.



**Gottfried Mayer** Seit 1990 Mitarbeiter der BMW AG. Nach einer Ausbildung zum Industrieelektroniker Fachbereich Produktionstechnik folgte die Instandhaltung im Karosseriebau. Von 1994–1997 nebenberufliche Ausbildung zum Techniker der Elektronik mit Fachbereich Datenverarbeitungstechnik. 1996 Wechsel zur übergeordneten Steuerungstechnik mit Schwerpunkt BDE-Systeme. Seit 1999 im Bereich der Ablaufsimulation, zuerst Karosseriebau Werk München, danach Karosseriebauten weltweit bis hin zur Verantwortung über alle Gewerke. Seit 2011 in der BMW Group IT verantwortlich für die Themenfelder Simulation, virtuelle Produktion und Digitale Fabrik. Seit 2018 IT Projektleiter Additive Manufacturing.



# Ablaufsimulation von Karosseriebauanlagen

# 3

Claudia Wick, Karina Schäfer, Volker Habicht  
und Gottfried Mayer

## 3.1 Einleitung

Der Karosseriebau, als Gewerk zwischen Presswerk und Lackiererei angesiedelt, ist geprägt von hoher Automatisierung. Dieser Umstand resultiert aus vielen wiederholbaren Aufgaben mit den unterschiedlichsten Fügeverfahren, z. B. diverse Schweißverfahren, Nieten, Clinchen, Kleben, etc.

Die Aufgabe einer Karosseriebauanlage besteht im Zusammenbau der Karosserieteile, die von Kleinteilen wie Bolzen oder Muttern bis hin zu Großteilen, wie z. B. einer Außenhaut für eine Frontklappe variieren können. Die Hauptprozesse werden meist durch Industrieroboter inklusive der passenden Ausrüstung, wie beispielsweise Schweißzangen oder Klebevorrichtungen, durchgeführt. Nur noch selten findet man unflexible oder wenig flexible Spezialvorrichtungen beziehungsweise manuelle Fertigung bei sehr hohen Taktzeiten und niedriger Stückzahl.

Dieser Artikel befasst sich mit der Ablaufsimulation eines typischen Bereichs im Karosseriebau mit der Verkettung von einzelnen Roboterzellen und -stationen. Im Gegensatz zur Robotersimulation ist es nicht das Ziel, die Programme der Roboter oder die Erreichbarkeit der Teile abzusichern, sondern die grundlegende Funktion der Karosseriebauanlage

---

C. Wick  
Daimler AG, Sindelfingen, Deutschland

K. Schäfer · V. Habicht  
EDAG AG, Fulda, Deutschland

G. Mayer (✉)  
BMW AG, München, Deutschland  
E-Mail: [gottfried.mayer@bmw.de](mailto:gottfried.mayer@bmw.de)

im Hinblick auf Ausbringung, Taktzeiten und Bauteilreihenfolge sicherzustellen. Die Vorgehensweise selbst ist nicht auf Roboteranlagen beschränkt, sie ist auf beliebige, hochautomatisierte Anlagen übertragbar.

Karosseriebauanlagen sind üblicherweise in Schutzkreise (Safety Areas) unterteilt. Ein solcher Bereich ist immer von einer Schutzvorrichtung, wie z. B. einem Schutzzaun, umgeben. Innerhalb des Schutzkreises ist die komplette Ausrüstung logisch gekoppelt, d. h. ist eine Komponente gestört, steht der komplette Schutzkreis still, angrenzende Schutzkreise können allerdings weiterarbeiten. Dies ist nötig, um Zutrittsmöglichkeiten für das Instandhaltungspersonal im Störfall zu schaffen.

Eine Aufgabe der Ablaufsimulation ist es, die nötige Entkopplung zwischen den Schutzkreisen zu dimensionieren. Werden die Bereiche ohne dazwischen liegende Puffer gekoppelt, so multiplizieren sich die Verfügbarkeiten annähernd, so dass die Produktion innerhalb eines kompletten Karosseriebaus einen sehr niedrigen Nutzungsgrad hätte. Ein wichtiger Punkt ist hier, dass die benötigten Entkopplungen nicht den anliegenden Schutzkreisen logisch zugeordnet werden dürfen, da sie sonst im Störfall nutzlos wären.

Da derzeit die Kooperation von Robotern und Menschen noch in der Pilotphase ist, ist es von Nöten, eine physische Grenze zwischen beiden zu schaffen. Die dazu geschaffenen Einlegebereiche von Bauteilen zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine mechanische Grenze zwischen dem automatisierten Anlagenbereich und dem Bereich der Werker schaffen. Muss ein Mitarbeiter Teile in die Anlage einlegen, so geschieht das meist über einen speziell gesicherten Bereich, den der Roboter erst nach Verlassen des Werkers wieder befahren darf.

Eine wichtige Eingangsgröße ist der Zeitpunkt der Fertigung, der simuliert werden soll. Es wird meist der eingeschwungene Normalbetrieb simuliert. Eine Aussage zum Anlaufverhalten wäre zwar nützlich, ist aber meist nur schwierig zu treffen, da sich während des Anlaufs Verfügbarkeiten und Taktzeiten täglich ändern können und auch gewöhnlich starken Schwankungen unterliegen. Ähnlich verhält es sich mit einer Integration von neuen Typen in die Fertigungslinie, da hier, wenn für die neuen Typen zusätzliche Ausrüstung in die Anlage eingebracht wird, die gleichen Bedingungen wie beim Neuanlauf gelten.

In diesem Kapitel werden zuerst die für die Simulation von Karosseriebauanlagen relevanten Grundbegriffe der Ablaufsimulation erklärt sowie die wesentlichen Einflussfaktoren vorgestellt. Anhand eines Praxisbeispiels wird gezeigt, wie auf Basis einer Anlagenplanung in einem 3D-Planungssystem die Taktzeiten und Verfügbarkeiten der Stationen berechnet werden. Auf dieser Grundlage wird ein abstraktes Modell im Simulationswerkzeug Plant Simulation aufgebaut. Nach einem kurzen Einblick in die automatisierte Modellgenerierung werden anschließend wichtige Themen, wie die Aufteilung von Schutzbereichen und die Abbildung von variantenabhängigen Fertigungsanlagen, erläutert. In einem Beispiel für Produktions- bzw. Materialflussteuerungen wird der Einsatz von Sequenzsteuerungen illustriert, das Kanban-System vorgestellt und der Einsatz von Sortierpuffern und deren Auswirkung auf Sequenz und Reihenfolgegüte erklärt.

## 3.2 Überblick über Grunddaten und Annahmen

### 3.2.1 Grundbegriffe

Folgende Begriffe sind wichtig für die Ablaufsimulation von Karosseriebauanlagen:

- Verfügbarkeit: die Wahrscheinlichkeit, dass das System oder die Anlage ohne Störungen läuft
- MTTR (Mean Time to Repair oder Mean Time to Recover): mittlere Ausfallzeit = Zeit vom Beginn eines Ausfalls bis Ende eines Ausfalls {= Reaktionszeit + Instandsetzung + (Wieder-)Inbetriebnahme}
- MTBF (Mean Time between Failure): mittlere Produktionszeit (abhängig von der Auswahl des Störbezugs des Simulationssystems) zwischen zwei Ausfällen = Zeit vom Ende eines Ausfalls bis Beginn des nächsten Ausfalls
- Störverteilung: statistische Verteilung zum Abbilden des typischen Verhaltens (Häufigkeitsverteilungen und Histogramme für Ausfall- und Betriebszeiten sind z. B. Erlang-Verteilung, negative Exponentialverteilung oder ggf. empirische Verteilungen)

### 3.2.2 Grundlegende Herausforderung im Karosseriebau

Hohe Automatisierung bringt nicht nur Vorteile: Je mehr Ausrüstung sich in einer Zelle befindet, desto geringer wird die Verfügbarkeit der Zelle. Dies resultiert aus der Tatsache, dass sich die Verfügbarkeits-Einzelwerte der einzelnen Ausrüstungsgegenstände annähernd multiplizieren. Somit ist es eine bedeutende Aufgabe der Ablaufsimulation bzw. der Planung (je nach Verteilung der Verantwortlichkeit), die Schutzkreise zu dimensionieren und festzulegen.

Die Verfügbarkeit eines Schutzkreises ist aber nicht allein abhängig von der eingesetzten Ausrüstung. Eine entscheidende Rolle spielt hier die Instandhaltung. Ist das Personal nicht bestmöglich auf die Ausrüstung geschult, so dauert die Beseitigung von Störungen länger, wodurch die MTTR steigt und die Verfügbarkeit sinkt. Auch das Konzept der Instandhaltung (zentral oder dezentral) oder die Anzahl der Instandhalter hat Auswirkungen auf die Wegezeiten bzw. Einsatzmöglichkeiten und somit auch auf die Störbehebungszeit. Als letztes Beispiel ist hier noch die vorbeugende Instandhaltung zu nennen, die nicht auf die Stördauer, sondern auf die zu erwartende Störhäufigkeit wirkt und somit Einfluss auf die Verfügbarkeiten hat.

Nicht selten beeinflussen auch zyklische Rüstvorgänge oder geplante Stillstände den Ablauf in einer Karosseriebauanlage. Als Beispiel kann hier das zyklische Fräsen der Schweißkappen zur Verlängerung der Standzeit und Sicherstellung der Qualität des Schweißvorgangs oder das Wechseln der Kappen nach einer definierten Anzahl an Schweißvorgängen genannt werden. Diese Zyklen haben zwar keinen Einfluss auf das Störverhalten, aber auf die mögliche Nutzungszeit der Anlage und müssen aus diesem Grund auch im Simulationsmodell abgebildet werden.

### 3.2.3 Wege zu Komponenten Kennzahlen

Da die Planung von Karosseriebauanlagen auf Mengengerüsten von Anlagenkomponenten und Auslegung bzw. Abgrenzung der Schutzkreise basiert, ist es unabdingbar, für die einzusetzenden Komponenten belastbare, konsistente Kennzahlen als Grundlage zur Verfügung zu haben. Diese Kennzahlenlisten sind von den in Abschn. 3.2.2 genannten Faktoren abhängig und können selten direkt vom Komponentenhersteller übernommen werden.

Eine verbreitete Methode zum Erhalt von Komponenten Kennzahlen ist die Auswertung der Daten in den BDE-Systemen (Betriebsdatenerfassungs-Systemen). In diesen Systemen werden alle Stördaten in einer Datenquelle gesammelt, um anschließend visualisiert und ausgewertet zu werden.

Voraussetzung für die Ableitung von Kennzahlen ist die Erfassung der Störmeldungen auf Basis der Komponenten selbst. Werden diese nur übergeordnet z. B. auf Schutzkreis-Ebene gemeldet, ist eine Zuweisung der Störmeldung zu einzelnen Komponenten meist sehr aufwändig.

Eine weitere signifikante Voraussetzung ist eine hinreichend lange Dauer der Datenerhaltung. Meist werden die Daten nicht lange genug gespeichert, um statistisch belastbare Kennzahlen abzuleiten. Hier ist es von Nöten, die Daten vor dem Löschen aus dem Quellsystem zu sichern, um den benötigten Auswertungszeitraum abdecken zu können.

Sind diese Voraussetzungen gegeben, ist es möglich, nach genauer Validierung der Daten, die Kennwerte Verfügbarkeit, MTTR und MTBF zu berechnen. Bei der Prüfung der Daten ist auch darauf zu achten, dass die bewertete Komponente in einer normalen Nutzung im eingeschwungenen Zustand war. Sind die Messungen z. B. während des Anlaufes oder des Auslaufes erhoben worden, sind die Kennzahlen für die Simulation und Auslegung des eingespielten Normalbetriebs meist nicht belastbar (vgl. Rabe et al. 2008).

Eine solche Auswertung umfasst aber nur Komponenten, die bereits in aktuellen Anlagen verbaut sind. Bei neuen Komponenten wird in der Regel mit einer Verfügbarkeit – abgeleitet von einer ähnlichen Komponente – als Planwert gearbeitet.

### 3.2.4 Abbildung von Menschen

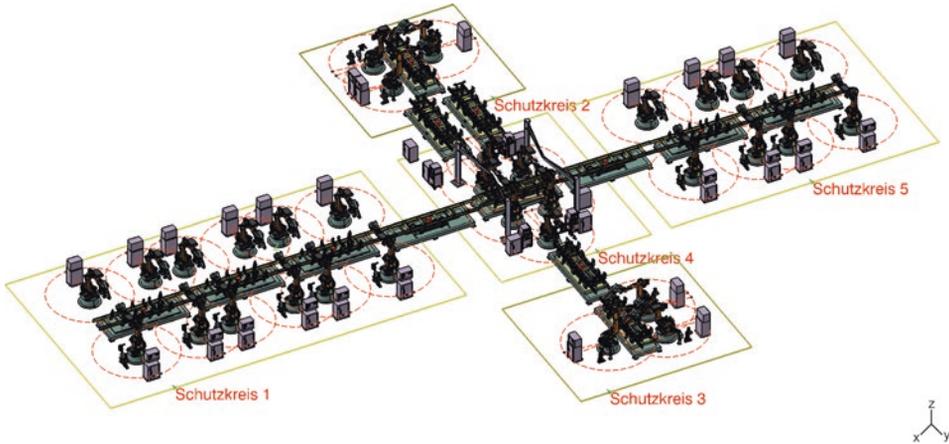
Da sich die Tätigkeit von Werkern in hochautomatisierten Karosseriebauten meist auf das Einlegen von Teilen beschränkt, ist es oft ausreichend, die menschlichen Einflüsse ebenfalls analog der Komponentenverfügbarkeit abzubilden. Ist eine genauere Aussage nötig, wird der Werker als eigene Simulationskomponente im Simulationsmodell abgebildet.

---

## 3.3 Praxisbeispiel Karosseriebausimulation

Um das Vorgehen der Ablaufsimulation einer Karosseriebauanlage genauer erläutern zu können, wird hier ein neutrales Beispiel einer Karosseriebauanlage als roter Faden verwendet.

Die Beispielanlage (Abb. 3.1) besteht aus fünf Schutzkreisen, die jeweils durch eine Entkopplung voneinander getrennt sind. In Schutzkreis 1 stehen reine Roboter-Punktschweißapplikationen. Schutzkreis 2 und 3 sind Untergruppenfertigungen mit Punktschweiß-



**Abb. 3.1** Beispielanlage Karosseriebau

applikationen und Teilehandhabung durch Roboter (Roboterhandling). Über sortenreine Puffer werden vormontierte Teile an die Zusammenbaustation mit Roboter-Bolzenschweißapplikationen in Schutzkreis 4 geliefert. In Schutzkreis 5 befinden sich wieder Roboter-Punktschweißapplikationen. Alle Stationen sind durch bodenstehende Skid-Fördertechnik miteinander verbunden.

Die Auslegung dieser Anlage soll unter folgenden Annahmen erfolgen: Ziel-Verfügbarkeit der Anlage soll 90 % sein, der Gesamtnutzungsgrad soll 85 % betragen.

### 3.3.1 Datenaufbereitung und Modellerstellung

Für die Durchführung einer Ablaufsimulation wird neben dem Mengengerüst und einem Anlagenlayout eine Ablaufbeschreibung inklusive einer Prozessabtaktung als Eingangsdaten benötigt. Das Simulationslayout wird vom Simulationsingenieur aus diesen Eingangsgrößen erstellt. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass Haupt- und Nebenflüsse innerhalb eines Anlagenbereichs unterschieden werden.

#### 3.3.1.1 Statische Verfügbarkeitsberechnung

Mit Hilfe einer Verfügbarkeitstabelle wird die statische Verfügbarkeit für jede Station berechnet. Dabei wird die Anzahl der verwendeten Komponenten ermittelt und die Komponentenverfügbarkeit mit dieser Anzahl potenziert, d. h., ist eine Komponente dreimal verbaut, so ist die Gesamtverfügbarkeit dieser Komponententart die Komponentenverfügbarkeit potenziert mit drei. Danach wird die Stationsverfügbarkeit durch Multiplikation aller Komponentenverfügbarkeiten der Station errechnet. Werden mehrere Typen in einer Station produziert, kann eine typenspezifische Verfügbarkeit in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Daten errechnet werden. Jeder Werkzeugwechsel innerhalb eines Taktes (z. B. Wechsel von Greifern oder Zangen) kann dabei gewichtet werden (Abb. 3.2).

Verfügbarkeitsreport				
ID	Benennung	Verfügbarkeit	Anzahl	Gesamtverfügbarkeit
	<b>Schutzbereich_1</b>			0,92757
	<b>Station_1</b>			0,97525
1	Geo-Spannvorrichtung	1		1,00000
2	Punktschweißen rob.	0,995	4	0,98015
3	Rollenbahn mit Hub	0,995	1	0,99500
	<b>Station_2</b>			0,97525
1	Geo-Spannvorrichtung	1		1,00000
2	Punktschweißen rob.	0,995	4	0,98015
3	Rollenbahn mit Hub	0,995	1	0,99500
	<b>Station_3</b>			0,97525
1	Geo-Spannvorrichtung	1		1,00000
2	Punktschweißen rob.	0,995	4	0,98015
3	Rollenbahn mit Hub	0,995	1	0,99500
	<b>Puffer 1</b>			0,99500
3	Rollenbahn mit Hub	0,995	1	0,99500
	<b>Schutzbereich_2</b>			
	<b>Station_4</b>			0,96552
3	Rollenbahn mit Hub	0,995	3	0,98507
2	Punktschweißen rob.	0,995	3	0,98507
4	Roboterhandlung	0,995	1	0,99500

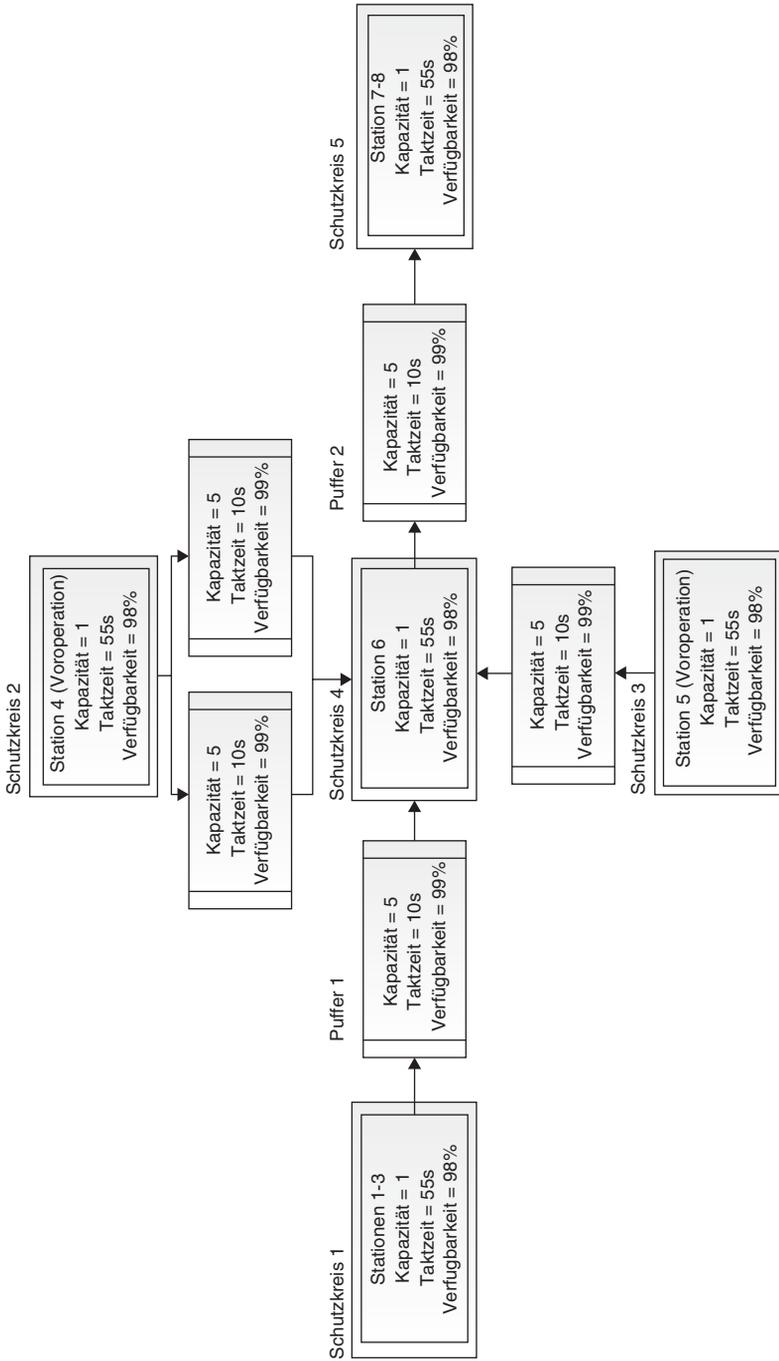
**Abb. 3.2** Verfügbarkeitstabelle auf Basis des vorherigen Beispiels

Auf Basis der beschriebenen, errechneten Verfügbarkeiten, der Ablaufbeschreibung und des Simulationslayouts wird ein abstraktes Simulationsmodell erstellt, in dem jede Station und jeder Puffer sowie der Materialfluss abgebildet werden.

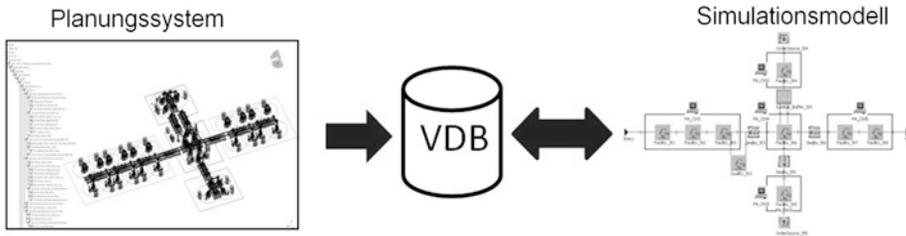
### 3.3.1.2 Modelldetaillierung

Die Detaillierung des Simulationsmodells erfolgt in diesem Beispiel auf Taktebene. Dabei wird für jeden Takt und für jeden Puffer ein Baustein im Modell verwendet. Die abgebildeten Takte werden anschließend den jeweiligen Schutzbereichen zugeordnet.

Jeder Takt wird mit den Attributen Taktzeit und Verfügbarkeit auf Basis der statischen Verfügbarkeitsberechnungen versehen. Die Kapazität in jedem abgebildeten Takt ist dabei gleich eins. Jeder Puffer wird mit einer Kapazität (maximal mögliche Anzahl Bauteile im Puffer), einer Durchlaufzeit und einem Verfügbarkeitswert – abhängig von der Art des Puffers – belegt (Abb. 3.3).



**Abb. 3.3** Übersicht Schutzkreise und Takte als Blocklayout



**Abb. 3.4** Planungssystem – VDB – Plant Simulation

Wenn das Simulationsmodell aufgebaut, verifiziert und validiert ist, kann mit der Durchführung der Simulationsexperimente begonnen werden. Ändern sich der Ablauf, die Steuerungslogik oder einzelne Attribute, müssen erneut Simulationsexperimente durchgeführt werden. Dabei können Attribute in der Regel einfach geändert und variiert werden, der Aufwand für Änderungen der Modellstruktur ist in der Regel höher.

### 3.3.1.3 Automatisierte Modellgenerierung

Im Rahmen der VDA (Verband der Automobilindustrie e. V.) Arbeitsgruppe Ablaufsimulation wurde mit der VDB (Verfügbarkeitsdatenbank) ein System zur (teil-)automatisierten Erstellung von Simulationsmodellen erarbeitet. Dabei kann eine XML-Datei (eXtensible Markup Language-Datei) direkt aus einem Karosseriebau-Planungssystem erzeugt werden. In die Datei werden die Strukturen, Stationsbezeichnungen und Attribute, wie z. B. Verfügbarkeiten, MTTR und Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen, ausgegeben. In einem zweiten Schritt wird diese Datei in die VDB importiert. Dort kann eine Überarbeitung der Verfügbarkeiten erfolgen und aus den Daten kann ein Plant Simulation Simulationsmodell automatisch erstellt werden (Abb. 3.4).

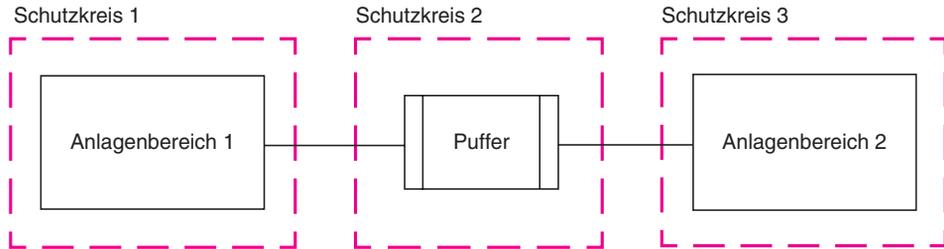
Überarbeitungen im Simulationsmodell können anschließend wieder mit der VDB synchronisiert werden. Die VDB bietet weitere Funktionalitäten, wie z. B. den Vergleich von Modellständen oder ein Reporting der Verfügbarkeiten.

### 3.3.1.4 Aufteilung von Schutzkreisen

Wie einleitend erwähnt, gehören Puffer sowie die davorliegenden und nachfolgenden Anlagenbereiche jeweils in separate Schutzkreise. Wenn alle Teilbereiche in separaten Schutzkreisen liegen, wird der Puffer beim Ausfall eines Anlagenbereichs dafür sorgen, dass der jeweils andere Anlagenbereich weiter produzieren kann. Der Puffer entkoppelt die verbundenen Anlagenbereiche, reduziert die Verkettungsverluste und wirkt somit ausbringungssteigernd (Abb. 3.5).

Für die Aufteilung von Schutzkreisen gelten folgende Regeln:

- Liegt der Puffer im gleichen Schutzbereich wie der vorhergehende Anlagenbereich, kann der Puffer während einer Störung in diesem Anlagenbereich keine Teile an den folgenden Anlagenbereich abgeben. Ist der folgende Anlagenbereich gestört, kann der Puffer einmalig aufgefüllt werden. Dieser Bestand kann im Fall einer Störung im ersten



**Abb. 3.5** Schutzkreis – Puffer

Anlagenbereich nicht abgegeben werden, da der Puffer dadurch, dass er im gleichen Schutzbereich wie die Anlage steht, immer mit angehalten wird.

- Liegt der Puffer im gleichen Schutzbereich wie die nachfolgende Anlage, kann der Puffer während einer Störung in Anlagenbereich 2 keine Teile von Anlagenbereich 1 aufnehmen. Der Puffer wird somit bei gleichen Taktzeiten in den beiden Anlagenbereichen nie vollständig aufgefüllt.
- Liegen die Anlagenbereiche im gleichen und der Puffer in einem anderen Schutzkreis, dann kann der Puffer während einer Störung weder Teile aufnehmen, noch abgeben. Der Puffer wirkt somit nicht leistungssteigernd.

In einem Gesamtsystem mit einer größeren Anzahl an Anlagen können sich durch vor- und nachgelagerte Anlagenbereiche weitere Effekte ergeben. So kann zum Beispiel ein Anlagenbereich wie ein Puffer (mit ggf. geringerer Verfügbarkeit) wirken, wenn Störungen im Gesamtsystem vorliegen.

Für Anlagenbereiche zwischen zwei Puffern wird in diesem Beispiel von einer statischen Verfügbarkeit von mindestens 90 % ausgegangen. Eine Reduzierung der Verfügbarkeit bedeutet höheres Störaufkommen und muss durch größere Puffer oder eine schnellere Taktzeit ausgeglichen werden, um Ausbringungsverluste zu vermeiden und den angestrebten Nutzungsgrad von 85 % zu realisieren.

### 3.3.2 Produktionssteuerstrategien

Im Fall von produktvariantenabhängigen Fertigungen ist der Einsatz der dynamischen Simulation essenziell, da es hierbei nicht ausreicht nur einzelne, bestimmte Zeitpunkte statisch zu betrachten. Durch mögliche Produktvariantenmix-Szenarien und den daraus ggf. resultierenden unterschiedlichen mittleren Taktzeiten, Rüstzeiten, Störzeiten, Materialflüssen, etc. muss das Simulationsmodell über einen längeren definierten Zeitraum beobachtet werden, um verwertbare Aussagen, z. B. zu erforderlichen strukturellen und kapazitiven Auslegungsanforderungen oder einfach nur zu der zu erwartenden Funktions- oder Leistungsfähigkeit des Systems, treffen zu können.

Soll eine variantenabhängige Fertigung abgebildet werden, sind mehrere Aspekte zu beachten. Neben einer Produktionsliste oder Angaben zu Produktvariantenmix und

Losgrößen können für das Untersuchungsziel Sequenz- oder Perlenkettenanforderungen und daraus resultierende Restriktionen relevant sein. Weiterhin können spezielle Steuerungen der einzelnen Materialströme, wie z. B. Sequenzsteuerungen oder Kanban-Systeme, notwendig sein, um die gestellten Produktionsanforderungen umsetzen zu können. Dies ist insbesondere dann erforderlich, wenn durch parallele Fertigungsprozesse, Qualitätskontrollen außerhalb des Produktionsflusses, NIO-Teile o. ä. die Reihenfolge der eingesteuerten Aufträge in den einzelnen Produktionsanlagen, Fertigungsanlagen, Fertigungslinien und Fertigungsbereichen verändert wird.

Um diese Herausforderung zu bewältigen, werden im Folgenden mögliche Beispiele für Produktions- und Materialflusssteuerungen an einem einfachen Modellbeispiel, basierend auf der bereits oben beschriebenen Beispielanlage, vorgestellt (Abb. 3.6).

Ergänzend zur geplanten Anlagenstruktur mit Bearbeitungs- und Zusammenbaustationen, Transport- und Speichertechnik („Hardware“) müssen im Simulationsmodell bereits Steuerungen und Logik für Produktionsaufträge und Materialflüsse implementiert werden.

### 3.3.2.1 Sequenz- und Perlenkettensteuerung

Bei Sequenz- und Perlenkettensteuerungen stehen die Reihenfolgen und Sortierungen von Bauteilen innerhalb der Produktions- und Fertigungsstruktur im Vordergrund. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn für die zu untersuchenden Anlagenbereiche und -prozesse Reihenfolgeanforderungen und Reihenfolgerestriktionen bestehen, z. B. durch „Just-In-Sequence“ (JIS)-Produktion, JIS-Anlieferung oder -Anstellung von zu verbauenden Untergruppenbauteilen oder Kaufteilen (vorgefertigten Baugruppen).

Durch Sequenz- und Perlenkettensteuerungen in Verbindung mit geeigneten Anlagen-, Speicher- und Materialflussstrukturen sollen Verwirbelungen der gewünschten Produktionsreihenfolge vermieden, Produktionsreihenfolgen durch Sortierfunktionalitäten wiederhergestellt oder hinsichtlich flexibler Produktionsanforderungen optimiert werden. Zu Verwirbelungen der Produktionsreihenfolge kann es kommen, wenn z. B. Bauteile zur Qualitätskontrolle ausgeschleust werden, Nacharbeit außerhalb des normalen Produktionsflusses notwendig ist oder durch parallele Anlagenbereiche und -prozesse Überholvorgänge von Bauteilen stattfinden können.

Wie im Modellbeispiel der Abb. 3.6 zu sehen, kann durch die parallel zum Materialfluss geplante Qualitätskontrolle eine Sequenzverwirbelung entstehen, da an dieser Stelle Teile aus dem Produktionsfluss aus- und zu einem späteren Zeitpunkt, z. B. nach der parallelen Qualitätsprüfung, wieder eingeschleust werden. Um trotz Änderung der Reihenfolge in der Hauptlinie einen zusammenbaubaren Bauteilsatz mit den varianten Untergruppenbauteilen aus dem Nebenfluss bilden zu können, sind hier Sortierfunktionalitäten vor dem Verbau von Haupt- und Untergruppenbauteilen erforderlich.

Ein Sortierpuffer nach der Untergruppenfertigung (im Nebenfluss) ermöglicht es, die Untergruppenbauteile so bereitzustellen, dass sie zu den jeweiligen Bauteilen in der Hauptlinie (im Hauptfluss) passen. Dadurch werden die Konsequenzen der Sequenzverwirbelung allerdings nur lokal bzw. in Verbindung mit der zuliefernden Untergruppe kompensiert. Wenn die Einhaltung der Sequenz über diese Stelle hinaus notwendig ist, muss ein weiterer Sortierpuffer in der Hauptlinie zur Sequenzkorrektur zugefügt werden.

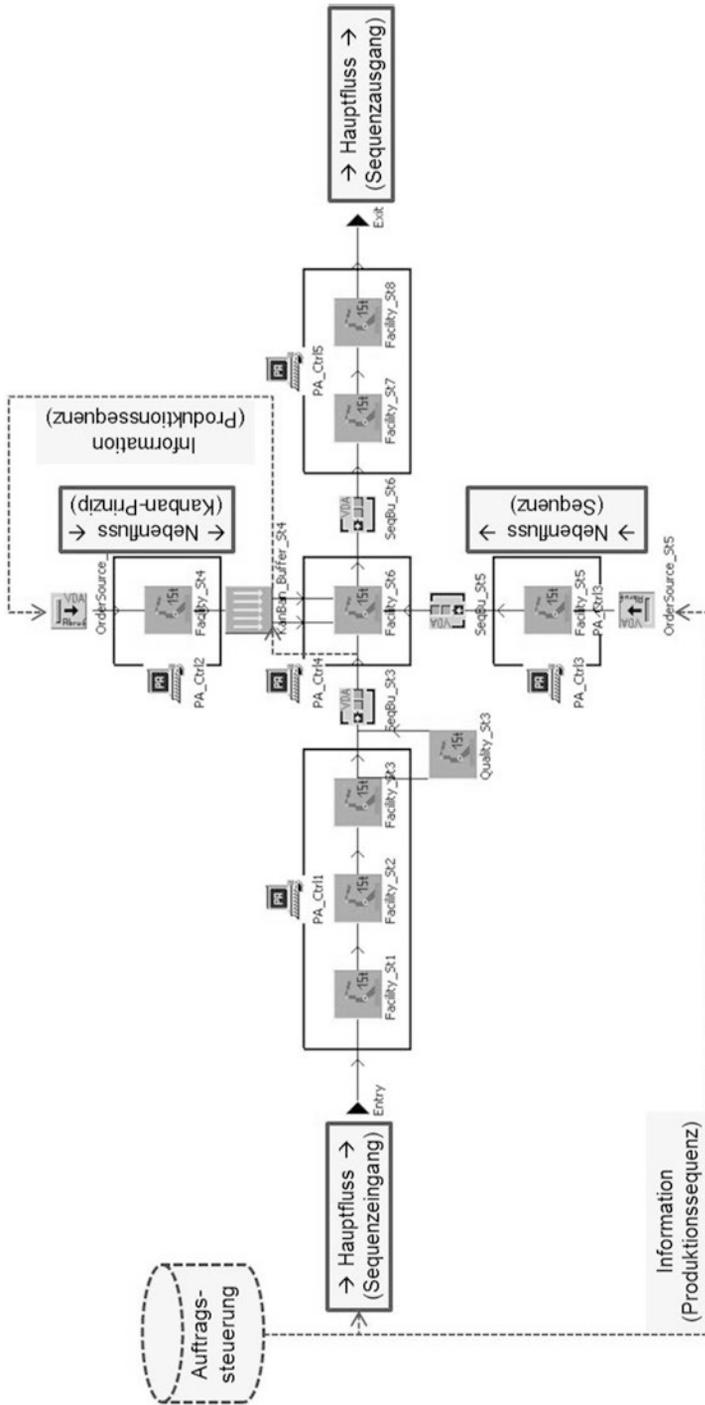
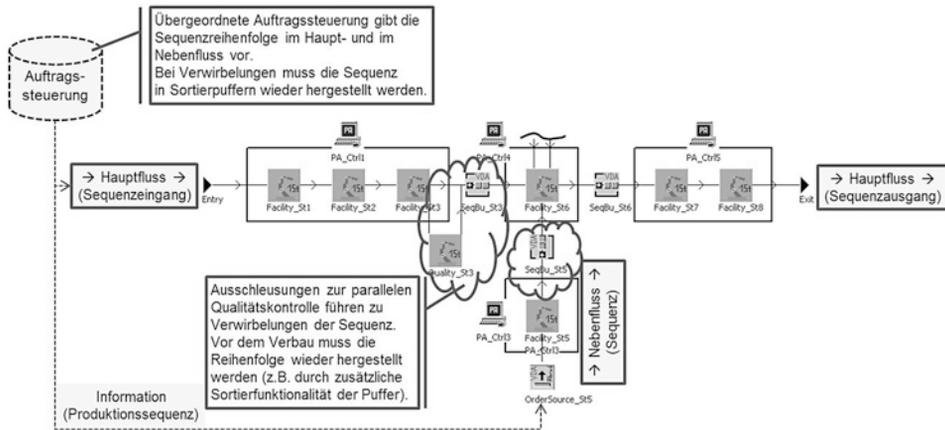


Abb. 3.6 Modellbeispiel



**Abb. 3.7** Sequenzsteuerung der Unterbaugruppe (Nebenfluss)

Hier wird ein Beispiel mit zwei Sortierpuffern und einer zentralen übergeordneten Steuerung für den Hauptfluss (Hauptteil, z. B. Plattform) und den Nebenfluss (Untergruppenbauteile, z. B. Seitenteile) vorgestellt (Struktur siehe Abb. 3.7). Die Informationen für die zu produzierenden Varianten (Auftragsliste) werden durch eine übergeordnete Steuerung zum einen an den Hauptfluss (Hauptlinie, z. B. Taupunkt des Karosseriebaus) und zum anderen an den zuliefernden Nebenfluss (variantenkombinierte Untergruppenfertigung) gemeldet. Bei Sequenzverwirbelungen in Haupt- oder Nebenfluss wird vor dem Zusammenbauort durch Sortierfunktionalitäten in den zuführenden Pufferstrecken oder -bereichen die ursprüngliche Sequenzreihenfolge wiederhergestellt bzw. zumindest ein zusammenpassender, zusammenbaubarer Bauteilesatz gebildet.

Die Installation mit zwei Sortierpuffern kann notwendig sein, da, wie bereits beschrieben, das Problem einer Sequenzverwirbelung an der Zusammenbaustelle durch einen Sortierpuffer nach der Untergruppenanlage nur verlagert wird. Falls im späteren Verlauf weitere sequenzabhängige Bearbeitungen folgen, müsste ggf. die Bauteilreihenfolge in der Hauptlinie nochmals sortiert werden, so dass sie wieder der vom Steuerungssystem (der Produktionssteuerung) vorgegebenen Eingangssequenz entspricht.

Sortierpuffer können diverse technische Ausgestaltungen haben und unterschiedliche Algorithmen anwenden, um die betreffenden Bauteile zu sortieren. Neben parallelen Sortierbahnen, Sequenzbahnen in Kombination mit Rückführschleifen, o. ä., gibt es die Möglichkeit, den Puffer wahlfrei zu gestalten. Letztgenannte Variante bietet die maximale Flexibilität, da auf alle Bauteile im Puffer jederzeit direkt zugegriffen werden kann. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Bauteile zu „parken“, um so die benötigte Variante an schon im Puffer enthaltenen Bauteilen vorbei zu schleusen.

### 3.3.2.2 Verbrauchsorientiertes Kanban-Prinzip

Bei dem Einsatz des verbrauchsorientierten Kanban-Prinzips steht bei der Auslegung die Dimensionierung bzw. die erforderliche Reichweite der Kanban-Speicherkapazität im



Im Modellbeispiel der Abb. 3.8 wird das verbrauchsorientierte Kanban-Prinzip durch sorten- bzw. variantenreine Speicherbahnen repräsentiert. Sobald die nachfolgende Zusammenbaustation Bedarf anmeldet, wird ein Bauteil der zum Hauptteil passenden Variante aus der entsprechenden variantenreinen Bahn ausgelagert (z. B. durch die Entnahme durch einen Industrieroboter). Die Kanban-Steuerung bestellt anschließend oder ggf. bereits während der Auslagerung ein neues Bauteil mit gleichen Attributen bei der zuführenden Untergruppenfertigungsanlage.

Die Mindestreichweite der Puffer kann hier in erster Annäherung statisch ermittelt werden: gesamte Durchlaufzeit des Bauteils durch die Untergruppenfertigung und die entsprechende Speicherbahn, d. h. von der Beauftragung bis zum Erreichen der Austrittsposition des Kanban-Puffers, dividiert durch die Taktzeit der Zusammenbaustation. Für dieses Beispiel mit zwei Varianten, die hier jeweils in einem Arbeitstakt ( $= 1 \times$  Taktzeit) gefertigt werden können und jeweils in variantenreinen Speicherbahnen des Kanban-Puffers (Annahme Durchlaufzeit  $= 1 \times$  Taktzeit) der nachfolgenden Zusammenbaustation zugeführt werden, ergibt das zwei zu puffernde Teile pro Variante.

Mit der statischen Auslegung der benötigten Mindestreichweite der Kanban-Puffer können beliebige Mixverhältnisse und Losgrößen der zu produzierenden Varianten durchgängig und rechtzeitig angeliefert werden. Mit optimierten Produktionsreihenfolgen (z. B. variantenalternierend, d. h. hier im Mixverhältnis 50:50 mit maximaler Losgröße 1) kann ggf. mit geringeren Pufferreichweiten operiert werden, ohne dass die Versorgung an der Zusammenbaustation aus Steuerungssicht beeinträchtigt wird. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass durch eine enge Auslegung der Produktionsanlage auf ein bestimmtes Produktionsprogramm die Leistungsfähigkeit hinsichtlich einer flexibel der Nachfrage angepassten Produktion erheblich eingeschränkt wäre.

### 3.3.2.3 Allgemeines zu Produktionssteuerungsstrategien

Eine sinnvolle Auslegung von Speicher- bzw. Puffergrößen der beschriebenen Systeme kann, je nach Einsatzfall zusätzlich zu den steuerungstechnischen Anforderungen, durch das Störverhalten und die Verfügbarkeit der verbundenen Anlagenbereiche (oder Anlagenschutzkreise) beeinflusst werden, d. h., neben der Sicherstellung einer rechtzeitigen und richtigen Bauteilbereitstellung ist auch die Minimierung oder Reduzierung von Verkettungseinflüssen zur Gewährleistung der Durchsatzleistung bei der Auslegung zu berücksichtigen.

Sollen mit einem Sortierspeichersystem für eine Sequenz- und Perlenkettensteuerung oder einem Kanban-Puffer zusätzlich noch Verkettungseinflüsse zwischen den abhängig verketteten Fertigungsbereichen ausgeglichen werden, sind zusätzlich zur ermittelten Sortierkapazität bzw. der Mindestreichweite weitere Pufferplätze zu ergänzen. Mit Hilfe des Simulationsmodells können die Belastbarkeit und Leistungsfähigkeit eines Systems auf (insbesondere stochastische) Einflussfaktoren ermittelt und Optimierungsmaßnahmen analysiert und qualitativ bewertet werden.

Die Wahl der jeweiligen technischen Ausgestaltung der Speicher- und Sortiersysteme ist nicht nur abhängig von den erforderlichen logischen Funktionalitäten und Abkoppel-

eigenschaften, sondern zusätzlich z. B. von Bauteilgeometrie, örtlichen Gegebenheiten und Wirtschaftlichkeit bzw. Budgetplanung, was wiederum im Simulationsmodell berücksichtigt werden muss.

### 3.3.3 Reihenfolgegüte und Sequenzverwirbelungen

Bei der Sequenz- bzw. Reihenfolgegüte werden Abweichungen zwischen der Eingangssequenz (geplanter Reihenfolge, Sollreihenfolge) und der Ausgangssequenz (gemessener Reihenfolge, Ist-Reihenfolge) zwischen definierten Systemgrenzen (z. B. im Karosseriebau dem Taufpunkt bis zum Fertigungsende, der Übergabe an die nachfolgende Lackiererei) beobachtet. Die Einhaltung der Sequenz ist besonders für zusammenlaufende, variantenreiche Materialströme relevant und wichtig, für die nur eingeschränkte Sortiermöglichkeiten realisiert werden können oder „Just-In-Sequence“ (JIS) bestellt und angeliefert wird. Die Sequenz, innerhalb von Gewerken und stellenweise auch darüber hinaus, unterliegt dann höchster Priorität, da sonst ggf. der weiterführende Ablauf ohne Störungen oder Verzögerungen durch verwirbelte Materialströme in der Produktion nicht zu realisieren ist (vgl. Klug 2012).

Die Kriterien, die für die Sequenz- und Reihenfolgegüte definiert werden müssen, hängen von den Vorgaben der Produktion hinsichtlich der Sequenzgenauigkeit ab. Definierte Steuerungskonzepte, Ein- und Ausschleus-Verfahren oder ggf. parallele Fertigungsprozesse können erheblichen Einfluss auf die Einhaltung der Sequenzgüte nehmen.

Veränderungen in der Reihenfolge beeinflussen die Sequenzgüte, für die, je nach Anforderung, unterschiedliche Ermittlungs- und Berechnungsverfahren zugrunde gelegt werden können. Dafür wird die Eingangsliste (z. B. Auftragseinstellung) mit der Ausgangsliste (z. B. Übergabe an einen nachfolgenden Fertigungsbereich) der Bauteile (Bauteilattribute) verglichen. In Abb. 3.9 wird anhand eines einfachen Beispiels eine mögliche Bewertung einer verwirbelten Sequenz gezeigt.

Die Sequenz wird an der dritten und vierten Stelle gebrochen, da Variante A um eine Position verspätet den Ausgang erreicht. Die restlichen 3 Bauteile sind davon nicht betroffen und halten die Sequenz ein. Daraus ergibt sich bei diesem Berechnungsverfahren eine Sequenzgüte von 75 %. Das heißt, dass die Sequenz zu 75 % eingehalten wird. Durch das Zuschalten der angesprochenen Sortierpuffer und Sortierfunktionalitäten wird die Güte der Sequenz verbessert, indem die Positionswechsel korrigiert werden.

Im Karosseriebau wird in der Regel versucht, die erforderlichen Fahrzeuge in der geforderten Sequenz an die nachfolgenden Bereiche zu liefern. In manchen Produktionswerken wird dies über zusätzliche wahlfreie Sortierpuffer zwischen den Gewerken sichergestellt (z. B. Hochregallager, Sortierbahnen, Flächenlager, durch die der Karosseriebau von der nachfolgenden Lackiererei entkoppelt wird). Mit Hilfe solcher Puffer lassen sich auch die Einflüsse unterschiedlicher Fahrweisen, zum Beispiel durch die Anwendung unterschiedlicher Schicht- und Arbeitszeitmodelle zwischen den verketteten Gewerken, reduzieren.

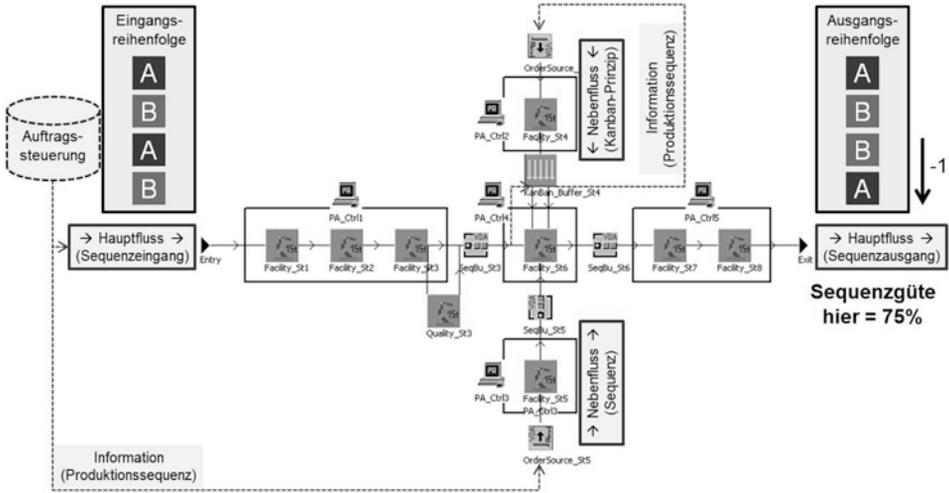


Abb. 3.9 Sequenzgüte (Beispiel)

### 3.4 Ausblick

Die durch die aktuelle Marktsituation bedingten Bestrebungen der Automobilindustrie, möglichst viele unterschiedliche Derivate und Typen am Markt zu platzieren, werden auch in Zukunft die Ablaufsimulation von Karosseriebauanlagen weiter prägen und dazu führen, dass diese weiter an Bedeutung gewinnt. Flexiblere Anlagen müssen durchgängig geplant werden, was der Ablaufsimulation bei der Datenbereitstellung entgegenkommt. Sind die Daten durchgängig im jeweiligen Planungssystem hinterlegt, so sind eine Datenübernahme und ein teilautomatisierter Modellaufbau möglich.

Eine weitere Herausforderung wird der Wandel der Baustoffe im Karosseriebau sein. Waren Fahrzeugkarosserien in den letzten Jahrzehnten größtenteils aus Stahl in Schalenbauweise gefertigt, so halten immer mehr andere Materialien Einzug in den Karosseriebau. Diese Materialien, beispielsweise Aluminium oder Karbon, erfordern andere Verarbeitungsprozesse, die wiederum neue Karosseriebauanlagen erfordern. Somit wird es auch weiter notwendig sein, Kennzahlen zu erheben, um aussagefähig bezüglich Verfügbarkeiten zu bleiben.

Weitgreifende Auswirkungen auf die Planung und Simulation von Karosseriebauten werden die Bestrebungen der Bundesregierung durch das Zukunftsprojekt in der Hightech-Strategie „Industrie 4.0“ haben. Durch eine weitere Flexibilisierung der Fertigung und eine stärkere Vernetzung der Anlagen werden sich auch die Prozesse und Abläufe ändern. Dementsprechend wird sich auch die Ablaufsimulation weiterentwickeln und strategisch auf die neuen Herausforderungen einstellen müssen.

## Literatur

- Klug F (2012) Optimaler Push/Pull-Mix bei der Produktionsplanung und -steuerung mit stabiler Auftragsfolge. In: Göpfert I, Braun D, Schulz M (Hrsg) Automobillogistik – Stand und Zukunftstrends. Springer Gabler, Wiesbaden, S 41–65
- Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S (2008) Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Springer, Berlin



**Claudia Wick** Studium der Betriebswirtschaftslehre mit Fachrichtung Datenverarbeitung im dualen System der Berufsakademie bei Daimler in Stuttgart. Danach tätig am Standort Sindelfingen in der Anwenderbetreuung für individuelle Datenverarbeitung mit dem Schwerpunkt Reportgeneratoren und Auswertungen. Ab 1995 verantwortlich für die Realisierung von Systemen im kaufmännischen Bereich; 2001 Aufbau einer weltweit eingesetzten Anwendung für Pressteil- und Pressenanlagenplanung. Seit 2009 im Bereich Digitale Fabrik verantwortlich für die Themen Rohbauplanung und Materialflusssimulation.



**Karina Schäfer** Studierte Maschinenbau an der Fachhochschule Fulda. Danach stieg sie bei EDAG als Fachverantwortliche für den Unternehmensbereich Digitale Fabrik zur Führungskraft auf. Die Themen reichten von der Vernetzung mit der Produktentwicklung, der digitalen Vorplanung bis hin zur virtuellen Inbetriebnahme. Seit 2013 ist sie Teamleiterin der Ablaufsimulation bei EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG in Fulda mit dem Schwerpunkt der Weiterentwicklung in der Mobilitätsbranche.



**Volker Habicht** Studierte Maschinenbau an der Fachhochschule in Frankfurt. Danach stieg er bei EDAG als Planer im Bereich Simulationsgestützte Planung ein und beschäftigte sich mit verschiedenen Software-Werkzeugen sowie der Modellierung und Simulation der Prozesse in der Automobilindustrie. Seit 2008 ist er in der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation des Verbands der Automobilindustrie (VDA) und vertritt die Belange der Engineering-Dienstleistungsbranche. Seit 2006 ist er Senior-Projektleiter bei EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG im Bereich der Ablaufsimulation in Fulda.



**Gottfried Mayer** Seit 1990 Mitarbeiter der BMW AG. Nach einer Ausbildung zum Industrieelektroniker Fachbereich Produktionstechnik folgte die Instandhaltung im Karosseriebau. Von 1994–1997 nebenberufliche Ausbildung zum Techniker der Elektronik mit Fachbereich Datenverarbeitungstechnik. 1996 Wechsel zur übergeordneten Steuerungstechnik mit Schwerpunkt BDE-Systeme. Seit 1999 im Bereich der Ablaufsimulation, zuerst Karosseriebau Werk München, danach Karosseriebauten weltweit bis hin zur Verantwortung über alle Gewerke. Seit 2011 in der BMW Group IT verantwortlich für die Themenfelder Simulation, virtuelle Produktion und Digitale Fabrik. Seit 2018 IT Projektleiter Additive Manufacturing.



# Simulation eines Farbsortierspeichers und eines Nacharbeitsbereiches einer Lackiererei der Automobilindustrie

# 4

Georg Mehlig

## 4.1 Motivation für eine Simulation

Unterschiedliches Routing der Karosserien, flexible Fördertechnik, sich kreuzende Förderer, überlagerte Ein- und Aussteuerungsstrategien in Sortierspeichern mit Einzelplatzzugriff, gegenseitige Blockierungen von Zuführungen und mehrfache Durchläufe von Bearbeitungslinien sind alles charakteristische Eigenschaften für den Materialfluss im Farbsortierspeicher und im Nacharbeitsbereich einer Lackiererei in der Automobilindustrie. Standardverknüpfungen von Simulationselementen stoßen im Simulationsmodell hierbei schnell an ihre Grenzen. Das individuelle Programmieren der komplexen, logischen Verknüpfungen ist bei einer solchen Simulationaufgabe nicht zu umgehen. Das macht die Modellierung von Lackierereien zu einer Herausforderung für jeden Simulationsexperten.

Ist nach aufwendiger Programmierung der Steuerungslogik die Erstellung des Simulationsmodells abgeschlossen, ist die Herausforderung für den Simulationsingenieur in der Regel noch lange nicht zu Ende. Wenn bei der Vorstellung der Simulationsergebnisse beim Betreiber der Lackiererei, dem Fertigungsleiter, von diesem die obligatorische Frage nach der Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf die Realität gestellt wird, dann stoßen die für andere Fertigungsbereiche gültigen Antworten an ihre Grenzen. Der sonst gerne angeführte Verweis des Simulationsingenieurs auf die formale Korrektheit seines Modells und seiner Programmierung und die alleinige Abhängigkeit der Qualität der Simulationsergebnisse von der Qualität der Eingabeparameter, gilt im Hinblick auf Farbsortierspeicher und Nacharbeitsbereiche leider nur sehr eingeschränkt.

---

G. Mehlig (✉)  
Opel Automobile GmbH, Rüsselsheim, Deutschland  
E-Mail: [georg.mehlig@opel-vauxhall.com](mailto:georg.mehlig@opel-vauxhall.com)

Die Validität des Simulationsergebnisses für einen solchen Fertigungsbereich wird von Hunderten Einflussfaktoren bestimmt. Wetterveränderungen, die den Staubgehalt in einer Lackiererei und damit die Reparaturraten beeinflussen können oder der wechselnde Farbgeschmack der Kunden auf dem Automobilmarkt, der die prozentuale Farbverteilung und damit die Größe der möglichen Farbpulks beeinflusst, sind dafür nur zwei Beispiele. Die Simulationsergebnisse für diesen Fertigungsbereich reagieren sehr sensibel auf das Zusammenspiel sehr vieler Einflussfaktoren, die oft auch noch von externen Ereignissen bestimmt werden.

Erschwerend kommt hinzu, dass Steuerungsstrategien, insbesondere die sich überlagernden Ein- und Auslagerungsstrategien des Farbsortierspeichers, vom Betreiber der Lackierereien individuell priorisiert werden können, was im dynamischen Verhalten ebenfalls zu Unterschieden zwischen dem realen System und dem Simulationsmodell führen kann. Die Planungsparameter und Rahmenbedingungen, die zwei bis drei Jahre vor Inbetriebnahme der Lackiererei für die Simulation angenommen werden, stimmen nur selten mit dem späteren, realen Produktionsbetrieb überein.

Trotz der beschriebenen Unwägbarkeiten ist aber die Simulation auch für diesen Fertigungsbereich unverzichtbar. Der Neubau einer Lackiererei erfordert von einem Automobilhersteller ein Investitionsvolumen von mehreren hundert Millionen Euro und verursacht hohe Betriebskosten im laufenden Produktionsbetrieb. Der Verdrängungswettbewerb auf dem europäischen und globalen Automobilmarkt zwingt jeden Automobilhersteller zu einem absolut effizienten Einsatz seiner Ressourcen.

Auch die Auslegung einer Lackiererei muss daher dem Minimalprinzip folgen: die vorgegebenen Ziele müssen mit kleinstmöglichem Mitteleinsatz erreicht werden. Durch eine Simulation ist sicherzustellen, dass, trotz der Umsetzung eines schlanken Planungskonzepts, die geplante Ausbringung erreicht werden kann. Nur bei Erreichung der geplanten Stückzahlen lassen sich die hohen Investitionen für eine solche Fertigung betriebswirtschaftlich begründen.

Gerade der Farbsortierspeicher und der Nacharbeitsbereich haben einen erheblichen Einfluss auf die Investitionssumme, die Ausbringung, die Logistikkosten sowie auf die Betriebskosten einer Lackiererei. Überdachte Produktionsfläche, beziehungsweise umbauter Raum, ist einer der Haupttreiber des Investitionsvolumens für eine Automobilfertigung. Der Flächenverbrauch durch Farbsortierspeicher und Nacharbeitsbereich wird in der Planungsphase einer Lackiererei indirekt durch eine Materialflusssimulation bestimmt. Die mit Hilfe einer Simulation ermittelte Größe des Farbsortierspeichers bestimmt die Größe der Farbpulks, die in die Lacklinien gefahren werden und damit die nicht unerheblichen Farbwechselkosten des Lackierbetriebs. Die Größe oder auch die Kapazität des Farbsortierspeichers und des Nacharbeitsbereichs spielen auch eine immer wichtigere Rolle für den allgemeinen Umlaufbestand in einem Automobilwerk, da die Summe aller Umlaufbestände ein wesentlicher Faktor für die Betriebskosten ist.

Die Logistikkosten sind für einen Automobilhersteller ebenfalls von entscheidender Bedeutung für dessen Wettbewerbsfähigkeit. Dabei wird die Höhe der Logistikkosten unter anderem von der Sequenztreue der Fertigung bestimmt. Je genauer also eine

ursprünglich geplante Auftragsreihenfolge abgearbeitet werden kann, desto wirtschaftlicher ist eine Fertigung. Nur über eine Materialflusssimulation lässt sich die Sequenztreue eines geplanten Fertigungssystems bestimmen. Der Farbsortierspeicher und der Nacharbeitsbereich einer Lackiererei sind dabei in der gesamten Produktionskette einer Automobilfertigung die Bereiche, die für die größte Verwirbelung, sprich Verletzung der Sequenz, verantwortlich sind.

Die betriebswirtschaftliche Auslegung einer Lackiererei ist also ohne Simulation nicht möglich. Unabhängig von sehr spezifischen Fragestellungen muss eine Simulationsstudie für das Planungskonzept einer Lackiererei ganz generell nachweisen, dass, bei Einhaltung aller geplanten Parameter im späteren Betrieb der Lackiererei, die erwarteten Anforderungen zumindest theoretisch erfüllt werden können. Das dynamische Materialfluss-Verhalten einer Lackiererei lässt sich bei der Vielzahl der Einflussfaktoren ohne Simulation nicht abschätzen. Die Simulation liefert somit für den späteren Betrieb Ziel- und Richtwerte für zahlreiche Parameter, selbst wenn im späteren Betrieb der Anlage Steuerungen und Anlagenparameter an die realen Betriebsbedingungen angepasst werden müssen. Die Relevanz der Farbsortierproblematik und der Simulation von Lackierereien zeigt sich auch in einer ganzen Reihe einschlägiger Literatur und Vorarbeiten zu diesem Thema (Eley 2012, S. 271–318, sowie Spieckermann et al. 2004).

---

## 4.2 Funktion eines Farbsortierspeichers

Normalerweise werden in der Lackiererei eines Automobilwerks bis zu fünf verschiedene Grundlacke und bis zu fünfundzwanzig verschiedene Decklackfarben appliziert. Grundsätzlich ist zwischen jeder Karosse ein Farbwechsel ohne Taktzeitverlust möglich. Jedoch ist jeder Farbwechsel mit zusätzlichen Kosten verbunden. Vor jeder neuen Farbe muss die alte Farbe aus den Farbleitungen herausgespült werden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist es deshalb sinnvoll, möglichst viele Karossen mit gleicher Farbe hintereinander, das heißt in einem Pulk, durch die Lacklinien zu fahren.

Alle Fahrzeuge, die im Karosserierohbau aufgelegt werden, sind entsprechend eines bestimmten Kundenauftrags spezifiziert. So ist schon zu Beginn der Produktionskette die spätere Farbe des Fahrzeugs bekannt. Im Karosserierohbau gelingt es leider nicht immer, Karossen mit gleicher Farbe in Losgrößen aufzulegen, da die Produktionssequenz im Rohbau oft anderen Restriktionen unterliegt. Zusätzlich erfährt die Produktionssequenz im Produktionsprozess zahlreiche „Verwirbelungen“. Auf parallelen Linien oder in Reparaturbereichen können sich Fahrzeuge im Rohbau überholen. Somit ist davon auszugehen, dass Karosseriefarben in zufälliger Reihenfolge vom Rohbau an die Lackiererei abgegeben werden. Vor den Lackierlinien der Lackiererei wird deshalb ein Farbsortierspeicher in die Fördertechnik integriert. Ein solcher Farbsortierspeicher kann beispielsweise, wie in der folgenden Abbildung schematisch gezeigt, aus mehreren parallelen Rollenbahnen und einer Rücklaufbahn bestehen.

Hat sich eine hinreichend große Anzahl von Fahrzeugen (Pulkgröße) im Farbsortierspeicher (auch Stapel genannt) angesammelt, wird der entsprechende Pulk aus dem Stapel angesteuert und an den Lackierprozess abgegeben. Leider sind nicht immer alle Karossen eines Pulks in der gleichen Pufferbahn eingelagert. Müssen bei der Abgabe eines Pulks an den Lackierprozess auch einzelne Fahrzeuge angesteuert werden, die sich auf hinteren Plätzen der Rollenbahnen befinden, können bei der in Abb. 4.1 gezeigten Layout-Variante diese Fahrzeuge freigefahren werden, indem die vorderen Fahrzeuge über die Rücklaufbahn zum Stapeleingang zurückgefahren und neu eingelagert werden. Um das leisten zu können, muss der Farbsortierspeicher über eine intelligente Einzelplatzverwaltung verfügen. Der Steuerungsrechner muss somit über die Information verfügen, welches Fahrzeug, beziehungsweise welche Farbe, auf jedem einzelnen Platz der Rollenbahnen eingelagert ist.

Um an den Lackierlinien Kapazitätsverluste durch Wartezeiten zu verhindern, sollte der Farbsortierspeicher in der Lage sei, zu jedem Takt der Lackierlinien rechtzeitig eine Karosserie bereitzustellen. Ein Entkopplungspuffer zwischen Stapel und Lackierlinie muss deshalb unterschiedliche Aussteuerungszeiten ausgleichen. Einige Karossen sind auf den vorderen Stapelbahnen eingelagert und können in weniger als einem Takt angesteuert werden, während andere Karossen weit hinten auf den Stapelbahnen stehen und freigefahren werden müssen, was länger als einen Takt dauern kann. Um diesen Entkopplungsbedarf zwischen Farbsortierspeicher und Lackierlinien zu minimieren, sollte die

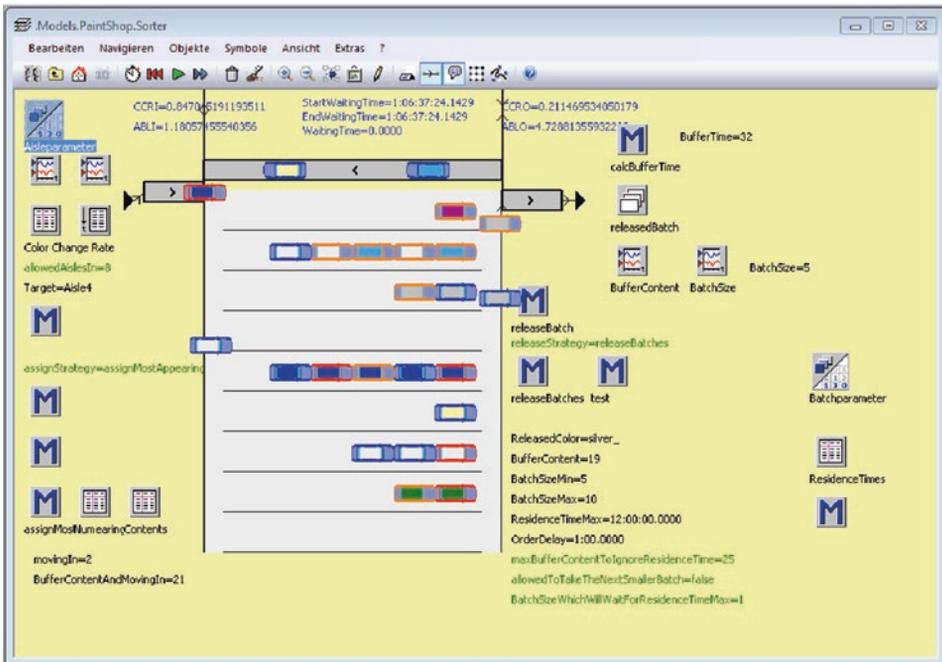


Abb. 4.1 Der Farbsortierspeicher im Modell

Stapelsteuerung so einlagern, dass möglichst wenige Karossen freigefahren werden müssen. Folglich ermöglichen viele kurze Rollenbahnen dabei eine höhere Flexibilität und führen generell zu besseren Sortiererergebnissen als wenige lange Stapelbahnen.

Die Los- oder Pulkgröße, die mit einem Farbsortierspeicher erreicht wird, hängt also einerseits von der Geometrie des Stapels ab. Sie wird aber auch ganz wesentlich von der Anzahl der Farben und deren prozentualer Verteilung bestimmt. Denn im Stapel müssen solange Karossen einer Farbe gesammelt werden, bis die gewünschte und eingestellte Pulkgröße erreicht ist. Dieser „Farbpulk“ wird dann an den Lackierprozess abgegeben.

Farben mit den größten Anteilen werden umgangssprachlich als sogenannte „High Runner“ bezeichnet, die mit geringen Anteilen entsprechend als „Low Runner“. Zusätzlich kommen in der Regel noch Sonderlackierungen hinzu, wie zum Beispiel für Polizei- oder Taxifahrzeuge, wie das Beispiel in Tab. 4.1 zeigt.

Eine Zunahme der Anzahl der Farben bedeutet eine Abnahme der realisierbaren Losgröße. Ebenso wirkt sich eine ungleichmäßige Farbverteilung auf die Pulkgröße ungünstiger aus als eine gleichmäßige Verteilung. Bedingt durch ihre geringe Häufigkeit blockieren „Low Runner“ im Sortierspeicher über einen langen Zeitraum Stapelplätze, bis die gewünschte Losgröße erreicht ist.

Zu lange Verweilzeiten einzelner Karossen im Farbpulkstapel sollten aber aus Qualitätsgründen vermieden werden, weil es hierbei zu erhöhter Verschmutzung der Karossen kommen kann. Deswegen werden Karossen oftmals nach Überschreitung einer bestimmten Verweilzeit auch dann an den Lackierprozess übergeben, wenn die eigentliche Losgröße noch nicht erreicht ist.

Die beschriebenen komplexen Anforderungen an einen Farbsortierspeicher bezüglich Geometrie und Steuerung erfordern hohe Investitionen in Fördertechnik, Steuerung und Fläche. Grundsätzlich wird deshalb von jedem Automobilhersteller ein möglichst kleiner Farbpulkstapel angestrebt. Bei der Auslegung eines solchen Stapels durch eine Materialflusssimulation ist es daher erforderlich, die Größe des Stapels auf die reinen Sequenzierungsaufgaben zu beschränken, während die Entkopplung der Prozesse ohne

**Tab. 4.1** Beispiel für eine Farbverteilung

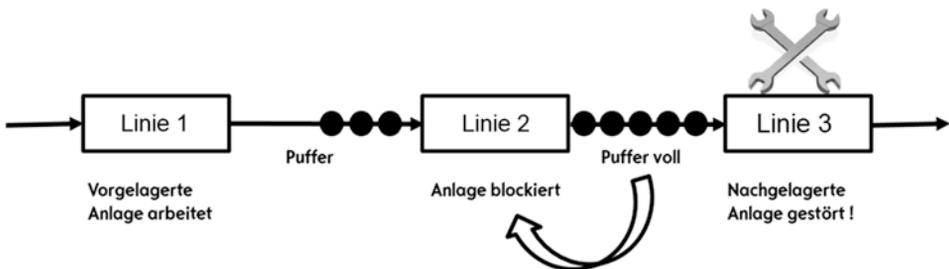
Farbe	Anteil [%]
Silber	37
Schwarz	18
Gelb	15
Grün	7
Blau	6
Rot	5
Grau	5
Weiß	4
Zweifarbige	2
Sonderfarben	1
<b>Summe</b>	<b>100</b>

Steuerungsaufwand über die verbindende Fördertechnik erfolgt. Einfache Entkopplungspuffer mit „FIFO-Steuerung“ sollen dabei weitestgehend verhindern, dass Störungen in einem Prozess beziehungsweise in einer Anlage auf die benachbarten Anlagen durchschlagen.

Solche Verkettungsverluste, also Verluste durch Warte- und Blockierzeiten, entstehen, wenn sich die nachfolgende Anlage in einer Störung befindet und der Zwischenpuffer vollgelaufen ist, oder wenn die vorgelagerte Anlage gestört ist und der Zwischenpuffer leergelaufen ist. Schematisch sind die Zusammenhänge in Abb. 4.2 zu sehen. In beiden Fällen müssen die Verkettungsverluste über die Liniengeschwindigkeit („Überkapazitäten“) kompensiert werden.

Aus Kostengründen können die Entkopplungspuffer nicht für beliebig lange oder häufige Ausfälle dimensioniert werden. In einem Kostenvergleich muss abgewogen werden, bis zu welcher Grenze es wirtschaftlicher ist, statt in Überkapazitäten in Puffer zu investieren. Grundsätzlich sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Größe der Puffer und die notwendige Liniengeschwindigkeit Ergebnisse der Simulation sind. Nur eine Simulationssoftware, die in der Lage ist, Verkettungsverluste in einem Produktionssystem in Abhängigkeit von den dynamischen Pufferfüllständen, Anlagengeschwindigkeiten und zufällig generierten Anlagenausfällen statistisch aufzeigen, kann diese Ergebnisse liefern. Denn gerade Ausfälle von Anlagen, die zwar bestimmten mathematischen Gesetzmäßigkeiten folgen, treten trotzdem zufällig und nicht vorhersehbar auf. Somit muss die Simulationssoftware in der Lage sein, diese Zufälligkeit zu generieren. Der Versuch, Aussagen über zum Beispiel die notwendige Größe eines Farbsortierspeichers über eine rein statische Betrachtung zu machen, würde zu Fehleinschätzungen führen!

Diese theoretische Trennung zwischen Sequenzierungsaufgaben und Entkopplungsaufgaben lässt sich in einem realen Fördertechnik-Layout nicht immer so strikt vollziehen. Ein Farbsortierspeicher, der temporär gerade nicht mit Sequenzierungsaufgaben vollständig ausgelastet ist, trägt im realen Produktionsbetrieb natürlich auch zur Entkopplung bei. Ganz generell sollte diese Aufgabenteilung bei der Auslegung eines Farbpulkstapels aber berücksichtigt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Größenreduzierung des Farbsortierspeichers ist die dynamische Farbzuordnung (Dynamic Color Assignment). Dabei werden die Kundenaufträge zwischen baugleichen Karosserien im Produktionsprozess getauscht,



**Abb. 4.2** Verkettungsverluste in Reihe geschalteter Produktionslinien

um schon im Zulauf auf die Lacklinien möglichst große Farbpulks zu bilden. Eine geringe Proliferation der Rohkarosserien ist für eine solche dynamische Farbzuordnung ebenso Voraussetzung wie eine Produktionssteuerung, die über die entsprechende Funktionalität verfügt, Aufträge beziehungsweise Karossen zu tauschen.

---

### 4.3 Simulation eines Farbsortierspeichers

Voraussetzung für die Auslegung eines Farbsortierspeichers über eine Materialflusssimulation ist die Abbildung der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Funktionen und Steuerungen in einem Simulationsmodell. Ein Simulationsmodell ist dabei immer im Hinblick auf die Aufgabenstellung zu programmieren. Um zu verhindern, dass am Nutzen vorbei gearbeitet wird, sollte wie u. a. von der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014) oder der VDA-Ausführungsanweisung – Ablaufsimulation in der Automobil- und Automobilzulieferindustrie (VDA 2016) gefordert, die Aufgabenstellung klar gefasst und Fragen an die Simulation eindeutig formuliert sein. Dies hört sich im ersten Moment profan an, wird jedoch bei einem Blick auf die Auswahl möglicher Fragen nachvollziehbar:

- Welche maximalen Pulkgrößen können gefahren werden?
- Welche maximale Anzahl Farben kann bei vorgegebener Pulkgröße realisiert werden?
- Wie viele Plätze werden benötigt, um welche Pulkgröße zu erreichen?
- Welche Geometrie (Anzahl Bahnen und Anzahl Plätze je Bahn) ist erforderlich, um welche Pulkgröße zu erreichen?
- Wie groß ist der Platzbedarf, beziehungsweise welche Fläche ist überhaupt vorhanden?
- Unter welchen Bedingungen lohnt es sich, auf Stapelplätze zu verzichten und stattdessen Farbwechsel durchzuführen?
- Wie muss die fördertechnische Anbindung des Farbsortierspeichers an die Lacklinien aussehen?

Dies sind nur ein paar wenige Beispiele möglicher Fragestellungen, die sich unter Umständen auch überschneiden können. Die Suche nach den richtigen Antworten auf eine oder mehrerer dieser Fragen ist allerdings oft ein iterativer Prozess, denn das Optimum eines Parameters (zum Beispiel der Stapelgröße) hat oft negativen Einfluss auf einen anderen Parameter (zum Beispiel die Pulkgröße). Die Fragestellung entscheidet somit über Art, Aufwand und Umfang des Simulationsmodelles.

Basis für die Simulation eines Farbsortierspeichers ist die Definition der voneinander unabhängigen Ein- und Auslagerungsstrategie. Diese Strategie ist für das Simulationsmodell in eine methodische Abfrage umzusetzen. Es sind Kriterien festzulegen, die entscheiden wo eine ankommende Karosserie im Stapel eingelagert wird und in welcher Reihenfolge Karossen aus dem Stapel angesteuert werden.

Diese Abfragereihenfolge könnte für die Einlagerungsstrategie in etwas vereinfachter Form etwa folgendermaßen aussehen:

1. Ist ein freier Platz im Stapel verfügbar?
2. Existiert schon eine Karosse mit der gleichen Farbe im Stapel?
3. Falls ja, ist in dieser Bahn noch ein freier Platz vorhanden?
4. Falls nein, ist eine leere Bahn verfügbar, in die diese Karosse eingelagert werden kann?
5. Wenn nicht, welche Bahn hat die geringste Belegung?

Entsprechend einer solchen zu definierenden Abfragereihenfolge sind im Simulationsmodell Schleifen zu programmieren, die bei der Ankunft einer Karosse am Stapelzugang den Speicher solange durchsuchen, bis ein günstiger Platz für die Einlagerung der entsprechenden Karosse gefunden ist. Der Komplexität bei der Abfragereihenfolge sind dabei selbstverständlich keine Grenzen gesetzt. Beispielsweise könnten Restriktionen bestehen, dass bestimmte Farben nur in bestimmte Bahnen eingelagert werden dürfen. Oder wenn etwa der Anteil bei der Farbverteilung einen bestimmten Wert unterschreitet, sind Karossen mit diesen Farben (also die „Low Runner“) in bestimmte Bahnen einzulagern.

Um mit dem Modell mit möglichst geringem Aufwand unterschiedliche Szenarien untersuchen zu können, ist es zweckmäßig, eine Vielzahl der Parameter variabel zu definieren, zum Beispiel die Anzahl der Bahnen und die Anzahl der Plätze je Bahn. So lässt sich die Größe des Sortierstapels bei jedem Simulationslauf beliebig verändern, um etwa eine minimal notwendige Größe zu ermitteln.

Die Einlagerungsstrategie kann in der Software als Programmcode oder über Entscheidungsregeln realisiert und aufgerufen werden, sobald eine Karosse in den Stapel eintreten will. Auch hier ist es sehr zweckmäßig, die Strategie über eine Variable einzulesen. Das bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Steuerungsstrategien in Form von separaten Methoden zu entwerfen und deren unterschiedliche Auswirkungen auf den Materialfluss miteinander zu vergleichen.

Nach dem gleichen Prinzip wie auf der Eingangsseite, muss dann auf der Ausgangseite des Stapels eine Auslagerungslogik definiert werden, die alle Anforderungen der nachgelagerten Prozesse berücksichtigt. Dazu gehört wieder eine Abfragereihenfolge, deren Ergebnis ein Pulk von Karossen ist, die aus dem Stapel angesteuert und dann in Richtung Decklacklinie gefördert werden. Eine mögliche Abfragereihenfolge auf der Ausgangseite könnte wie folgt aussehen:

1. Welche Farben im Stapel haben die eingestellte Pulkgröße erreicht?
2. Welche dieser Farben haben die längste Verweilzeit im Stapel?
3. Welche Karossen werden angesteuert, falls kein ausreichend großer Pulk verfügbar ist?
4. Dürfen zwei Pulks der gleichen Farbe nacheinander angesteuert werden?
5. Soll eine Karosse bei Überschreiten der maximalen Verweilzeit unabhängig von der Pulkgröße ausgeschleust werden?
6. Kann der angesteuerte Pulk den Zulauf zu parallelen Lacklinien blockieren?

Ist die Methode auf der Ausgangseite durchlaufen und abgearbeitet, ist das Ergebnis ein Pulk von Fahrzeugen, die identifiziert und freigegeben sind um auszufahren. Auszusteuerte Karosserien können teilweise auf hinteren Plätzen einer Stapelbahn eingelagert und durch Karosserien anderer Farbe blockiert sein. Um diese Karosserien freizufahren, werden die blockierenden Karossen über die Rücklaufbahn zum Stapelzugang zurückgefahren. Hier durchlaufen sie erneut die schon beschriebene Einlagerungsstrategie, haben allerdings Priorität vor den regulären Fahrzeugen, um die Rücklaufbahn nicht zu blockieren. Diese muss so gut wie möglich freigehalten werden, da sonst im Farbsortierspeicher keine Umsortierung mehr stattfinden kann. Die Reihenfolge der Abfrage spielt auch eine wichtige Rolle, denn sie bestimmt, welcher Anforderung der Vorrang gegeben wird. So kann z. B. erst nach der Pulkgröße und danach nach der Überschreitung der erlaubten Verweilzeit gefragt werden. Mit der Reihenfolge der Bedingungen kann somit auch eine Priorisierung definiert werden.

Existieren hinter dem Farbsortierspeicher mehrere parallele Lackierlinien, müssen deren Anbindungen freigehalten werden. Ein Ausfall in einer Linie darf in keinem Fall zu der Blockade anderer Lackierlinien führen.

Eine weitere Herausforderung an den Aufbau des Simulationsmodelles besteht, wenn einzelne Decklacklinien bestimmten Restriktionen unterliegen. Das kann der Fall sein, wenn beispielsweise bestimmte Farben nur in bestimmten Linien appliziert werden können, oder wenn einzelne Karosserievarianten nur zu bestimmten Decklacklinien gefahren werden dürfen.

Grundsätzlich ist es natürlich auch auf der Ausgangseite sinnvoll, so viele Bedingungen wie möglich variabel zu programmieren, um später durch schnelle Parametrierung verschiedenste Szenarien simulieren zu können.

---

#### **4.4 Nacharbeitsbereich einer Lackiererei**

Wie der Farbsortierspeicher- stellt auch der Nacharbeitsbereich einer Lackiererei einige besondere Anforderungen an die Materialflusssimulation. Für unterschiedlich schwere Lackierfehler bestehen unterschiedliche Nacharbeitsbereiche, von denen eine einzelne Karosserie mehrere durchlaufen kann. Grundsätzlich kann jede Nacharbeit aufgrund von Folgefehlern weitere Reparaturen in anderen Nacharbeitsbereichen erfordern. Bereits reparierte Karosserien können in der Inspektionslinie nochmals für „NOK“ (Nicht Okay) erklärt werden, so dass sie eine weitere Schleife durch den Nacharbeitsbereich absolvieren müssen.

Die verschiedenen Nacharbeitsbereiche müssen deshalb alle durch eine sehr flexible Fördertechnik miteinander verbunden sein, was sich kreuzende Materialflüsse verursacht. Eine flexible Fördertechnik bedeutet für den Simulationsingenieur natürlich auch immer einen erhöhten Programmieraufwand bei der Abbildung dieser Förderer im Simulationsmodell.

Je nach Schwere des Lackierfehlers unterscheidet man folgende Nacharbeitsbereiche bzw. Reparaturkategorien (wobei sich die genauen Bezeichnungen je nach OEM unter Umständen etwas unterscheiden können):

- Spot Repair
- Panel Change
- Heavy Repair
- Reruns

Im Nacharbeitsbereich „Spot Repair“ werden kleinere Lackschäden („Spots“) in der Lackoberfläche beseitigt, ohne dass eine Demontage der zu reparierenden Teile erfolgt. Eine Demontage von defekten Blechteilen, die anschließend vollständig abgeschliffen und neu lackiert werden müssen, erfolgt im Nacharbeitsbereich „Panel Change“. Die demonitierten Bauteile werden direkt durch bereitliegende und schon lackierte Ersatzteile ersetzt. Schwere Lackschäden, die das Abschleifen, Neulackieren und Trocknen großer Flächen erfordern, werden im Nacharbeitsbereich „Heavy Repair“ bearbeitet. Als „Reruns“ werden in der Lackiererei die Karosserien bezeichnet, die aufgrund schwerster Lackschäden komplett abgeschliffen und anschließend ein weiteres Mal den Lackierlinien zugeführt werden müssen. Für den Nacharbeitsbereich einer Lackiererei sind folgende Fragestellungen an die Simulation charakteristisch:

- Welchen Einfluss haben die Reparaturraten (d. h. die Wahrscheinlichkeit, mit denen die o. g. Reparaturkategorien auftreten) auf den Durchsatz des Produktionssystems?
- Wie hoch ist die erforderliche Anzahl der Reparaturkabinen?
- Welche Puffergrößen werden vor den einzelnen Nacharbeitsbereichen benötigt?
- Welchen Einfluss haben die Bearbeitungszeiten in den verschiedenen Nacharbeitsbereichen auf den Durchsatz des Produktionssystems?

Im Simulationsmodell werden die Karosserien den verschiedenen Nacharbeitsbereichen entsprechend einer prozentualen Verteilung (den Reparaturraten) zugewiesen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass zum Beispiel Karosserien, deren Dächer einen andersfarbigen Decklack erhalten als der Rest der Karosserie, oft mit anderen Reparaturraten berücksichtigt werden als einfarbige Karosserien. Wie bereits beschrieben, erfolgt die Zuweisung zu den verschiedenen Nacharbeitsbereichen auch nicht immer über die Inspektionslinie, sondern kann auch von Nacharbeitsbereich zu Nacharbeitsbereich erfolgen.

Somit ist nicht nur die Programmierung eines Simulationsmodells für den Nacharbeitsbereich eine Herausforderung, schon die Datensammlung für die Eingabeparameter der Simulation stellt erhöhte Anforderungen.

Aufgrund der beschriebenen Prozessfolge reicht es für die Messung der Reparaturraten im realen Produktionsbetrieb nicht aus, nur die Auslastung der Reparaturkabinen zu messen, sondern auch der Verursacher des Reparaturauftrags muss registriert werden. Diese

Reparaturhistorie muss für jede einzelne Karosserie auch im Simulationsmodell mitgeführt werden. Jede Karosserie im Simulationsmodell sollte deshalb Attribute mitführen, die die durchlaufenen Nacharbeitsbereiche anzeigen.

Da Reparaturaufträge von verschiedenen Bereichen ausgelöst werden können, die alle mit unterschiedlichen Reparaturraten arbeiten, lässt sich die Auslastung eines einzelnen Bereichs kaum ohne Simulation abschätzen. Die Erhöhung von prozentualen Reparaturanteilen in einzelnen Nacharbeitsbereichen beeinflusst in der Regel auch die Auslastung anderer Nacharbeitsbereiche.

Nicht immer verfügen Reparaturkabinen über eigene Trockenöfen. Wenn eine Reparatur im Nacharbeitsbereich die anschließende Trocknung der reparierten Karosserie erfordert, muss dieses Fahrzeug zu den Trockneröfen der Lackierlinien geschickt werden, was wiederum bei der Kapazität dieses Prozesses berücksichtigt werden muss.

Temporäre Auslastungsspitzen in einzelnen Nacharbeitsbereichen können zu extremen Wartezeiten für einzelne Karossen führen. Die Pufferdimensionierung vor den Nacharbeitskabinen über eine Simulation ist daher wichtig, um Blockierungen anderer Prozesse zu vermeiden.

Im Nacharbeitsbereich einer Lackiererei der Automobilfertigung bestehen komplexe Materialflüsse. Es lässt sich nur schwer abschätzen, wie sich Änderungen einzelner Parameter auf den übergeordneten Materialfluss auswirken. Die zahlreichen Abhängigkeiten innerhalb des Nacharbeitsbereichs erfordern eine Materialflusssimulation bei der Auslegung der Reparaturkapazitäten. Die detaillierte Abbildung dieses Fertigungsbereichs in einem Simulationsmodell bedeutet einen nicht unerheblichen Aufwand im Hinblick auf Programmierung der Steuerungslogik und Datensammlung der Simulationsparameter. Letztlich ist die materialflusstechnische Analyse des Nacharbeitsbereiches aber ein klassisches Anwendungsgebiet für die Simulation.

---

#### **4.5 Farbpulkstapel und Nacharbeitsbereich – eine Herausforderung im Hinblick auf die Sequenzstabilität**

Bei der Planung und Auslegung von Produktionsstätten für die Automobilindustrie gewinnt die Einhaltung der Sequenztreue über die gesamte Prozesskette (vgl. Abb. 4.3) immer mehr an Bedeutung und entwickelt sich zu einem der entscheidenden Kriterien für den wirtschaftlichen Betrieb einer Automobilfertigung (vgl. z. B. Klug 2012). Wenn die Einhaltung einer festgelegten Produktionsreihenfolge, schon mehrere Tage bevor die entsprechenden Fahrzeuge im Rohbau aufgelegt werden, bis zum Einlauf in die Fertigmontage garantiert werden kann, lassen sich hohe Summen an Material- und Logistikkosten einsparen.

Die Sequenzstabilität (angegeben in Prozent) ist dabei ein Maß für die Abweichung der realen Abarbeitung von Aufträgen in der Fertig- und Endmontage, verglichen mit der vor Produktionsbeginn geplanten Auftragsreihenfolge.

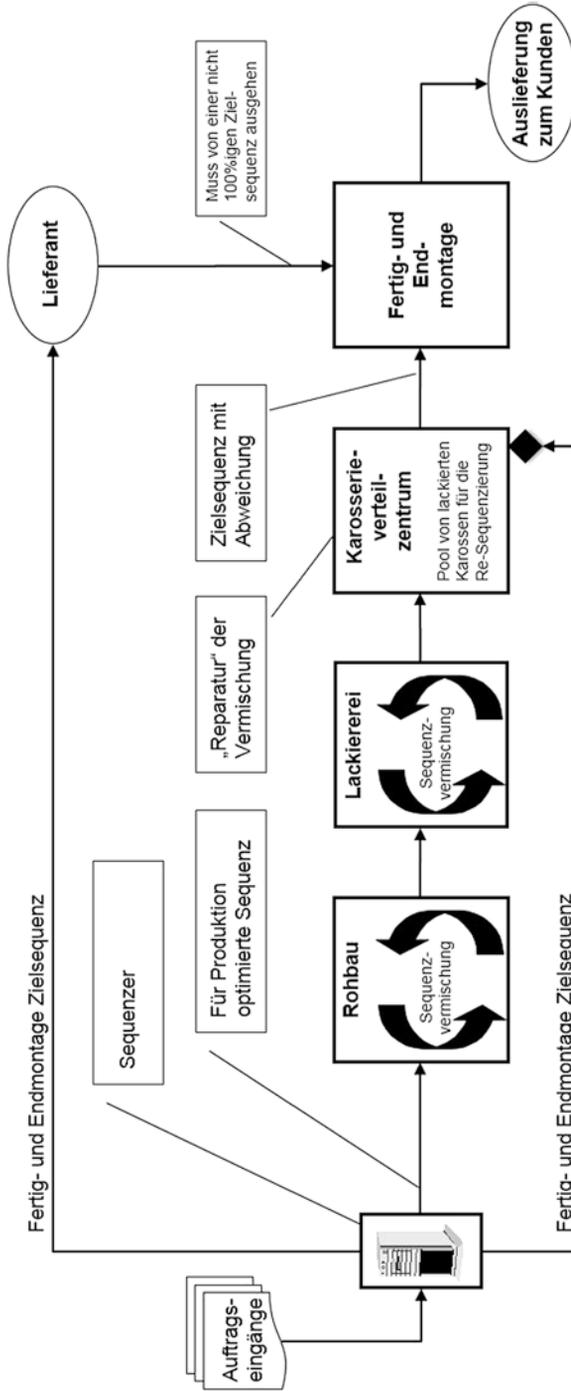


Abb. 4.3 Die Vermischung der Sequenz im Produktionsprozess

Eine hohe Sequenzstabilität ermöglicht die sequentielle Anlieferung von Material und reduziert somit erheblich Kosten für Lager-, Anstell- und Resequenzierungsflächen. Die Resequenzierungsfläche ist dabei die benötigte Fläche für die Umsortierung von An- und Einbauteilen, die umso größer sein muss, je schlechter die Sequenzgüte ist. Die frühzeitige Beauftragung der Zulieferer mit der Anlieferung einer definierten Sequenz erweitert den Radius möglicher Anbieter und reduziert die Herstellungskosten für den Zulieferer. Positive Effekte lassen sich auch im Fertigungsprozess selbst beobachten. Eine Fertigung, in der Fahrzeuge mit hohen Arbeitsinhalten gleichmäßig in die Produktionssequenz eingestreut sind, läuft wesentlich harmonischer und störungsfreier und ermöglicht damit reduzierte Liniengeschwindigkeiten.

Die Herausforderung in der Praxis ist die Aufrechterhaltung der Sequenzgüte über die gesamte Prozesskette, da verschiedenste Ursachen zu einer Verletzung der ursprünglich geplanten Reihenfolge und somit zu einer Abnahme der Sequenzstabilität führen können. Das kann zum Beispiel durch parallele Linien im Fertigungsprozess geschehen, durch Ausschleusen von Karossen für Qualitätskontrollen, durch Ausschuss während der Produktion oder durch zweifarbige Lackierungen, da die entsprechenden Karosserien den Lackierprozess zweimal durchlaufen müssen. In allen Fällen kann es durch Überholungen zu Verletzungen der Reihenfolge kommen.

Wie schon erwähnt, entstehen die größten „Sequenzverwirbelungen“ in der gesamten Prozesskette im Farbsortierspeicher und dem Nacharbeitsbereich der Lackiererei. Im Farbpulkstapel wird durch die Bildung von Karosseriepulks mit gleicher Farbe die ursprüngliche Produktionsreihenfolge absichtlich verwirbelt. Eine intelligente Stapelsteuerung ist hier gefordert, die Verspätungen der Karosserien bei der Pulkbildung zu berücksichtigen und soweit wie möglich zu minimieren. Auch im Nacharbeitsbereich kann es zu massiven Verspätungen von Karosserien kommen. Verwirbelungen entstehen dort vor allem durch Mehrfachreparaturen, den „Reruns“ (Fahrzeuge, die den Lackierprozess mehrfach durchlaufen müssen), oder durch Wartezeiten vor den Reparaturkabinen. Im Nacharbeitsbereich wird somit versucht, durch Bevorzugung älterer Karosserien die Verspätungen über eine entsprechende Steuerungslogik zu minimieren.

Die Simulation bietet ausgezeichnete Möglichkeiten, die Steuerungsstrategien zur Reduzierung von Verwirbelungen zu optimieren, eine komplette Vermeidung von Sequenzvermischungen ist dennoch weder im Farbsortierspeicher noch im Nacharbeitsbereich möglich. Solche unvermeidbaren Verspätungen sollen im Karosserieverteilstation (KVZ) bis zu einem gewissen Maße ausgeglichen werden. Das Karosserieverteilstation, angeordnet zwischen Lackiererei und der Fertig- und Endmontage, ist ein Karosseriespeicher (häufig als Hochregallager ausgeführt), der den wahlfreien Zugriff auf jede der eingelagerten Karosserien ermöglicht. Dadurch besteht die Möglichkeit, im Fertigungsprozess entstandene Verspätungen von Karosserien aufzuholen und die ursprüngliche geplante Reihenfolge, zumindest teilweise, wiederherzustellen. In welchem Maße Verspätungen aufgeholt werden können, hängt von der Anzahl der Fahrzeuge ab, die im Karosserieverteilstation zur Resequenzierung zur Verfügung gestellt werden, somit also von der Größe des Karosseriespeichers.

Der Simulation kommt hierbei die Aufgabe zu, die erforderliche Größe des Resequenzierungsfensters im Karosserieverteilzentrum zu bestimmen. Dazu wird im Simulationsmodell jeder Karosse beim Eintritt in die Prozesskette über ein Attribut eine laufende Sequenznummer mitgegeben. In einem anderen Attribut wird die Austrittsreihenfolge am Ausgang der Lackiererei festgehalten. Durch Differenzbildung der beiden Attribute erhält man die Verspätung jeder einzelnen Karosse. Ein damit generiertes Verspätungsprofil über alle Karosserien des Simulationslaufs liefert die Möglichkeit, die erforderliche Größe des Resequenzierungsfensters zu bestimmen.

---

## 4.6 Fazit und Ausblick

Wollte man den gesamten Umfang der Simulation eines Farbsortierspeichers in allen Details erklären, beschreiben und dazu detailliert auf das Modell eingehen, würde dies den Rahmen dieses Beitrages deutlich übersteigen. Hinzu kommt der Aspekt der Sequenzstabilität, der im Rahmen dieses Beitrages auch nur angedeutet werden konnte.

Doch bleibt zusammenfassend zu sagen, dass diese komplexen und dynamischen Systeme nur mit Hilfe der Materialflusssimulation geplant, überprüft und abgesichert werden können. Die Anforderungen an Produktionssysteme werden, was Komplexität und Ökonomie, aber auch Ökologie und Nachhaltigkeit betrifft, in Zukunft weiter steigen, und somit wird die Bedeutung der Simulation in gleichem Maße auch weiter zunehmen.

---

## Literatur

- Eley M (2012) Simulation in der Logistik. Springer, Berlin/Heidelberg
- Klug F (2012) Optimaler Push/Pull-Mix bei der Produktionsplanung und -steuerung mit stabiler Auftragsfolge. In: Göpfert I, Braun D, Schulz M (Hrsg) Automobillogistik – Stand und Zukunftstrends. Springer Gabler, Wiesbaden, S 41–65
- Spieckermann S, Gutenschwager K, Voß S (2004) A sequential ordering problem in automotive paint shops. *Int J Product Res* 42:1865–1878
- VDA (2016) VDA-Ausführungsanweisung Ablaufsimulation in der Automobil- und Automobilzulieferindustrie. Resource document. VDA Arbeitsgruppe Ablaufsimulation. [http://www.vda-ablaufsimulation.de/images/6/62/Ausfuehrungsanweisung\\_VDA\\_Vers2-6\\_20160418.pdf](http://www.vda-ablaufsimulation.de/images/6/62/Ausfuehrungsanweisung_VDA_Vers2-6_20160418.pdf). Zugegriffen am 27.06.2016
- VDI (2014) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Beuth, Berlin



**Georg Mehlig** Jahrgang 1962, studierte nach seiner Ausbildung zum Maschinenbauer an der FH Wiesbaden Maschinenbau. Sein Diplom legte er im Jahre 1998 bei Prof. Dr.-Ing. Lindner ab. Seitdem arbeitet er bei der Adam Opel AG, zuerst im Bereich Fahrzeugvorschriften, seit 2004 als Systemingenieur für Durchsatz- und Ergonomie-Simulation. Für die Opel Automobile GmbH ist er Mitglied der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation im Verband der Automobilindustrie (VDA). Herr Mehlig ist freiberuflich als Dozent für Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen an der FH Bingen und als Dozent für Materialfluss, Logistik und Simulation an der Hochschule Darmstadt tätig.



# Ablaufsimulation in der Fahrzeugendmontageplanung – Eine einheitliche und transparente Simulationsmethodik fördert die Nachvollziehbarkeit und das Vertrauen

Joachim Opp

## 5.1 Einleitung

Ford Europa fertigt an den europäischen Standorten Köln, Saarlouis, Valencia (Spanien) und Craiova (Rumänien) die Fahrzeugbaureihen Fiesta, Ecosport, Puma, Focus, Kuga, Transit- & Tourneo- Connect, Mondeo, S- Max und Galaxy. Darüber hinaus ist Ford Europa auch für die Produktion des Ford-Rangers in Silverton (Südafrika) mitverantwortlich (vgl. Abb. 5.1).

Die Planungsaktivitäten für die genannten Werke leiten sich aus den Produktlebenszyklen, aber auch aus notwendigen Anpassungen der Produktionskapazität auf die Marktbefürfnisse ab. Derzeit beläuft sich ein kompletter Lebenszyklus einer Baureihe durchschnittlich auf sechs Jahre. Zudem erhalten die Modelle auch während des oben genannten Lebenszyklus technische und optische Anpassungen. Hier gibt es Produkterneuerungen (auch „Facelifts“ genannt), aus denen Projekte unterschiedlicher Größenordnung entstehen.

Die Durchführung der notwendigen Planungsaktivitäten ist die Hauptaufgabe eines zentralen Entwicklungsbereichs mit Hauptsitz in Köln. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter dieses Bereichs haben eine wichtige Funktion als Bindeglied zwischen der Produktentwicklung, der Produktion und den Anlagenlieferanten. Sie sind sowohl für die Auslegung und Beschaffung von Neuanlagen als auch für die Modifikationen der bestehenden Einrichtungen verantwortlich. Darüber hinaus stellen sie mit ihrer Erfahrung eine effiziente Inbetriebnahme der Systeme sicher.

Die Ablaufsimulation ist ein wichtiger Bestandteil dieses Bereichs. Sie trägt dafür Sorge, dass möglichst effiziente Produktionssysteme entwickelt werden, mit denen die

---

J. Opp (✉)  
Langenfeld, Deutschland  
E-Mail: [joachim.opp@langenfeldmail.de](mailto:joachim.opp@langenfeldmail.de)

FORD EUROPA - Fahrzeug Werke	
Deutschland - Köln	Fiesta 3-Türer Fiesta 5-Türer Fiesta Active
Deutschland - Saarlouis	Focus 4-Türer Focus 5-Türer Focus Kombi Focus Active
Rumänien - Craiova	Ecosport Puma
Spanien - Valencia	Kuga Transit Connect Mondeo 4-Türer Mondeo 5-Türer Mondeo Kombi S-Max Galaxy

**Abb. 5.1** Fahrzeugfertigung Ford Europa

Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens erhalten oder auch weiter gesteigert wird. Die Eingangsdaten und Ergebnisse der Simulation stellen für die Inbetriebnahme und das Betreiben der Anlagen wichtige Kennzahlen dar, bei deren Einhaltung die geplante und geforderte Effizienz erreicht wird.

Die folgenden Abschnitte sollen einen Einblick in die Einbindung der Simulation innerhalb der Prozesskette der Fertigungsplanung geben. Dabei spielt der richtige Zeitpunkt für Simulationsprojekte eine ebenso wichtige Rolle wie die Standardisierung der Projektabwicklung. Darüber hinaus wird ein Überblick der wichtigsten Aufgabenstellungen der Simulation für den Bereich der Fahrzeugendmontage gegeben.

## 5.2 Simulation in der Entwicklungsprozesskette

Die Entwicklung der Fahrzeuge und die Implementierung in die Produktionswelt sind bei den Automobilherstellern durch einen generell gültigen, aber für jeden Hersteller individuellen Zeitplan geregelt. In diesem ist definiert, welche Aufgaben zu bestimmten Programmmeilensteinen abgeschlossen sein müssen, damit eine verlässliche Koordination der am Gesamtprozess beteiligten Personen gewährleistet wird.

Auch für die Simulation ist es wichtig, sich für jedes neue Fahrzeugprogramm an diesem Zeitplan zu orientieren. Nur so ist es möglich, die eigenen Ressourcen zu planen, Einfluss auf das Projekt zu nehmen und Ergebnisse fristgerecht zu liefern.

### **5.2.1 Meilenstein 1 – Programmstart**

Zum Gesamtprojektstart und damit zum Start eines neuen Fahrzeugprogramms hat die Simulation noch keinen aktiven Einfluss. Es liegen noch nicht die notwendigen Informationen vor, mit denen ein Simulationsprojekt gestartet werden könnte. Dennoch ist es sinnvoll, schon jetzt erste Festlegungen zu treffen:

- Was muss potenziell simuliert werden?
- Wann kann damit begonnen werden?
- Zu welchem Zeitpunkt müssen Ergebnisse vorliegen?
- Werden externe Ressourcen benötigt?

### **5.2.2 Meilenstein 2 – Bestätigung der Programmstrategie**

Einige Wochen nach Programmstart haben die für die Strategieplanung zuständigen Bereiche des Unternehmens konkrete Vorgaben hinsichtlich der geforderten Kapazitäten und Arbeitszeiten festgelegt. Der Simulationsexperte ist nun gefordert, detaillierte Kapazitätsziele (Taktzeiten, Nutzungsgrade, ggf. Entkopplungsgrößen) für die spezifischen Fertigungsbereiche zu definieren.

Aufgrund der Erfahrung mit der aktuellen Auslegung der Anlagen, die in den meisten Fällen schon simuliert worden sind, kann der Simulationsexperte hier relativ einfach geeignete Zielvorgaben ableiten. Bei Neuprojekten können auch Erfahrungswerte aus den bisherigen Studien für die Definition der Zielvorgaben herangezogen werden.

Die festgelegten Kapazitätsziele werden neben anderen Festlegungen in einer sogenannten Programmspezifikation dokumentiert. Diese Spezifikation ist bindend für den weiteren Projektverlauf.

### **5.2.3 Meilenstein 3 – Programmbestätigung**

Im Vorfeld zu diesem Meilenstein wird eine ausführliche Detailplanung durchgeführt. Der Simulationsexperte hält hier engen Kontakt zu den beteiligten Abteilungen und Entwicklungspartnern. Es ist wichtig, die Simulation immer auf dem aktuellen Stand zu halten und Erkenntnisse aus der Simulation auch wieder direkt in die Konzepte einfließen zu lassen. Die Erstellung einer detaillierten Dokumentation aller Eingangsdaten und der daraus resultierenden Simulationsergebnisse ist notwendig, um zwischen Planern und Simulationsexperte eine verbindliche Grundlage für die Zusammenarbeit zu schaffen. Mit Abschluss dieser Phase liegen alle Informationen vor, die durch eine Ausschreibung zu einer finanziellen Bewertung des Gesamtprojektes verwendet werden. Im positiven Fall erlangt das Projekt jetzt die Genehmigung durch das Senior-Management.

---

## 5.2.4 Meilenstein 4 – Planungen nach der Programmbestätigung und Start der Serienproduktion

In der Regel werden im Anschluss an die „Programmbestätigung“ Anlagenbauer mit der Errichtung der Produktionssysteme beauftragt. Sie übernehmen die angefertigten Unterlagen sowie die Verantwortung für die Folgeplanung und die Simulation. Intern wird die von den Anlagelieferanten durchgeführten Simulationen in zyklischen Abständen geprüft. In einigen Fällen werden Teilmodelle unterschiedlicher Lieferanten zu Gesamtmodellen zusammengesetzt, um das Gesamtzusammenspiel verschiedener Bereiche zu bewerten.

Das Einbeziehen der Anlagelieferanten in die Simulation ist ein wichtiger Schritt, um für die Anlagenabnahme auf eine gemeinsam akzeptierte Grundlage zurückgreifen zu können. Eine spezielle Simulationsspezifikation regelt hierbei eine einheitliche Vorgehensweise zur Anlagenbewertung, Modellerstellung und Dokumentation der Simulation (Abb. 5.2).

---

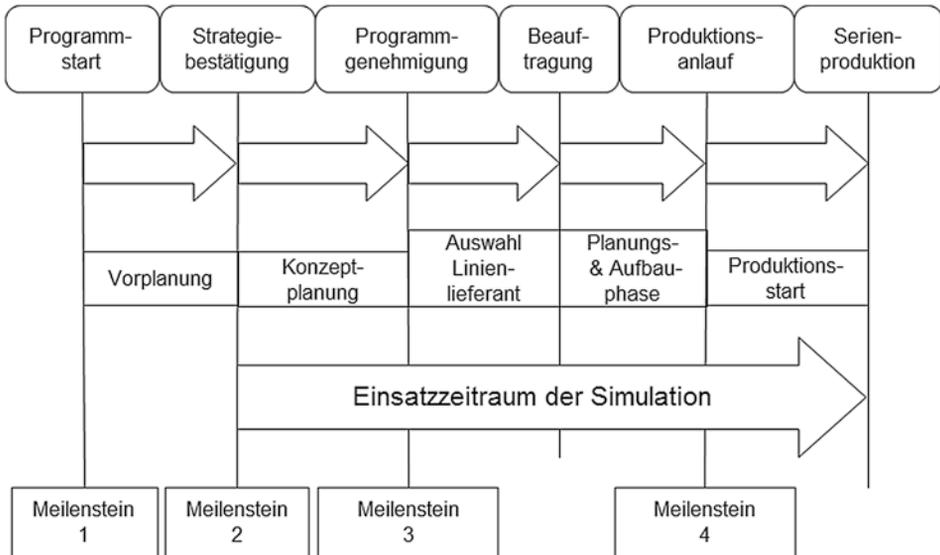
## 5.3 Standardisierung in der Simulation

Aus Abschn. 5.1 wird deutlich, dass die Simulation in unterschiedlichen Werken zyklisch immer wieder auf ähnliche Aufgabenstellungen stößt. Zudem unterliegt auch der Projektverlauf einem wiederkehrenden Muster. Dabei ist die Simulation in ein Planungsumfeld eingebettet, in dem auch Spezialisten aus anderen Fachgebieten und externe Partner die Annahmen und Resultate der Simulation verstehen müssen (siehe Abschn. 5.2).

Problematisch ist eine zu individualisierte Vorgehensweise des Simulationsexperten. Sie erschwert den Zugang zu den Studien. Dies hat wiederum zur Folge, dass die Akzeptanz der Planer hinsichtlich der Simulation leidet. Standardisierte Vorgehensweisen haben den Vorteil, dass Simulationskonzepte nicht immer neu festgelegt werden müssen. Die Dokumentation der Basisdaten kann auf einem Standard beruhen, der sich als zweckmäßig herausgestellt hat und auch über Jahre hinweg noch als wichtige Grundlage für Rückfragen oder neue Projekte dienen kann. Die Vorteile einer standardisierten Vorgehensweise gelten auch für die Erstellung des Simulationsmodells.

Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, bei jedem neuen Projekt zu prüfen, ob eine vergleichbare Studie bereits angefertigt wurde. Außerdem sollte es jedem Simulationsexperten wichtig sein, sein Projekt so zu bearbeiten und zu dokumentieren, dass er und auch andere noch nach Jahren die behandelte Aufgabenstellung und Modellierung verstehen und die Ergebnisse nachvollziehen und reproduzieren können.

Der Simulationsexperte erlangt durch seine Arbeit einen weiten Einblick in die Abläufe in seinem Unternehmen. Wenn es ihm gelingt, diese Informationen durch eine einheitliche und transparente Projektmethodik zu „konservieren“, wird das Wissen langfristig im Unternehmen verankert sein.



**Abb. 5.2** Programmmeilensteine

Erwähnt werden muss an dieser Stelle aber auch, dass ein stures Festhalten an Standards für den Fortschritt nicht dienlich ist. Henry Ford hat in seinem Buch (vgl. Ford 1926) dazu geschrieben:

“Today’s standardization ... is the necessary foundation on which tomorrow’s improvement will be based. If you think of “standardization” as the best you know today, but which is to be improved tomorrow – you get somewhere. But if you think of standards as confining, then progress stops.”

## 5.4 Simulation in der Fahrzeugendmontage

Mit zunehmender Automation und der anwachsenden Variantenvielfalt der Fahrzeuge steigt seit einigen Jahren auch im Bereich der Fahrzeugendmontage der Bedarf an Simulation; hieraus haben sich Aufgabenstellungen entwickelt, die regelmäßig in den Projekten wiederkehren.

Nachfolgend werden die Projekte detaillierter beschrieben, die in fast jedem (größeren) Fahrzeugprogramm gefragt sind und für die es sich bereits gelohnt hat, eine generelle Projektmethodik für alle Werke und Fahrzeugprogramme zu entwickeln.

### 5.4.1 Einsteuerung der lackierten Karossen in die Endmontage

Für die Produktion und auch die Logistik der Endmontage ist es ideal, die Fahrzeuge nach einer einmal definierten Sequenz durch die gesamte Prozesskette (Karosserie, Lack und Endmontage) zu steuern. Zum einen besteht die Möglichkeit, für die Logistik in der Endmontage die richtigen Teile ohne große Entkopplungen an den Montagebereichen bereitzustellen, da sie mit einer verlässlichen Angabe frühzeitig planen kann. Zum anderen lässt sich in einer solchen Sequenz auch auf die Restriktionen der jeweiligen Fertigungsbereiche eingehen. Eine Restriktion der Endmontage ist beispielsweise die Reihenfolge unterschiedlicher Ausstattungsumfänge der Fahrzeuge. Die Forderung zu einer gleichmäßigen Durchmischung von Fahrzeugen mit hohem und niedrigem Ausstattungsumfang hilft bei der Umsetzung eines effizienten Produktionskonzeptes. Damit kann auf einen Überhang an Werkern oder zusätzliche Entkopplungen verzichtet werden. Die Berücksichtigung aller Restriktionen der einzelnen Fertigungsbereiche ist schwierig, vor allem da es auch zu widersprüchlichen Forderungen kommen kann.

Die Einhaltung der Ursprungssequenz durch den gesamten Produktionsprozess (Karosseriebau, Lack und Endmontage) ist darüber hinaus ohne weiteres nicht möglich. Während im Karosseriebau die Sequenz relativ gut eingehalten wird, ist im Lackierbereich schon mit größeren Verwirbelungen zu rechnen. Abb. 5.3 und 5.4, die den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangssequenz darstellen, zeigen das deutlich.

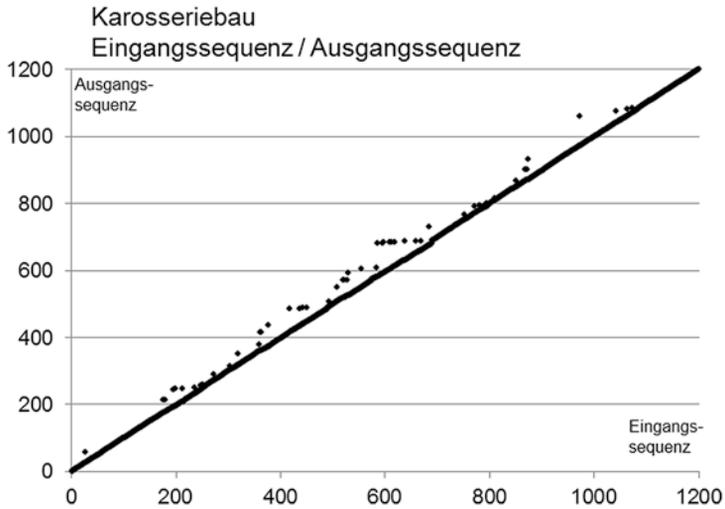
Während in dem Diagramm zum Karosseriebau fast alle Datenpunkte sehr dicht an der idealen Geraden liegen, ist beim Lack eine viel größere Streuung zu erkennen. Dies ist durch einen höheren Anteil an Nacharbeit, aber auch durch spezielle Lackprozesse (Mehrfachlackierungen) begründet. Karossen durchlaufen bestimmte Bereiche im Lack mehrfach oder folgen spezifischen Prozessen, die nicht im Hauptfluss durchgeführt werden. Somit ist es nur bedingt möglich, eine durchgängige Bausequenz für alle Fertigungsbereiche aufzusetzen und diese im Produktionsprozess beizubehalten.

Zusammenfassend können daher folgende Aspekte benannt werden:

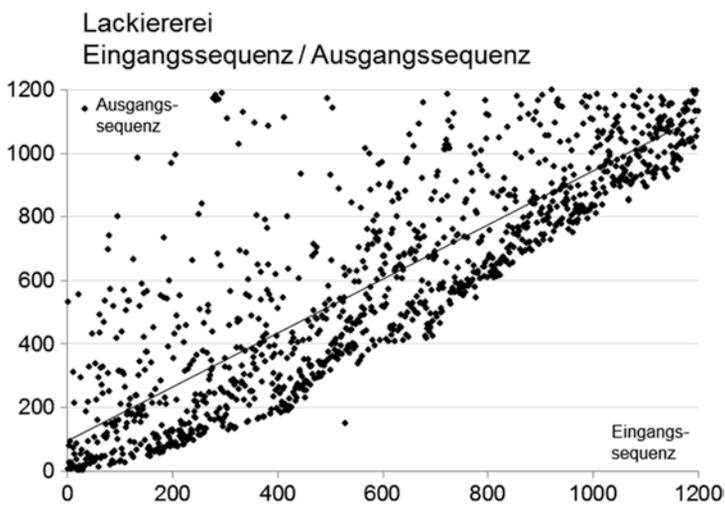
- Die Logistik der Endmontage profitiert von einer verlässlichen Sequenz.
- Alle Bereiche haben eigene spezifische Restriktionen, für die es ideale Baureihenfolgen gibt.
- Die Lackiererei verwirbelt die Eingangssequenz aus diversen Gründen signifikant.
- Um für die Endmontage eine effiziente Produktion zu ermöglichen, ist eine Aufbereitung der Sequenz hinter der Lackiererei notwendig.

Daher ist in allen Automobilwerken hinter der Lackiererei eine größere Entkopplung vorhanden, die neben ihrer Grundfunktion auch dafür eingesetzt wird, eine möglichst ideale Sequenz für die Endmontage zu generieren.

In diesem Bereich wird die Simulation dafür eingesetzt, die ideale Größe dieses Sortierstapels zu ermitteln und geeignete Steuerungsstrategien zur Ein- bzw. Auslagerung von lackierten Karossen aus dem Entkopplungssystem zu entwickeln.



**Abb. 5.3** Sequenzverwirbelung Karosseriebau



**Abb. 5.4** Sequenzverwirbelung Lackiererei

### 5.4.2 Entkopplungen zwischen automatischen und manuellen Produktionsstationen

Die Fahrzeugendmontage ist im Wesentlichen von manuellen Arbeitsstationen geprägt. Es gehört aber mittlerweile auch zum Standard, dass einige Prozesse teil- bzw. voll automatisiert durchgeführt werden. Hierzu zählen unter anderem der vollständige Einbau des Antriebsstrangs, der Einbau der Scheiben oder auch die Montage der Räder.

Während die Austaktung der manuellen Arbeitsbereiche Aufgabe des Ingenieurs für Arbeitsplanung ist, ist die Ablaufsimulation das geeignete Instrument, die Interaktion der manuellen und automatischen Stationen zu untersuchen und sinnvolle Entkopplungsgrößen sowie Taktzeiten für die Automation zu definieren.

Hierzu ist es, ähnlich wie bei Projekten im Karosseriebau, zunächst notwendig, die Komplexität der Automation zu bewerten:

- Welche Teilkomponenten werden eingesetzt?
- Welche Anzahl von Komponenten ist erforderlich?
- Welche Auslastung haben die Komponenten?

Aus Erfahrungswerten über bereits im Einsatz befindliche Komponenten hinsichtlich Ausfallhäufigkeit (Intervall) und Ausfallverhalten (Dauer) wird ein zu erwartendes Verhalten der zu bewertenden Einrichtung ermittelt. Zudem werden auch für die vor- und nachgelagerten manuellen Arbeitsbereiche Kenngrößen definiert oder übernommen. Hierzu zählen beispielsweise Taktzeit, Taktzeitschwankungen und Störverhalten (Kurzzeitstörungen).

Im Rahmen der Simulation werden diese Daten in einem Modell verarbeitet und eine möglichst gute Konfiguration aus Entkopplungsgröße und Taktzeit ermittelt. Sogenannte Pufferkennlinien, die in aller Regel einen Sättigungswert ausweisen, zeigen die Abhängigkeit von Puffergröße und Durchsatz.

### **5.4.3 Auslegung von Transportumlaufsystemen im Bereich der Logistik**

In allen Werken werden Komponenten, die in der Endmontage in den Fahrzeugen verbaut werden, von extern zugeführt. Zu einem großen Anteil wird dies über eine Elektrohängebahn (EHB) realisiert, die den sogenannten Lieferantepark mit den Montagesystemen der Endmontage verbindet. Zu den Lieferkomponenten gehören zum Beispiel Wärmetauscher, Abgasanlagen, Kraftstofftanks, Kabelbäume, Mittelkonsolen, Instrumententafeln, Achsen, Stoßdämpfer oder auch Verkleidungsteile. Da die Komponenten von unterschiedlichen Herstellern angefertigt werden, erfolgt die Kommissionierung in verschiedenen Gebäuden oder Bereichen. Die Transportgehänge sind auf die unterschiedlichen Komponenten abgestimmt, damit Qualitätsanforderungen erfüllt und eine bestmögliche Packungsdichte erzielt werden kann.

Abb. 5.5 zeigt beispielhaft die Beladebereiche einer solchen EHB und die Fahrstrecken zu den Bereichen TRIM und Chassis. In diesen Bereichen befinden sich weitere weit verzweigte Fahrstrecken, über die die EHB-Gehänge zu den Abnahmestellen gelangen sowie den Rückweg zum Beladebereich finden. Das gesamte EHB-System bildet damit einen geschlossenen Kreislauf. Auf eine Abbildung der EHB-Streckenverläufe in den Bereichen TRIM und Chassis wird aus Vereinfachungsgründen verzichtet.

Die Transportgehänge stehen vor den Beladebereichen (Lieferanten) bereit. Durch ein Leitsystem der Endmontage erhalten diese Bereiche Informationen über die Sequenz der Fahrzeuge, die in nächster Zeit an den Montagestellen zu erwarten sind. Die Kommissionierung in den einzelnen Beladebereichen sorgt dafür, dass die spezifischen Teile in die Leergehänge eingelegt werden. Im Anschluss daran fährt das Gehänge selbstständig zum Montageort, wird dort entladen und tritt seine Rückfahrt zum Beladeort an. Die Steuerung des EHB-Systems trägt dafür Sorge, dass die Gehänge richtig geroutet, Vorfahrtsregeln an den Weichen (runde Symbole) eingehalten und Blockaden verhindert werden.

Die Hauptaufgaben des Transportsystems beziehen sich darauf, dass

- alle Montagestellen zu jeder Zeit mit den richtigen Komponenten versorgt werden und
- das System robust genug ist, um auch bei geänderten Variantenmix die geforderte Versorgung sicherzustellen.

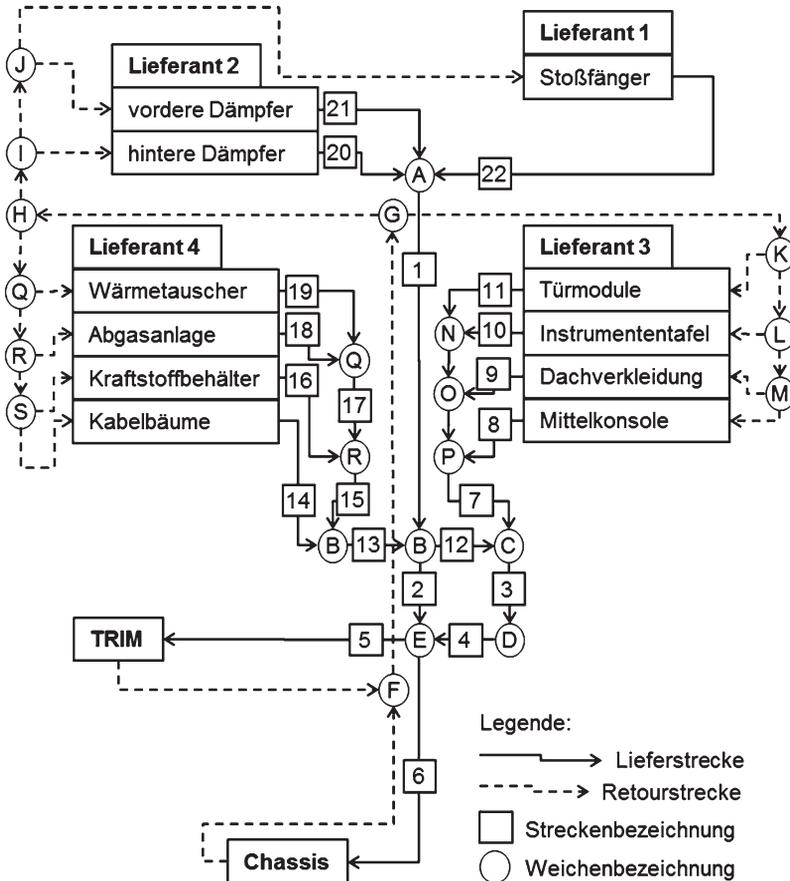


Abb. 5.5 Schematische Darstellung des EHB-Verlaufs

Die Ablaufsimulation ist in diesem Rahmen das geeignete Tool, das die komplexen Zusammenhänge abbilden und damit die Planung mit gesicherten Erkenntnissen unterstützen kann. Die Variation der Eingangsdaten (z. B. geänderter Produktmix in der Fahrzeugmontage) ermöglicht es außerdem, die Grenzbereiche des Systems zu ermitteln und Engpässe frühzeitig zu erkennen.

Die Projektziele der Simulation im Rahmen der Auslegung dieses Systems sind:

- Ermittlung der notwendigen Anzahl unterschiedlicher selbstfahrender Gehänge
- Dimensionierung von Pufferstrecken
- Definition von Steuerungsregeln zum Routing der Gehänge
- Ausweisen potenzieller Engpassbereiche
- Ermittlung der Systemgrenzen durch Variationen der Eingangsdaten wie Produktmix in der Endmontage oder die Packungsdichte der Teile in den Gehängen

Zu Beginn wird ein Strukturdiagramm des EHB-Systems erstellt (siehe Abb. 5.5), mit dessen Hilfe zum einen eine transparente Datensammlung ermöglicht und zum anderen eine abstrahierte Vorlage für das Simulationsmodell geschaffen werden.

In einer Matrix (vgl. Abb. 5.6) werden Kapazitätsdaten (maximale Anzahl Gehänge und Durchlaufzeit) der jeweiligen Strecken zusammengetragen und den spezifischen Transportgehängen ein Ablauf über die entsprechenden Streckenabschnitte zugeordnet.

Darüber hinaus wird noch die Anzahl der Komponenten, die je spezifischem Carrier-Typ geladen werden kann, benötigt. In Abb. 5.7 ist auch dokumentiert, mit welchem Minimalintervall die Komponenten abgerufen werden könnten.

Aus dieser Datensammlung können durch eine statische Vorbetrachtung bereits erste Aussagen getroffen werden.

Durch die Zuordnung der Kapazität je Gehängentyp zu den zu durchlaufenden Strecken kann bereits eine notwendige Transportkapazität pro Streckenabschnitt ermittelt werden. Das Verhältnis von notwendiger Kapazität/Strecke und installierter Kapazität/Strecke ergibt die Auslastung (vgl. Abb. 5.6). Darüber hinaus ergibt die Summierung der Transportzeiten für eine Leer- und eine Vollfahrt zusammen mit der Flussrate die minimale Anzahl der Gehänge pro Typ. Diese statischen Betrachtungen sind aber nur als Ergänzung zur Datenbeschaffung zu sehen. Letztendlich kann hiermit noch keine Aussage über die Verhaltensweisen des Transportsystems getroffen werden, das dynamischen Belastungen ausgesetzt ist. Die Auf- und Abgabestellen werden in der Praxis niemals mit gleichem Takt arbeiten, und auch die Belastungen der Streckenabschnitte sind nicht gleichmäßig über den Tag verteilt. Zudem kann auch noch keine Aussage über die Art der Steuerung definiert werden.

Eine Abbildung des EHB-Systems in einem Simulationsmodell ist erforderlich, um konkrete Ergebnisse hinsichtlich der Belastung der EHB-Streckenabschnitte und der erforderlichen Gehängeanzahl liefern zu können. Diese Angaben sind notwendig, um eine lückenlose Versorgung des Montagebereichs mit Montageteilen zu gewährleisten.

Strecken- daten			Streckennutzung					statische Auswertung		
Strecke	Anz. Gehänge	Laufzeit [Sek.]	Stoß- fänger	Kraftstoff- behälter	Abgas- anlage	Wärme- tauscher	Dämpfer	benötigte Flußrate	vorhandene Flußrate	Auslastung [%]
			Nutzung	Nutzung	Nutzung	Nutzung	Nutzung			
			Gehänge pro Stunde	Gehänge pro Stunde	Gehänge pro Stunde	Gehänge pro Stunde	Gehänge pro Stunde			
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										

Abb. 5.6 Statische Kapazitätsanalyse

	Sets / Gehänge [Autos]	Taktzeit / Auto [Sek.]	Flussrate [Gehänge / Std.]
Stoßfänger			
Vordere Dämpfer			
Hintere Dämpfer			
Wärmetauscher			
Abgasanlage			
Kraftstoffbehälter			

Abb. 5.7 Grunddaten

#### 5.4.4 Gesamtkapazitäts- und Engpassanalysen

Die vorangestellten Projekte zeigen gängige Aufgabenstellungen für die Simulation im Bereich der Planung für die Fahrzeugendmontage. Wie in den Bereichen Karosseriebau und Lackieranlagen ist es auch hier notwendig, das Zusammenspiel der verschiedenen Bereiche zu untersuchen.

Für jeden Hersteller ist es von Bedeutung, dass Investitionen in Einklang zu einem zu erzielenden Produktionsvolumen stehen müssen. Schafft ein geplantes System nicht den geplanten Ausstoß, besteht Gefahr für die Wirtschaftlichkeit der Produktion. Letztendlich kann nur eine Gesamtbetrachtung der Bereiche eine Aussage darüber liefern, ob der geforderte Ausstoß erreicht wird.

Hierbei ist es wichtig, sowohl Engpässe als auch Bereiche mit Überkapazitäten zu identifizieren. Es besteht dabei immer die Zielsetzung ein balanciertes System zu entwickeln, bei dem die Kapazitäten in den verschiedenen Bereichen ausgewogen und aufeinander abgestimmt sind. Bereiche mit Überkapazitäten haben in der Regel einen negativen Einfluss auf die Kosten aber selten einen Nutzen für eine höhere Kapazität.

Das Gesamtsystem der Endmontage setzt sich aus Teilsystemen zusammen, wie sie in Abschn. 5.4.1 bis 5.4.3 beschrieben werden. Für das Gesamtsystem gelten die gleichen Optimierungskriterien wie für die Teilsysteme. Es hat sich als sinnvoll herausgestellt, für die Teilumfänge Leistungsdefinitionen zu treffen und die Planungen und Verbesserungen daran auszurichten. Im Anschluss der Planung der Teilsysteme muss das Gesamtmodell zusammengetragen werden. Eine modulare Simulationsmodellstruktur ermöglicht eine einfache Migration der Teilmodelle. Im Gesamtmodell können dann die weiteren Analysen durchgeführt werden, die unter Umständen weitere Verbesserungen in den Teilmodellen zur Folge haben.

Auch für ein EHB-Teilprojekt werden Daten aus dem Gesamtmodell erhoben, um eine isolierte Untersuchung des EHB-Systems zu ermöglichen (z. B. Daten über das dynamische Verhalten der Montagestellen).

Eine Kopplung des Gesamtmodells der Endmontage mit den Modellen aus den Abschn. 5.4.1 bis 5.4.3 wird bei Bedarf erst zu einem späteren Zeitpunkt vollzogen, um die Modelle und Einflussparameter überschaubar zu halten. Diese Kopplung ermöglicht es, die komplexen Zusammenhänge im Gesamtkontext zu bewerten und das Projekt Endmontage final abzusichern.

---

### 5.5 Schlussbetrachtung

In der Automobilindustrie und auch spezifisch für deren Endmontagebereiche gibt es für die Ablaufsimulation ein reichhaltiges und auch nachhaltiges Betätigungsfeld. FORD Europa betreut derzeit zehn verschiedene Modellreihen vom Ford Fiesta bis zum Ford Ranger. Die Produkte werden zyklisch einem Erneuerungsprozess unterzogen. Dadurch ist es notwendig, dass Planungsarbeiten für die derzeit fünf verschiedenen Produktionsstandorte in regelmäßigen Abständen ausgeführt werden.

Diese Planungen haben im Detail sicherlich individuelle Prägungen, jedoch generiert jedes neue Fahrzeugprogramm in der Regel ähnliche Aufgabenstellungen für die Simulation.

Das Gesamtprojekt wird durch einen definierten Entwicklungszeitplan gelenkt. Dieser ist notwendig, um die Zusammenarbeit der verschiedenen Bereiche im Unternehmen sinnvoll zu koordinieren. Die Ablaufsimulation orientiert sich ebenfalls an diesem Zeitplan und liefert zu definierten Zeitpunkten ihren Projektbeitrag.

Die Erstellung komplexer Simulationsmodelle und die Durchführung von Simulationsstudien erfordern eine spezielle Expertise, die nur von technischen Spezialisten auf dem Gebiet der Simulation geleistet werden kann. Es ist aber auch absolut notwendig, dass Fabrik- und Prozessplaner an Simulationsstudien mitarbeiten, die Inhalte verstehen, Vertrauen zu den Ergebnissen haben und letztendlich die Erkenntnisse umsetzen. Ebenso müssen auch Partner wie externe Dienstleister, Anlagenbauer und auch die Kollegen aus den Produktionswerken in gleicher Weise eingebunden werden.

Um den Ansprüchen aller Seiten gerecht zu werden, sollte der Simulationsexperte eine einheitliche und transparente Projektmethodik etablieren, die einen Leitfaden für alle Projekte darstellt. So ist es von großem Nutzen, für jede Projektart eine standardisierte Vorgehensweise zu entwickeln, um Synergien für zukünftige Aufgabenstellungen zu generieren und den Projektpartnern den Zugang zur Simulation zu erleichtern.

Das Simulationstool und die Art der Modellierung spielen ebenfalls eine wichtige Rolle, um die Akzeptanz für die Simulation zu erhalten oder sogar zu verbessern. Bei der Software bietet es sich an, darauf zu achten, dass sie eine hohe Verbreitung auf dem Weltmarkt hat. Es ist wichtig, dass jeder Lieferant von Produktionsanlagen oder Entwicklungspartner den FORD-Standard erfüllen und sich bei Bedarf auch Beratungskompetenz in seinem Heimatland einkaufen kann.

Zudem sollte die Simulationssoftware robust gegen Abstürze und hinsichtlich ihrer Funktionalität ausgereift sein, damit die Arbeit mit dem Werkzeug möglichst ohne ungewünschte Zusatzaufwendungen ausgeführt werden kann. Darüber hinaus müssen die Weiterentwicklung der Software und hierbei insbesondere die Anpassung auf die sich ändernden Rechner- und Betriebssysteme sichergestellt sein.

Weltweit gibt es eine Vielzahl an Softwarepaketen, die diesen Anforderungen in unterschiedlicher Form gerecht werden.

Bei der Modellierung setzt FORD bei seinem Standard auf eine möglichst abstrakte und an der Aufgabenstellung orientierte Vorgehensweise. Unnötige Detaillierungen und verkomplizierte Programmierungen sind unerwünscht und werden bei sogenannten Modellüberprüfungen identifiziert. Das kann zur Folge haben, dass Modelle nicht anerkannt und nachgearbeitet werden müssen. Um der Forderung einer transparenten Modellierung Nachdruck zu verleihen, wird bei FORD lediglich die Verwendung der Basisbausteine (Teil, Lager, Maschine, ggf. Förderer oder Schichtpläne) des Simulationswerkzeugs akzeptiert. Es hat sich gezeigt, dass hiermit alle Aufgabenstellungen zur vollsten Zufriedenheit erfüllt werden können und auch noch nach Jahren eine gute Modelltransparenz gegeben ist.

Ein guter Simulationsexperte zeichnet sich nicht dadurch aus, dass er komplexe und aufwendige Strukturen komplex und aufwendig programmieren kann, sondern dadurch, dass er diese auf das Wesentliche abstrahieren und für andere transparent darlegen kann.

Weiterhin gibt es für die Ablaufsimulation noch Aufgabengebiete zu erschließen und Potenziale für das Unternehmen auszuschöpfen. Aus Innovationen müssen Standards entwickelt werden, damit das Erreichte auch für die Zukunft erhalten bleibt und die Simulation auf einem stabilen Fundament steht.

---

## Literatur

Ford H (1926) Today and tomorrow. Heinemann, London



**Joachim Opp** Von 1987 bis 1992 Studium des Maschinenbaus an der Bergischen Universität Wuppertal. 1992–1996 Berater für Ablaufsimulation bei AT&T Istel in Düsseldorf. Von 1996 bis 2001 Projekt- und Gruppenleiter für Ablaufsimulation bei der Fa. EDAG in Fulda und Köln mit Schwerpunkt Automobilproduktion. Seit 2001 technischer Spezialist für FORD Europa im Bereich Ablaufsimulation von Karosseriebauanlagen. Ab 2013 Abteilungsleiter Simulation und Steuerung, FORD Europa für die Bereiche Presswerk, Karosseriebau, Lackanlagen und Endmontage.



# Ablaufsimulation gekoppelt mit Arbeitsplatzsimulation im Bereich der Montage Automobilsitze

# 6

Heike Wilson und Karsten Wendt

## 6.1 Einleitung

Viele Fertigungsprozesse in der Automobil- bzw. Automobilzulieferindustrie zeichnen sich durch hohe Komplexität aus und benötigen daher im Vorfeld erstellte Ablaufpläne, d. h. Pläne, aus denen hervorgeht, welche Schritte zu welchen Zeitpunkten durch welche Maschinen und durch wie viele Mitarbeiterinnen bzw. Mitarbeiter (MA) umgesetzt werden, um einen reibungslosen und effizienten Ablauf zu gewährleisten. In diesem Kontext spielen sogenannte Mehrmaschinenarbeitsplätze (MMAP) eine wichtige Rolle. Diese Arbeitsplätze sind dadurch gekennzeichnet, dass MA mehrere statt nur eine Prozessstation gleichzeitig bedienen, um zum einen manche komplexe Fertigungsabläufe überhaupt erst zu ermöglichen und zum anderen die Arbeitseffizienz zu erhöhen. Auf diese Weise können z. B. Wartezeiten während der Prozessierung eines Werkstücks für weitere parallele Arbeitsschritte genutzt werden.

Der Einsatz von Mitarbeitenden an MMAP stellt im Hinblick auf komplexe Fertigungsprozesse besondere Anforderungen an die Ablaufplanung im Kontext der Enterprise Resource Planning (ERP) Software (vgl. Kurbel 2005, S. 200–203, 251–252). Es zeigt sich, dass konventionelle, d. h. ausschließlich auf statistischen Daten basierende, statische Planungsverfahren in bestimmten Szenarien, z. B. mit kontextabhängigen Reihenfolgen oder Dauern der MA-Tätigkeiten, nicht die erforderliche Qualität der Planung liefern können sowie nicht die notwendige Transparenz und Flexibilität zur Analyse der Ablaufplanung

---

H. Wilson  
DUALIS GmbH IT Solution, Dresden, Deutschland

K. Wendt (✉)  
Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland  
E-Mail: [karsten.wendt@tu-dresden.de](mailto:karsten.wendt@tu-dresden.de)

bzw. zur Optimierung dieser aufweisen. Durch die unzureichende Abbildung der Vernetzung aktueller Fertigungsprozesse und deren dynamischer Eigenschaften werden Probleme im Vorfeld zu spät bzw. Optimierungspotenziale nicht erkannt (Negahban und Smith 2014). Am Beispiel Faurecia, einem der weltweit größten Automobilzulieferer, wird im Folgenden ein simulationsbasierter Planungsansatz gemäß VDI (2001) auf der Basis der Simulationssoftware 3DCreate vorgestellt.

Abschn. 6.1.1 beschreibt im Folgenden das bestehende Problem allgemein und damit die Motivation zur vorliegenden Arbeit. Abschn. 6.1.2 stellt den entwickelten Lösungsansatz vor. Anschließend sind in Abschn. 6.2 die verwendeten Daten, Werkzeuge sowie die Methodik zur Modellerstellung, -validierung und -optimierung erläutert. Abschn. 6.3 stellt die erzielten Ergebnisse bestehend aus neuen Simulationskomponenten und deren Anwendung sowie die dadurch erreichten Verbesserungen und Erkenntnisse vor. Abschließend sind in Abschn. 6.4 die zusammengefassten Ergebnisse der Arbeit diskutiert und weitere Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.

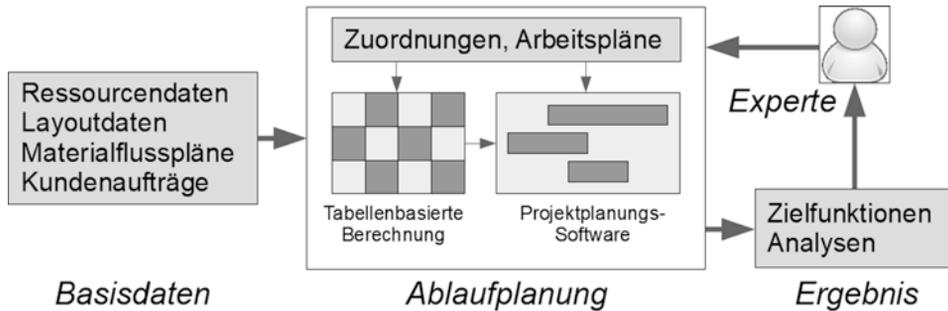
### 6.1.1 Motivation

Wie einführend dargestellt wird für den Einsatz von MMAPn in komplexen Prozessketten eine im Vorfeld zu erstellende Ablaufplanung benötigt, die im Allgemeinen wie folgt beschrieben werden kann (vgl. Kurbel 2005, S. 178–180; Wolsey und Nemhauser 2014): Gesucht ist eine Zuordnung von Mitarbeitenden zu Ressourcen (Maschinen oder Arbeitsplätzen) und dedizierten Handlungssequenzen (Arbeitsplänen) unter Berücksichtigung mehrerer Optimierungsziele, z. B. Durchsatzmaximierung oder Kostenminimierung, und unter Einhaltung mehrerer Nebenbedingungen, z. B. Kapazitätsgrenzen und Prozessbeschränkungen. Formalisiert kann die gesuchte Ablaufplanung als Relation

$$P := M \times R \tag{6.1}$$

beschrieben werden, wobei  $M$  alle zu planenden MA und  $R$  die Gesamtheit aller verfügbaren Ressourcen innerhalb der MMAP und die zu erstellenden Arbeitspläne sind. Dabei ist eine Relation der Art gesucht, dass gegebene Zielfunktionen wie Kosten oder Durchsatz optimiert und Nebenbedingungen beachtet werden. Die Suche nach bzw. die Optimierung von  $P$  kann daher als kombinatorisches Mehrzieloptimierungsproblem (MOO) klassifiziert werden (Ehrgott 2005, S. 7–8). Der Rechenaufwand für Probleme dieser Problemklasse (vgl. Blazewicz et al. 1996) ist bei typischen Problemgrößen so hoch, dass in vertretbarer Zeit keine exakten, d. h. optimalen Lösungen möglich sind. Daher kommen sogenannte heuristische Methoden zum Einsatz kommen. Übliche Verfahren der heuristischen MOO sind sogenannte Lokale Suchen, wie z. B. Gradientenverfahren, die Lösungen schrittweise verbessern, oder Evolutionäre Algorithmen (vgl. Marler und Arora 2004).

In der Praxis kommen diese Techniken allerdings aufgrund der Komplexitäten von  $P$  und der Zielfunktionen bei der Ablaufplanung von MMAPn selten zum Einsatz, sodass,



**Abb. 6.1** Konventionelle Ablaufplanung von MA-Kapazitäten auf der Basis von Standard-Softwaretools

wie am Beispiel Faurecia, vorwiegend halbautomatische Verfahren Verwendung finden: Wie in Abb. 6.1 illustriert, erstellt ein Experte auf der Grundlage von Stammdaten von Ressourcen, Layouts und Materialflussplänen (engl. Material Flow Chains, MFC) sowie aktuellen Auftragsinformationen mit Hilfe von Standardsoftware für Tabellenkalkulationen (z. B. Microsoft Excel) und Projektplanungen (z. B. Microsoft Project) die gesuchte Relation  $P$  von Mitarbeitenden zu MMAPn und Arbeitsplänen. Durch Analysen dieser Relationen durch Kennwerte und Schätzungen und nachfolgender Anpassung der Ablaufplanung wird  $P$  iterativ verbessert.

Bewertend lässt sich für dieses Verfahren konstatieren, dass einerseits durch die Nutzung von Standardsoftware zwar eine hohe Portabilität und hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten erzielbar sind, andererseits die Modellierung der Zielfunktionen und Nebenbedingungen aufgrund ihrer Komplexitäten nur eingeschränkt möglich ist. Der Durchsatz einer Mehrmaschinenarbeitsplatz-Produktionsstrecke hängt z. B. von den Arbeitsgeschwindigkeiten der Maschinen und MA, deren Fehler- und Ausfallwahrscheinlichkeiten und den daraus resultierenden sich fortpflanzenden Effekten, sowie den Bewegungspfaden der MA und der Werkstücke, als auch den Prozesstoleranzen, den Arbeitsplänen, dem Anlaufverhalten der Produktionsstrecke und weiteren Faktoren ab und ist daher durch eine einfache Modellierung mit Hilfe von Mittelwerten und Varianzen nicht ausreichend beschreibbar. In Folge dieser einfachen Modellierung ist die Aussagekraft dieser Analysen gering, d. h., die Qualität der erstellten Ablaufplanung ist nur eingeschränkt evaluiert und der Einfluss einzelner Faktoren intransparent. So wird die iterative Optimierung für Experten erschwert. Tab. 6.1 stellt die Vor- und Nachteile der konventionellen Ablaufplanung gegenüber.

Der konventionelle halbautomatische Ansatz ist demnach nur bedingt für die gezielte Optimierung von Ablaufplänen geeignet. Es ist ein erweiterter Ansatz erforderlich, der die Auswirkungen einzelner Planungsaspekte auf die Zielfunktionen genauer abbildet, somit deren Einfluss transparenter macht, die Qualität der Ablaufplanung besser beschreibt und so zielgenaue Optimierungsschritte ermöglicht. Im Folgenden wird ein simulationsbasierter Ansatz zur Ablaufplanung vorgestellt.

**Tab. 6.1** Gegenüberstellung Vor- und Nachteile der konventionellen Ablaufplanung von Mitarbeitenden an MMAPn

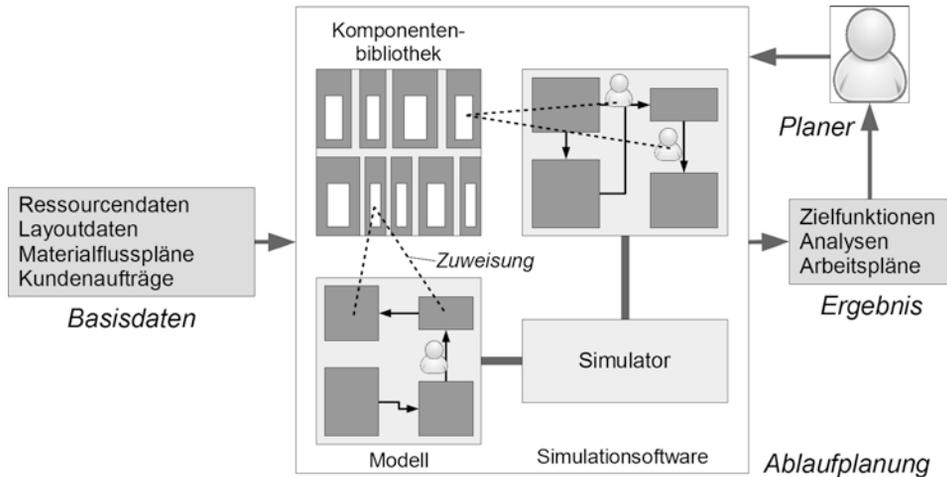
Vorteile	Nachteile
Standard-Softwarewerkzeuge, d. h. gute Portierbarkeit	statisch, keine dynamischen Vorgänge, eingeschränkte Fehler- und Ausfallbetrachtungen
Einfach beherrschbar/geringe Einarbeitung	Anlaufverhalten nicht modellierbar
hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit	geringe Aussagekraft durch eingeschränkte Modellierungsmöglichkeiten
	Einfluss von Einzelfaktoren intransparent
	Expertenwissen zur Optimierung notwendig

### 6.1.2 Konzept für erweiterten Ansatz der Ablaufplanung

Mit Hinblick auf die genannten Vor- und Nachteile des konventionellen Planungsansatzes können die Anforderungen an ein erweitertes Konzept wie folgt formuliert werden (in Anlehnung an Kurbel 2005, S. 4–12):

- Evaluation einzelner MA-Zuordnungen und Parameter des Modells wie Geschwindigkeiten, Ausfälle, Fehler, Pfade oder Prozessparameter in Bezug auf die zu optimierenden Zielfunktionen, d. h. auf Messgrößen wie Durchsatz, längster Arbeitsschritt, Auslastung, Engpässe oder Kollisionen,
- Beachtung aller Nebenbedingungen, d. h. Berücksichtigung von Kapazitäten, Maximalgeschwindigkeiten, Zeit- und Prozessbeschränkungen,
- erweiterte Einflussnahme durch Planer, d. h. manuelle und vereinfachte Änderung von Zuweisungen von Mitarbeitenden zu MMAPn, Arbeitsschritten an einzelnen Ressourcen, Maschinenpositionen, Pfaden, Prozessparametern,
- Extraktion der sich ergebenden Arbeitspläne,
- effiziente Simulationstechnologie, da durch den Ansatz der schrittweisen Optimierung vergleichsweise häufig Änderungen von Einzelfaktoren erfolgen und damit Zielfunktionsevaluierungen notwendig werden, was eine schnelle Simulation und Analyse erforderlich macht.

Als erweitertes Konzept wird daher eine simulationsbasierte Ablaufplanung vorgeschlagen (vgl. Kellner et al. 1999), in welcher die Evaluierung der Zielfunktionswerte nicht mehr auf statistischen Angaben beruht, sondern durch ereignisdiskrete Ablaufsimulationen erhoben wird. Auf diese Weise wird der Einfluss aller Einzelfaktoren auf die Messgrößen transparent, der Planer benötigt weniger implizites Expertenwissen, um Analysen der Ablaufplanung (in Form aufbereiteter Simulationsergebnisse) zu interpretieren und kann so die Ablaufplanung gezielt und iterativ verbessern. Abb. 6.2 illustriert dieses Konzept. Die Ablaufplanung beruht nun auf Simulationskomponenten, die MA sowie MMAP umfassen, (vgl. VDI 2001) und zusammen mit anderen Komponenten wie Ressourcen, Flussobjekten (Werkstücken) oder Pfaden in ein Modell eingebunden sind. Durch die



**Abb. 6.2** Erweitertes Konzept zur simulationsbasierten Ablaufplanung von MA und MMAP

Simulation der Ablaufplanung werden die Zielfunktionen evaluiert, der Zusammenhang zwischen dem Einsatz von Mitarbeitenden und den resultierenden Ablaufplänen und Optimierungszielen wird validierbar und analysierbar.

Im Folgenden und anhand Abb. 6.3 ist die Anwendung der simulationsbasierten Ablaufplanung auf ein schematisches Beispiel von Faurecia aus der Automobilzulieferindustrie dargestellt. Die Simulationskomponenten basieren auf importierten, weitestgehend unveränderlichen Basisdaten, die Stammdaten für die Ressourcen und Flussobjekte sowie die MFC umfassen. Eine angepasste Komponentenbibliothek für die grundlegende Verhaltensmodellierung stellt Simulationsobjekte (Ressourcentyp  $R_{1-3}$ , Flussobjekttyp  $F_{1,2}$  und MA-Typ $_1$ ) zur Verfügung, die mit den Basisdaten instanziiert werden und zusammen mit weiterhin importierten Layout- und Kundendaten (Produktmix) die eigentlichen Simulationsmodelle darstellen. Im Beispiel werden zwei verschiedene MMAP mit fünf bzw. drei Maschinen modelliert, denen jeweils ein Mitarbeitender zugeordnet ist.

Neben Arbeits- und Produktionsplänen liefert die Simulation Analysen der Simulationsmodelle hinsichtlich der zu optimierenden Zielfunktionen, z. B. die Auslastungsverteilung kritischer Ressourcen oder die größte und durchschnittliche Lebensdauer der Flussobjekte, auf deren Basis der Planer iterativ Anpassungen an den Modellen (Zahnrad-symbole) vornimmt, um sich so einem Optimum schrittweise zu nähern. Hervorzuheben sind die ebenfalls als komplexe Simulationsobjekte eingebundenen MA, die autonom erforderliche Aktionen innerhalb von MMAPn ausführen können, sodass anschließend automatisch erstellte Arbeitspläne exportierbar werden.

Auf diese Weise wird eine virtuelle Experimentierplattform erzeugt, die es ermöglicht, mit weniger implizitem Expertenwissen und ohne einfache Abschätzungen auf statistischen Werten die Auswirkungen von einzelnen Zuweisungs- oder Parameteränderungen zu evaluieren und damit die Ablaufplanung schrittweise anzupassen oder verschiedene Planszenarien zu testen.



## 6.2 Methoden und Materialien

Im Weiteren beschreiben Abschn. 6.2.1 und 6.2.2 die genutzte Software, die Eingangsdaten als Basis der Modelle, sowie die evaluierten Messgrößen für die nachfolgende Analyse. Anschließend stellt Abschn. 6.2.3 die genutzte Vorgehensweise zur Erstellung, Validierung, Analyse und Optimierung von Ablaufplänen auf Simulationsbasis dar.

### 6.2.1 Werkzeuge und verfügbare Daten

Als Softwarewerkzeuge werden zum einen das ereignisdiskrete Simulationsprogramm 3DCreate, des Unternehmens Visual Components verwendet. Zum anderen dient die Tabellenkalkulation Excel von Microsoft zur Datenvor- und -nachbearbeitung.

Aus den CAD-Daten der Ressourcen bzw. aus bereitgestellten Geometrien des Simulationsprogramms werden zusammen mit Verhaltensbeschreibungen, z. B. in Form von Zustandsdiagrammen, die Elemente der Komponentenbibliothek als Modellgrundlage erstellt. Die entstehenden Komponenten werden durch Parameter, z. B. Geschwindigkeiten, Ausfallraten oder Zuordnungen, ergänzt, was individuelle Verhaltensanpassungen der späteren Simulationsobjekte ermöglicht.

Eine weitere Grundlage sind die MFC (siehe oben) der Produkte (Werkstücke), welche die Prozesse und somit die Wege der Flussobjekte durch das Modell beschreiben und das Verhalten der Ressourcen- und MA-Komponenten steuern. Tab. 6.2 zeigt die allgemeine Form eines MFCs als Matrix für einen Flussobjekttyp bestehend aus  $n$  Prozessschritten auf verschiedenen Maschinen mit jeweils  $m$  Parametern. Die hier dargestellte Matrixnotation wird in dieser Form zur Modellierung von Prozessabläufen als Import für das Simulationswerkzeug 3DCreate verwendet.

Jede Spalte der Matrix beschreibt einen Prozessschritt für ein Flussobjekt, also z. B. Prozessstation<sub>2</sub> oder Roboter<sub>3</sub>, die Zeilen beschreiben jeweils die relevanten Parameterwerte für die entsprechende Ressource, z. B. Prozesszeit oder Temperatur. Die Zeilen enthalten jeweils den konkreten Wert für den Parameter pro Prozessschritt. Teilprodukte werden am Ende ihres MFCs mit teilweise verschiedenen weiteren Produkten kombiniert, sodass auf diese Weise die Erstellung komplexer Endprodukte abgebildet

**Tab. 6.2** Allgemeine Form eines MFCs als Matrix aus Prozessschritten auf Maschinen (Spalten) und Prozessschrittparametern (Zeilen)

	P.-Schritt <sub>0</sub>	..	P.-Schritt <sub>i</sub>	..	P.-Schritt <sub>n</sub>
Param <sub>0</sub>	Value <sub>00</sub>	..	Value <sub>i0</sub>	..	Value <sub>n0</sub>
..	..	..	..	..	..
Param <sub>j</sub>	Value <sub>0j</sub>	..	Value <sub>ij</sub>	..	Value <sub>nj</sub>
..	..	..	..	..	..
Param <sub>m</sub>	Value <sub>0m</sub>	..	Value <sub>im</sub>	..	Value <sub>nm</sub>

wird. Die Gesamtheit aller MFCs beschreibt daher die Gesamtheit der Fertigungsprozesse und bildet eine Menge aus verschränkten Bäumen, deren Äste die jeweilige Fertigung von Vorprodukten (für verschiedene Endprodukte) und deren Wurzeln die eigentlichen Endprodukte darstellen.

Schließlich bestimmen die Auftragsdaten die Anzahl und Reihenfolge der zu erstellenden Endprodukte (Produktmix) und somit auch die Arten, Mengen und Sequenzen der Flussobjekte. Die Daten legen also z. B. fest, dass zuerst  $x$  Flussobjekte vom Typ  $A$  und dann  $y$  Flussobjekte vom Typ  $B$  zu fertigen sind.

## 6.2.2 Messgrößen und Evaluierungen

Im Simulationswerkzeug 3DCreate bildet ein Protokoll die Grundlage späterer Analysen. Im Protokoll werden die relevanten Messgrößen eines Simulationslaufs akkumuliert oder einzeln mit Zeitstempel aufgezeichnet. Tab. 6.3 zeigt einen Auszug der Evaluierungs- und Messgrößen und illustriert somit die relevanten Aspekte bei Simulationen von Ablaufplänen.

Die Modellvalidierung erfolgt durch die Excel-Auswertung und den Abgleich des Protokolls mit zu erwartenden Messgrößen sowie durch den Vergleich des Simulationsverhaltens der Komponenten und der Prozessstrecken mit dem zu erwarteten Verhalten. Die für die Modellvalidierung und sofortige Problemerkennung notwendigen Informationen werden durch die 3D-Visualisierung und Warnungen im Simulationsprogramm bereitgestellt. Mit Hilfe dieser Darstellung des Modells bzw. des Simulationsverlaufs kann durch visuelle Meldungen bei relevanten Ereignissen, wie z. B. bei einem Pufferüberlauf, auf kritische Ergebnisse sofort reagiert werden, um das Problem zu beheben.

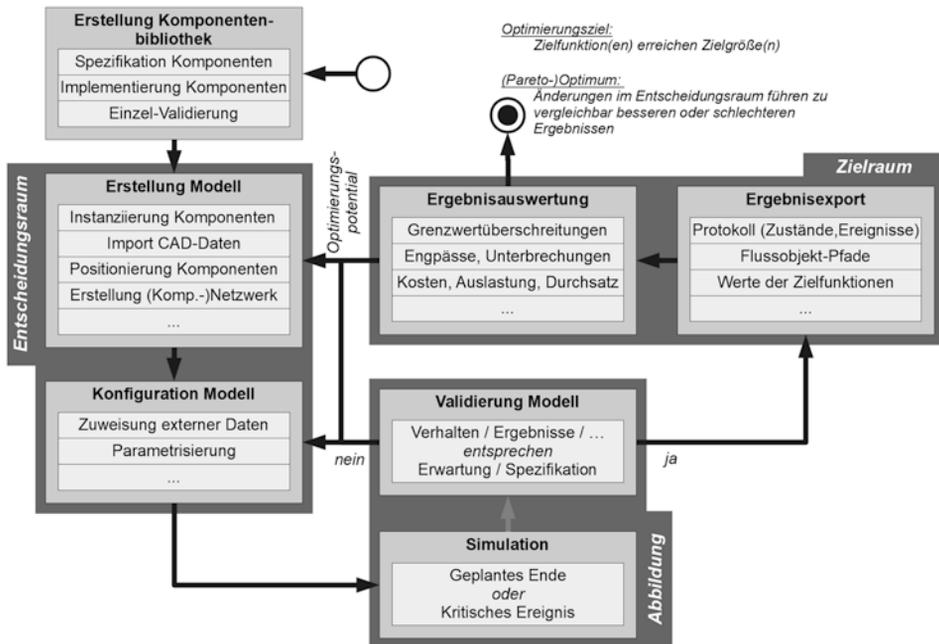
**Tab. 6.3** Übersicht Messgrößen bei der Simulation mit MA im Simulationsprotokoll

Komponentengruppe	Evaluierungsgröße	Messgrößen
MA	Bewegungsdaten	Laufzeiten, Laufwege, Beladungszustand
	Zykluszeiten	Kumulierte Durchlaufzeit von Arbeitsplänen
	Handhabungszeiten	Kumulierte Belade- und Entladedauer
	Zustände	Kumulierte Dauer von Aktiv/Wartend/Blockierend
Ressource	Komponentenfluss	Anzahl prozessierter/fehlerhafter Flussobjekte
	Auslastung	Minimum/Durchschnitt/Maximum an Flussobjekten pro Zeiteinheit
	Zustände	Kumulierte Dauer von Aktiv/Wartend/Blockierend/Störung
Modell	Zykluszeiten	Minimale/durchschnittliche/maximale Flussobjektlaufzeit
	Taktzeiten	Minimale/durchschnittliche/maximale Flussobjekttaktzeit bei einzelnen Prozessschritten

### 6.2.3 Vorgehensweise

Mit Hinblick auf die Werkzeuge und verfügbaren Ein- und Ausgangsdaten aus Abschn. 6.2.1 und 6.2.2 wird im Folgenden die Anwendung der simulationsbasierten Optimierung zur Erstellung von Ablaufplänen beschrieben (vgl. Kellner et al. 1999). Abb. 6.4 zeigt die Vorgehensweise schematisch auf, welche sich grob in zwei Phasen teilt: Unter Annahme einer verfügbaren Komponentenbibliothek mit validierten Einzelkomponenten wird zunächst ein Modell erstellt und konfiguriert. Durch anschließende mehrfache Simulation sowie visueller und protokollbasierter Auswertung können das Modell und die Konfiguration so lange angepasst werden, bis das Verhalten und die Ergebnisse den Erwartungen entsprechen, d. h., bis im Vorfeld festgelegte Referenzmesswerte und -abläufe feststellbar sind (Validierungsphase). Anschließend erfolgt durch ebenfalls wiederholte Simulation und Anpassung die Annäherung an das gesuchte Optimierungsziel oder Pareto-Optimum (Optimierungsphase), vgl. auch Abschn. 6.1.1, und die dort erläuterte halbautomatische Optimierung der Ablaufplanung.

Angewandt auf die Problematik der Ablaufplanung von MA und MMAPn bedeutet das die Erstellung von MA- und Mehrmaschinenarbeitsplatz-Simulationskomponenten und deren Einbindung in Simulationsmodelle zusammen mit Flussobjekten inklusive MFCs und weiteren Ressourcen. Die Funktionsweise der Komponenten wird durch das Simulieren einzelner Grundaufgaben mit bekannten Ergebnissen, wie z. B.



**Abb. 6.4** Methodik zur Erstellung und Optimierung von Ablaufplänen auf Basis von Simulationen

Transport oder Bearbeiten eines Werkstücks, validiert. Anschließend erfolgen die Simulation von mehreren Mitarbeitenden und MMAPn in komplexen Anwendungsfällen und die Ergebnisauswertung, sodass durch Anpassung der Ablaufplanungen diese schrittweise optimiert werden.

---

## 6.3 Ergebnisse

Im Folgenden sind ausgewählte Ergebnisse dargestellt, die durch die oder im Zusammenhang mit der simulationsbasierten Ablaufplanung entstanden. Zunächst erfolgt die Vorstellung neuartiger allgemeiner Simulationskomponenten für 3DCreate, bzw. deren Einsatz für MMAP in Abschn. 6.3.1. Danach sind repräsentative Verbesserungen durch Anwendung des neuen Konzepts auf reale Sachverhalte in Abschn. 6.3.2 ausgeführt, gefolgt von einer Zusammenfassung in Abschn. 6.3.3.

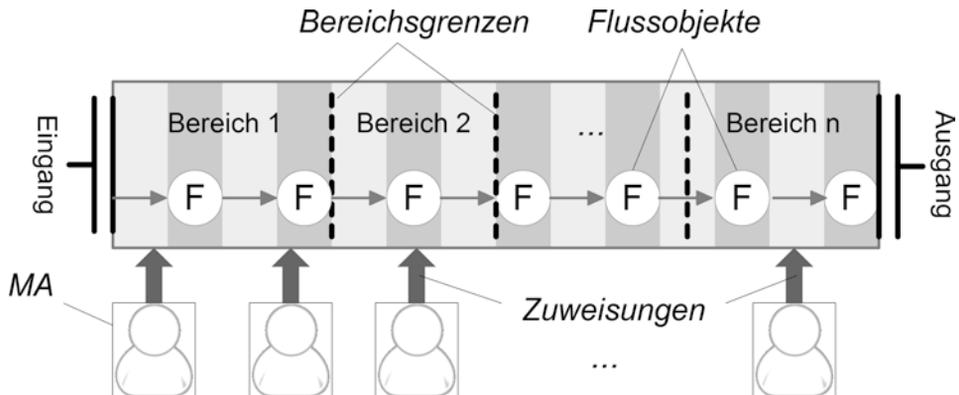
### 6.3.1 Simulationskomponenten

Neben bereits bekannten Konzepten, wie Quellen und Senken für Flussobjekte, sowie Ressourcenobjekten zur Flussobjektprozessierung wurden zwei weitere Ansätze erarbeitet: die Einbindung von MA-Komponenten zur Bedienung von MMAPn, wie in Abschn. 6.3.1.1 dargestellt, sowie die Modellierung des kontinuierlichen Flussobjekt-Förderers (engl. Continuous Flow Conveyor, CFC) als kombinierte MMAP in Abschn. 6.3.1.2.

#### 6.3.1.1 Einbindung von MA-Simulationskomponenten

Die MA-Komponente ist als 3DCreate-Simulationselement beschrieben, welches mehreren Ressourcen zugeordnet und selbst durch einen verhaltensbestimmenden Parametersatz charakterisiert ist. Das Verhalten bzw. die Aufgaben lassen sich aus Simulationssicht wie folgt zusammenfassen: i) Translation von Flussobjekten zwischen zwei Ressourcen, ii) Prozessierung eines Flussobjekts an einer Ressource und iii) Wechsel zwischen mehreren Ressourcen in jeweils parameter- und pfadabhängiger Zeit. Die Sequenz dieser Aktionen ist entweder durch einen fixen Arbeitsplan definiert oder ergibt sich aus dem aktuellen Bedarf, z. B. der Abholbereitschaft eines Flussobjekts, was in Folge einen exportierbaren Arbeitsplan für den Einsatz in Fertigung erzeugt.

Während der Simulation werden, wie in Abschn. 6.2.2 beschrieben, die erforderlichen Daten über die MA erhoben, was die Grundlage für spätere Ablaufplananalysen sowie Kapazitätsplanungen und Optimierungen bildet (siehe auch Abschn. 6.2.3). Eine 3D-Visualisierung der MA als Simulationskomponenten im Gesamtmodell ist in Abb. 6.6 links dargestellt. Auf diese Weise kann die Bedienung der MMAP durch verschiedene MA in Verbindung mit vorgeschriebenen oder zu erstellenden Arbeitsplänen modelliert, analysiert und verbessert werden.



**Abb. 6.5** Schema der CFC-Simulationskomponente zur Modellierung von kontinuierlichen Produktionsprozessen

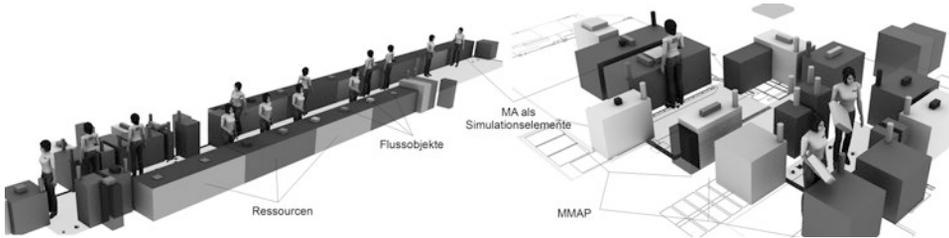
### 6.3.1.2 CFC-Komponente für Just-In-Sequence Produktionssimulation

Zur Abbildung kontinuierlicher Prozesse wird der sogenannte CFC als kombinierter Mehrmaschinenarbeitsplatz eingeführt. Ein kombinierter Mehrmaschinenarbeitsplatz vereint mehrere Arbeitsplätze in einer Komponente. Wie in Abb. 6.5 dargestellt, verfügt der CFC neben den üblichen Schnittstellen für Flussobjekte über eine beliebige Anzahl von beliebig großen Bereichen, welche die Flussobjekte sequentiell passieren. Jedem Bereich können eine oder mehrere MA-Komponenten zur Flussobjektprozessierung zugeordnet sein. Überschreitet ein unfertiges Flussobjekt eine Bereichsgrenze, stoppt der Fluss der gesamten Komponente, bis der entsprechende Teilschritt beendet ist, sodass auf einfache Weise Variantenfließfertigungen modelliert werden können.

Dadurch wird im Vergleich zur Modellierung mit synchronen Ressourcenketten eine genauere Abbildung der kontinuierlichen Vorgänge erzielt, was die Aussagekraft der Simulation erhöht und Analysen vereinfacht. Weiterhin ermöglicht die flexiblere Zuordnung von Mitarbeitenden zu Bereichen sowie deren Konfiguration eine effizientere iterative Optimierungspraxis und führt somit zu besseren Gesamtergebnissen.

### 6.3.2 Anwendung beim Automobilzulieferer Faurecia

Die vorgestellten Konzepte werden beim Automobilzulieferer Faurecia zur Modellierung von MMAPn und kontinuierlichen Prozessen eingesetzt. Beispielhaft ist ein Simulationsszenario für Variantenfließfertigungen und MMAP (links) und für Schweißprozesse an MMAPn (rechts) in Abb. 6.6 dargestellt. Modelle dieser Art in Verbindung mit den Ergebnissen aus Abschn. 6.3.1 werden gemäß der Methodik aus Abschn. 6.2.3 genutzt, um unten aufgeführte Ergebnisse zu erzielen.



**Abb. 6.6** Faurecia Beispielmodell (Rendering m. H. von VC 3DCreate) mit simulierten Mitarbeitenden und MMAP mit Einsatz der CFC-Komponente

**Tab. 6.4** Szenario und Ergebnisse der Optimierung durch Simulation von MMAPn bei Faurecia/Schweißen Rückenlehne

	Szenario 1	Szenario 2
<b>Kontext</b>	Schweißen (Rückenlehne); 3 MA, 7 Prozessschritte	
<b>Status</b>	aktuelle PCT: $t_c^{\text{std}} = 61,3$ s	
<b>Ziel</b>	Reduktion der PCT: $t_c^{\text{target}} = 55$ s (-10,3 %)	
<b>Geplante Maßnahmen</b>	Zuweisungen der MA zu Prozessen	Optimierung der Prozesse, angenommene Zeiteinsparungen
<b>Messungen</b>	simulierte PCT: $t_c^{\text{chn}} = 65,1$ s (+6,2 %)	simulierte PCT: $t_c^{\text{chn}} = 53,0$ s (-15,7 %)
<b>Ergebnis</b>	Maßnahmen nicht erfolgversprechend	Maßnahmen erfolgversprechend

**Tab. 6.5** Szenario und Ergebnisse der Optimierung durch Simulation von MMAPn bei Faurecia/Schweißen Polster

	Szenario
<b>Kontext</b>	Schweißen (Polster); 3 MA, 6 Prozessschritte
<b>Status</b>	aktuelle PCT: $t_c^{\text{std}} = 81,3$ s
<b>Ziel</b>	Reduktion der PCT: $t_c^{\text{target}} = 55$ s (-32,3 %)
<b>Geplante Maßnahmen</b>	Zuweisungen der MA zu Prozessen; Layoutmodifikationen
<b>Messungen</b>	simulierte PCT: $t_c^{\text{chn}} = 68,4$ s (-16,1 %)
<b>Ergebnis</b>	Maßnahmen erfolgversprechend; Engpässe identifiziert
<b>Kontext</b>	Schweißen (Polster); 3 MA, 6 Prozessschritte

In Tab. 6.4 und 6.5 sind Simulationsszenarien zusammengestellt, um die Produktzykluszeit (engl. Product Cycle Time, PCT) zu reduzieren, d. h., den effektiven Durchsatz zu erhöhen.

In beiden Beispielen konnten die Auswirkungen von geplanten Maßnahmen durch die Simulation der Ablaufplanung im Vorfeld evaluiert werden. Es zeigte sich, dass ein Teil der geplanten Änderungen keine Erfolgsaussichten hat bzw. welche Änderungen weiter verfolgt werden sollten. Weiterhin identifizierte die Analyse Schwachstellen, d. h. Engpässe, und prognostizierte zu erwartende Verbesserungen.

### 6.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in Abschn. 6.3.1 und 6.3.2 vorgestellten Szenarien zeigen, welche Ergebnisse sich mit der Abbildung von MMAPn und Mitarbeitenden in Simulationen erzielen lassen. Im Vergleich zu konventionellen Methoden wurde eine erhöhte Aussagekraft der Ablaufplananalysen durch die genaueren Auswirkungen der MA-Zuweisungen und der Parametrisierung auf die Zielfunktionen erzielt. In Folge konnten die Arbeitspläne hinsichtlich effektivem Durchsatz und Transparenz optimiert werden. Die erhöhte Flexibilität der 3DCreate-Simulationskomponenten bzw. die erhöhte Effizienz der Planung erlauben mehr und komplexere Planungsszenarien zur iterativen Optimierung der Ablaufplanung und zur Verschlanung der Arbeitspläne.

---

## 6.4 Diskussion

Abschließend wird nach der Zusammenfassung der Konzepte, Vorgehensweisen und Ergebnisse in Abschn. 6.4.1 die simulationsbasierte Ablaufplanung kritisch in Abschn. 6.4.2 betrachtet, bevor in Abschn. 6.4.3 mögliche zukünftige Weiterentwicklungen und Anwendung dargelegt sind.

### 6.4.1 Zusammenfassung

Ausgehend von konventionellen Ansätzen zur Planung von MA-Kapazitäten in Verbindung mit MMAPn ist der Überhang von Nach- gegenüber Vorteilen und die daraus resultierenden Anforderungen an ein erweitertes Konzept hinsichtlich besserer Analysierbarkeit der Ablaufplanung sowie höherer Transparenz und Effizienz in Abschn. 6.1 dargestellt, bevor der Ansatz der simulationsbasierten Planung von MA-Kapazitäten auf MMAP eingeführt wird. Das Grundkonzept beinhaltet den Import der notwendigen Stammdaten und stellt ein Simulationsmodell auf Basis einer iterativen Planungsoptimierung und Simulationskomponenten für MA, die mehreren Ressourcen gleichzeitig zugeordnet werden können, vor.

Danach ist in Abschn. 6.2 die Methodik, d. h. der Einsatz von Datenverarbeitungs- und Simulationsprogrammen als Softwarewerkzeuge zur Unterstützung der Ablaufplanung, die Datenbasis (CAD-Daten, Verhaltensbeschreibungen, Parametersätze) für die zu erstellenden Simulationselemente, die Messgrößen zur Validierung der Modelle und die Evaluierung der Planungsergebnisse am Beispiel Faurecia sowie die Vorgehensweise bei der simulationsgestützten Optimierung beschrieben.

Wie in Abschn. 6.3 erläutert, liefert das angewendete Konzept als Ergebnis zum einen Planungsmodelle mit eingebetteten MA- und MMAP-Komponenten zur Simulation von Ablaufplänen und spezialisierte Ressourcenkomponenten zur Abbildung von kontinuierlicher Fördertechnik. Zum anderen ermöglicht der Einsatz dieser Modelle und Komponen-

ten genauere Analysen der Ablaufplanung und bildet damit die Grundlage für die Optimierung der Planung. Daraus ergeben sich bessere Planungsergebnisse, wie an zwei konkreten Beispielen des Automobilzulieferers Faurecia gezeigt wird.

### 6.4.2 Kritik

Zur Erreichung der Ziele in Abschn. 6.3 ist die Validierung der einzelnen Simulationselemente und des zu optimierenden Modells, wie in Abschn. 6.2.3 erläutert, notwendig. Sowohl die Validierung einzelner Elemente als auch die Modellvalidierung gestalten sich trotz Abstraktion der Elemente aufgrund ihrer Komplexität aufwendig, da ein Teil der Verhaltensweisen erst in Interaktion mit anderen Simulationselementen und echten Eingangsdaten ersichtlich wird. Daher ist die Erstellung und Validierung von neuen Elementen und neuen Modellen vergleichsweise aufwendig und bedarf hinreichender Erfahrung im Umgang mit den Softwarewerkzeugen, was die Motivation für den Einsatz des Konzepts senkt.

### 6.4.3 Ausblick

Mit Hinblick auf die Aufgabe, Engpässe, Kapazitätsuntergrenzen und resultierende Produktzykluszeiten abzuschätzen, ist die Entwicklung von dynamischen MA-Pools denkbar, was die manuelle Einstellung und Evaluierung von verschiedenen MA-Anzahlen ersetzen und die halbautomatische Optimierung beschleunigen würde. Weiterhin sind die verfügbaren Modelle für zusätzliche Testszenerien einsetzbar, um weitere Optimierungspotenziale auszuschöpfen. Die 3D-Visualisierung kann bei Schulungen eingesetzt werden sowie als Werkzeug bei der statischen Layoutplanung Verwendung finden.

---

## Literatur

- Blazewicz J, Domschke W, Pesch E (1996) The job shop scheduling problem: conventional and new solution techniques. *Eur J Oper Res* 93:1–33
- Ehrgott M (2005) *Multicriteria optimization*, 2. Aufl. Springer, Berlin
- Kellner M, Madachy R, Raffo D (1999) Software process simulation modeling: Why? What? How? *J Syst Softw* 46:91–105
- Kurbel K (2005) *Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management*. Oldenbourg, München
- Marler RT, Arora JS (2004) Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Struct Multidiscipl Optim* 26:369–395
- Negahban A, Smith JS (2014) Simulation for manufacturing system design and operation: literature review and analysis. *J Manuf Syst* 33:241–261
- VDI (2001) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 6: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Abbildung des Personals in Simulationsmodellen. Beuth, Berlin
- Wolsey L, Nemhauser G (2014) *Integer and combinatorial optimization*. John Wiley & Sons, New York



**Heike Wilson** 1972 in Dresden geboren; Beendigung des Studiums als Dipl.-Volkswirtin an der TU Dresden im Jahr 2000. Seit 2003 Geschäftsführende Gesellschafterin der DUALIS GmbH IT Solution in Dresden. Langjährige Projekterfahrung in den DUALIS-Geschäftsbereichen Materialflusssimulation, multikriterielle Optimierung und Produktionsplanung/Scheduling; Expertin für Industrie 4.0-Lösungen zur Prozessoptimierung in der Fertigung. Engagement in Industrie 4.0-Initiativen wie dem SEF Smart Electronic Factory e. V. und geschätzte Expertin in Podiumsdiskussionen und als Referentin zu Themen wie Fabrikplanung der Zukunft.



**Dr.-Ing. Karsten Wendt** Absolvierte 2007 sein Diplom im Studiengang Informationssystemtechnik an der TU Dresden. Anschließend arbeitete er bis 2014 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am dortigen Lehrstuhl für Hochparallele Systeme und Neuromikroelektronik und forschte im Rahmen von internationalen Projekten in den Bereichen angewandte Mehrzieloptimierung, maschinelles Lernen und Verarbeitung von großen Datenmengen. Im gleichen Zeitraum war er als Softwareentwickler mit den Schwerpunkten Optimierung, Simulation und Softwarearchitekturen bei der Dualis GmbH IT Solution tätig. 2015 promovierte Dr. Wendt zum Thema Multi-Objective Optimization and Unsupervised Learning und arbeitet seitdem am Lehrstuhl für Softwaretechnologie der TU Dresden als Leiter von Forschungsprojekten zur Adaption von KI-Technologien für große Optimierungsprobleme.



# Simulationsbasierte Ausbringungssteigerung der Endmontageprüfstände einer Lkw-Fertigung

# 7

Niklas Rommelspacher

## 7.1 Einleitung

Am Ende einer Produktionslinie in der Fahrzeugindustrie wird der Motor des produzierten Fahrzeugs manuell gestartet, sodass das Fahrzeug selbstständig vom Produktionsband „rollen“ kann. Der darauffolgende Prozessschritt in der Fahrzeugfertigung ist meist der Rollenprüfstand, auf dem zur Qualitätssicherung alle Funktionen der Fahrzeuge geprüft werden. Beim Rollenprüfstand handelt es sich um den letzten Prozessschritt einer Fahrzeugfertigung. Häufig gibt es zwischen Bandende und Rollenprüfstand noch einen Nacharbeitsbereich für Fahrzeuge, an denen leichte Mängel festgestellt werden. Nach erfolgreicher Nacharbeit durchlaufen auch diese Fahrzeuge den Rollenprüfstand.

In den Produktionen gibt es für den beschriebenen Bereich folgende allgemeine Parameter:

- Anzahl der Produktionslinien,
- Anzahl der Rollenprüfstände,
- Anzahl der Nacharbeitsplätze,
- Prüfzeiten,
- Nacharbeitsquoten und
- Nacharbeitszeiten.

Die ersten drei Parameter variieren von Produktion zu Produktion. Sie sind nur geringfügig änderbar. Die letzten drei Parameter variieren von Fahrzeug zu Fahrzeug. Sie unterliegen stochastischen Prozessen. Je nach Fertigungsprogramm und Nacharbeitsaufkommen

---

N. Rommelspacher (✉)  
SimPlan AG, Hanau, Deutschland  
E-Mail: [niklas.rommelspacher@simplan.de](mailto:niklas.rommelspacher@simplan.de)

kann es durch die Zuordnung der Fahrzeuge auf die Rollenprüfstände zu Produktionsverlusten kommen. Bei der Zuordnung der Fahrzeuge vom Ende der Produktionslinien zu den Rollenprüfständen handelt es sich demnach um ein dynamisches Optimierungsproblem. Das Ziel der Simulation ist es in diesem Zusammenhang, die Produktionsverluste zu minimieren und somit die Ausbringungsmenge der Rollenprüfstände zu steigern.

In diesem Beitrag soll gezeigt werden, wie durch ein Simulationsmodell die Ausbringungsmenge gesteigert werden kann. Die Basis dieses Beitrags bildet ein Simulationsprojekt mit einem Lkw-Hersteller. Die Zuordnungsproblematik lässt sich jedoch analog auf eine Pkw-Produktion übertragen. Im Projekt wird zunächst die aktuelle Ist-Situation abgebildet und mit realen Daten validiert. Daran anschließend werden unterschiedliche Zuordnungsregeln mithilfe des Simulationsmodells untersucht und bewertet.

Der vorliegende Beitrag ist so gegliedert, dass zuerst die Abbildung des betrachteten Systems in einem Simulationsmodell explizit beschrieben wird (Abschn. 7.2). Daran anschließend werden die untersuchten Zuordnungsregeln erläutert und deren Auswirkungen auf die Ausbringungsmenge dargestellt (Abschn. 7.3). Abschließend folgen Fazit und Ausblick (Abschn. 7.4).

---

## 7.2 Simulationsmodell

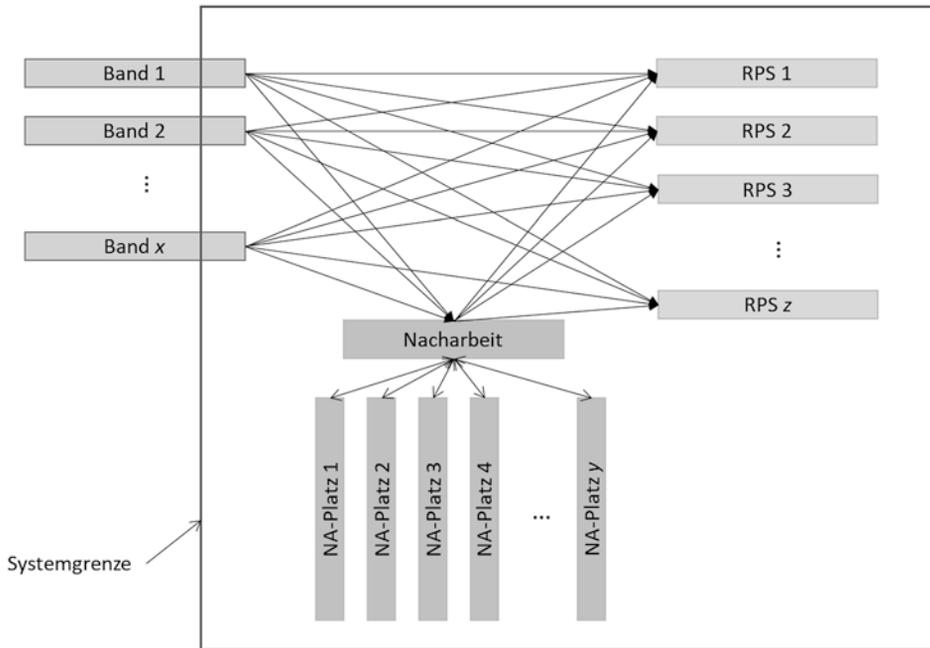
Die Grundlage, um unterschiedliche Zuordnungen zu untersuchen und zu bewerten, bildet ein Simulationsmodell. Die Modellerstellung erfolgt mit dem Simulator Plant Simulation 10.0. Als Bausteinbibliothek wird der VDA (Verband der Automobilindustrie) Bausteinkasten genutzt.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Systemgrenzen und die Materialflüsse des Systems beschrieben. Aufbauend darauf wird auf die Abbildungssystematik der einzelnen Materialflüsselemente eingegangen. Zum Abschluss dieses Abschnittes werden die Einflussgrößen auf das Simulationsmodell detailliert beschrieben.

### 7.2.1 Materialflüsse und Systemgrenze

In Abb. 7.1 sind die Materialflüsse und die Systemgrenze des betrachteten Bereichs allgemein dargestellt. In der allgemeinen Darstellung wird davon ausgegangen, dass es  $x$  Bänder,  $y$  NA-(Nacharbeits-)Plätze und  $z$  RPS (Rollenprüfstände) gibt. Diese Darstellung ist somit auf viele Fahrzeugfertigungen übertragbar.

Die Fahrzeuge, die von den Produktionslinien Band 1 bis Band  $x$  laufen, sind der Input für das System. Die genaue Modellierung der Produktionslinien im Simulationsmodell wird im Abschn. 7.2.2 erläutert. Für Fahrzeuge, die direkt vom Band zum Rollenprüfstand können, gilt grundsätzlich, dass sie von einem beliebigen Band zu einem beliebigen Rollenprüfstand zugeordnet werden können. Falls ein Fahrzeug zur Nacharbeit muss, kann es auf einen von den  $y$  Nacharbeitsplätzen zugeteilt werden. Nach erfolgter Nacharbeit kann



**Abb. 7.1** Materialflüsse und Systemgrenze

das Fahrzeug wiederum einen der  $z$  RPS nutzen. Die Modellierung des Nacharbeitsbereichs und der RPS wird ebenfalls im Abschn. 7.2.2 detailliert beschrieben.

Grundsätzlich sind in Abb. 7.1 alle möglichen Materialflüsse dargestellt. In der Realität kann es aufgrund von Restriktionen dazu kommen, dass bestimmte Materialflüsse nicht möglich sind. Hier kann zwischen weichen und harten Restriktionen unterschieden werden. Weiche Restriktionen ergeben sich beispielsweise durch Zuordnungsregeln, Personalverfügbarkeiten und Kapazitätsbeschränkungen. Harte Restriktionen sind zum Beispiel, dass bestimmte Fahrzeuge generell nur zu speziellen Nacharbeitsplätzen oder Rollenprüfständen können.

## 7.2.2 Modellierung der Materialflüsse

### Produktionslinien

Wie bereits beschrieben bilden die Fahrzeuge, die von den Produktionslinien kommen, den Input für das betrachtete System. Aus diesem Grund ist es nicht nötig, das gesamte Band abzubilden, sondern es reichen beispielsweise die letzten 50 m. Jedes Band erhält eine eigene Quelle, die die Fahrzeuge anhand einer vorgegebenen Sequenz einsteuert. Die Sequenz der Fahrzeuge muss in jedem Simulationsprojekt individuell festgelegt werden. Handelt es sich um eine bestehende Fertigung, kann die Sequenz durch exakte oder

aggregierte Realdaten vorgegeben werden. Bei einer geplanten Fertigung muss sich die Sequenz aus Plandaten ergeben.

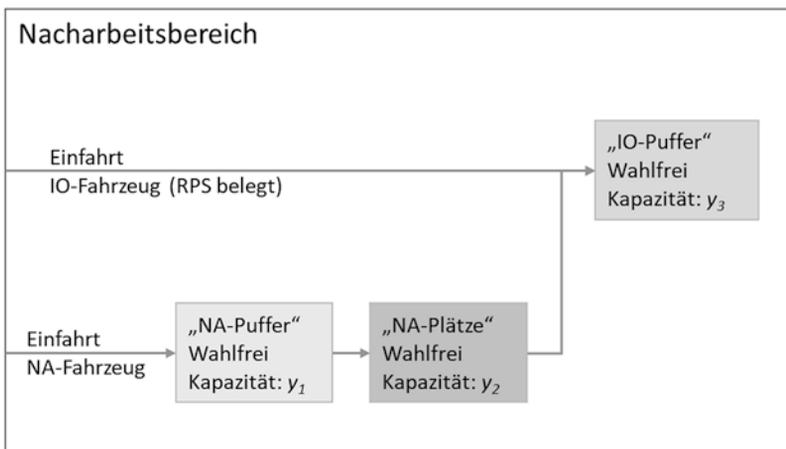
Die Fahrzeuge bekommen in der Quelle beispielsweise folgende Informationen aufgeprägt:

- Produktionsnummer,
- Baumuster,
- Nacharbeitszeit,
- Prüfzeit,
- Fahrzeuglänge.

Nach der Quelle werden die Fahrzeuge auf das Band aufgesetzt. Die Bänder werden in Plant Simulation auf Basis des Conveyor-Bausteins abgebildet. Sie werden kontinuierlich mit einer konstanten Geschwindigkeit betrieben. Die Geschwindigkeit kann parametrisiert werden. Ebenso können die Conveyor-Bausteine gestört werden, um einen Bandstillstand abzubilden. Außerdem ist es möglich, dass dem Band ein Schichtkalender aufgetragen wird.

### Nacharbeit

Der Nacharbeitsbereich besteht aus  $y$  Nacharbeitsplätzen. Der Parameter  $y$  variiert je nach Fertigung. Fahrzeuge fahren in den Nacharbeitsbereich, wenn an ihnen Nacharbeitsbedarf besteht. Im Beispielprojekt können jedoch auch Fahrzeuge, die IO (in Ordnung) sind, die Nacharbeitsplätze als Puffer nutzen, wenn alle Rollenprüfstände belegt sind. Durch diese Fahrweise werden der Bandablauf und der Rollenprüfstand teilweise entkoppelt. Durch die Entkopplung kommt es nicht immer direkt zu einem Bandstopp, falls alle RPS belegt sind.



**Abb. 7.2** Nacharbeitsbereich

Der Nacharbeitsbereich kann durch drei Puffer modelliert werden. Diese Puffer sind im Blockdiagramm in Abb. 7.2 dargestellt. Der Bereich kann aufgeteilt werden in einen NA-Puffer, die NA-Plätze und einen Puffer mit Fahrzeugen, die auf einen freien Rollenprüfstand warten (IO-Puffer).

Im NA-Puffer befinden sich Fahrzeuge, die Nacharbeitsbedarf haben und darauf warten, dass sie nachbearbeitet werden. Im Puffer NA-Plätze befinden sich die Fahrzeuge, die gerade im Moment nachbearbeitet werden. Alle Fahrzeuge, die auf einen freien RPS warten, befinden sich im IO-Puffer. Dabei handelt es sich sowohl um Fahrzeuge, die erfolgreich nachbearbeitet wurden, als auch um Fahrzeuge, die den NA-Bereich nur als Puffer nutzen.

Bei allen Puffern handelt es sich um wahlfreie Puffer. Die maximale Gesamtkapazität der Puffer entspricht der Anzahl an NA-Plätzen ( $y$ ). Jeder einzelne Puffer  $i$  hat eine genutzte Kapazität von  $y_i$ . Die Summe aller genutzten Kapazitäten darf die Gesamtkapazität nicht überschreiten. Es gilt dadurch folgende Nebenbedingung:

$$y_1 + y_2 + y_3 \leq y \quad (7.1)$$

In der Optimierungsphase kann es sinnvoll sein, die Nacharbeit zu steuern (daher wahlfreie Puffer). In diesem Fall können der Abzug sowohl aus dem NA-Puffer als auch aus dem IO-Puffer gezielt gesteuert werden. Im Simulationsmodell werden alle Puffer als wahlfreie Pufferelemente modelliert. Hierzu wird der Baustein „RandomAccessBuffer“ aus der VDA-Bausteinbibliothek genutzt.

### Rollenprüfstand

Häufig besteht der Bereich Rollenprüfstand aus mehreren Stationen. Es kann zum Beispiel vorgelagerte Prüfungen, den Rollenprüfstand selbst und nachgelagerte Prüfungen geben. In dem Projektbeispiel besteht ein Rollenprüfstand insgesamt aus fünf Stationen (vgl. Abb. 7.3). Die Stationen 1 und 2 sind vorgelagerte Prüfungen. In der Station 3 erfolgt die Fahrprüfung. Hierbei handelt es sich um den eigentlichen Rollenprüfstand. Das Fahrzeug fährt auf einer Rolle erstmals die Normalgeschwindigkeit. Außerdem werden weitere Funktionen des Fahrzeugs getestet. Nach der Fahrprüfung werden in den Stationen 4 und 5 noch nachgelagerte Prüfungen durchgeführt.

Im Simulator wird der Rollenprüfstandsbereich längenorientiert abgebildet. Die Strecke, die ein Fahrzeug in diesem Bereich zurücklegen muss, wird durch den Baustein „Weg“ modelliert. Für die Stationen werden Anlagenbausteine aus der VDA-Bausteinbibliothek verwendet. Auf diese Bausteine können Störungen und Schichtkalender aufgeprägt werden.



**Abb. 7.3** Blockdiagramm Rollenprüfstand

Ein weiterer wichtiger Aspekt im Beispielprojekt ist die Auslastung der MA (Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen) im Bereich der RPS. In Summe befinden sich sechs MA an einem RPS (vgl. Abb. 7.4). Hierbei können die MA in zwei Gruppen eingeteilt werden:

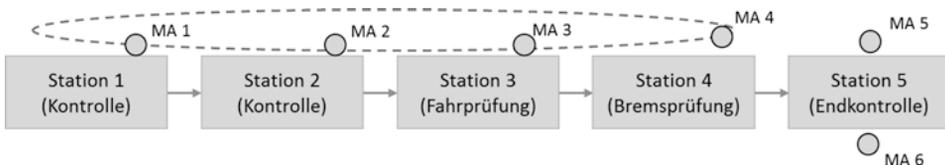
- MA 1–4: Ein MA aus dieser Gruppe übernimmt ein Fahrzeug an der Station 1 und begleitet es als Fahrer bis zur Station 4, wo es von der anderen MA-Gruppe übernommen wird. Danach begibt sich dieser MA wieder zur Station 1 und nimmt das nächste Fahrzeug.
- MA 5–6: Diese MA sind für die Endkontrolle zuständig. Einer dieser MA fährt das Fahrzeug nach erfolgter Prüfung zum Versandbereich.

Im Simulationsmodell sind die MA durch den Baustein „Werker“ dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen Standardbaustein des eingesetzten Simulators Plant Simulation. Die Funktionsweise kann wie folgt beschrieben werden: es existiert ein Werker-Pool, in dem sich eine gewisse Anzahl Werker (im Beispiel sechs Werker) mit bestimmten Qualifikationen (im Beispiel MA 1–4 und MA 5–6) befinden. Diese Werker werden durch einen sogenannten „Broker“ zugeordnet. Allen Werkern kann ein Schichtkalender aufgebracht werden.

### 7.2.3 Einflussgrößen des Simulationsmodells

In diesem Abschnitt werden die Größen mit dem wichtigsten Einfluss auf den betrachteten Bereich und damit auf das Simulationsmodell aufgezeigt. Gleichzeitig wird auch auf die Parametrierbarkeit dieser Größen eingegangen. Im Projektverlauf werden unter anderen folgenden Einflussgrößen berücksichtigt:

- Produktionsprogramm,
- Bandgeschwindigkeit, Bandstörungen,
- Schichtmodell,
- Prüfzeiten,
- Prozessstörung\_3/4, Prozessstörung\_4/5,
- Fehlererfassung, Anlagenstörung, Fahrzeugstörungen,
- Nacharbeitsquoten, Nacharbeitszeiten.



**Abb. 7.4** Werker im Bereich Rollenprüfstand

### **Produktionsprogramm**

Für das Produktionsprogramm werden historische Realdaten verwendet. Zur Ermittlung der Realdaten wird das Produktionsprogramm über einen Zeitraum von vier Monaten in einem Datensatz mitgeschrieben. Dieser Datensatz wird in das Simulationsmodell eingelesen und anschließend auf das Modell aufgeprägt. Dadurch wird im Modell das reale Produktionsprogramm sehr akkurat abgebildet. Neben der realen Sequenz wird auch die originale Produkt-ID (Identifikator) jedem Fahrzeug im Modell aufgeprägt. Dadurch lassen sich alle relevanten Merkmale wie z. B. Größe und Ausstattung ermitteln.

### **Bandgeschwindigkeit, Bandstörungen**

Die Bandgeschwindigkeiten variieren je nach Tag. Die genaue Bandgeschwindigkeit für die Produktionstage wird vom Projektpartner vorgegeben. Die Bandgeschwindigkeit ist im Modell über einen Parameter einstellbar. Alle Bandstörungen werden über den Beobachtungszeitraum protokolliert und fließen als Datensatz in das Modell ein. Im Modell werden die Bandstörungen so umgesetzt, dass zu einem vorgegebenen Zeitpunkt der Baustein Conveyor gestört wird.

### **Schichtmodell**

Das Schichtmodell wird vom Projektpartner definiert. Alle relevanten Bausteine (Produktionsband, RPS-Anlage, Nacharbeit und Werker) bekommen im Modell das vorgegebene Schichtmodell aufgeprägt. Hierbei werden auch Sonderpausen wie Gruppengespräche oder Streiks berücksichtigt.

### **Prüfzeiten**

Die Prüfzeiten für die Station 3 (Fahrprüfung) werden für jedes Fahrzeug exakt protokolliert. Anhand der Produkt-ID des Fahrzeugs ergibt sich somit die jeweilige Verweildauer in der Station 3. Für alle anderen Stationen (vgl. Abb. 7.3) liegen keine exakten Realdaten vor. Aus diesem Grund werden hier die Mittelwerte in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp für das Modell angesetzt.

### **Prozessstörung\_3/4**

Bei der Prozessstörung\_3/4 handelt es sich um eine Prozessstörung im Rollenprüfstandsbereich. Diese Prozessstörung wird wie folgt definiert: Befindet sich in der Station 4 ein Fahrzeug mit einem Radstand, der größer als 4500 mm ist, und befindet sich gleichzeitig in der Station 3 ein Fahrzeug mit einem Radstand, der größer als 4200 mm ist, so kann das Fahrzeug in der Station 3 erst geprüft werden, wenn das Vorgängerfahrzeug die Station 4 verlassen hat. Die Störung wird im Modell so abgebildet, dass die beschriebene Bedingung überprüft wird. Falls die Bedingung zutreffend ist, wird die Station 3 gestört.

### **Prozessstörung\_4/5**

Auch bei der Prozessstörung\_4/5 handelt es sich um eine Prozessstörung im Rollenprüfstandsbereich, welche in folgenden Fällen auftreten kann: Wenn sich in Station 5 ein

Fahrzeug mit einem Radstand größer als 4500 mm befindet, wird die Station 4 immer gestört. Im Modell wird dies analog abgebildet.

### **Fehlererfassung, Anlagenstörung, Fahrzeugstörungen**

Falls einem MA bei einer Prüfung ein Fehler bei einem Fahrzeug auffällt, muss dieser Fehler erfasst werden. Diese Fehlererfassung kostet zusätzliche Zeit. Für die Fehlererfassung werden Mittelwerte in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps angewendet. Bei den Anlagenstörungen handelt es sich um Störungen, die beispielsweise die Prüfanlage in Station 3 betreffen. Diese Störungen werden stochastisch auf die Stationen im Rollenprüfstand aufgeprägt. Die Parameter für die Störungsverteilungen (Verfügbarkeit und MTTR (Mean Time To Repair)) werden mit dem Projektpartner abgestimmt. Bei Fahrzeugstörungen handelt es sich um Störungen in den Stationen des Rollenprüfstandes, die aber von dem zu prüfenden Fahrzeug ausgelöst werden. Die Fahrzeugstörungen werden für jede Produkt-ID protokolliert. Anhand der Produkt-ID wird somit im Modell bestimmt, ob ein Fahrzeug eine Störung auslöst oder nicht.

### **Nacharbeitsquoten, Nacharbeitszeiten**

In der Realität wird protokolliert, ob ein Fahrzeug nach Bandablauf zur Nacharbeit muss oder nicht. Dadurch kann anhand der Produkt-ID ermittelt werden, ob ein Fahrzeug zur Nacharbeit muss oder direkt die Rollenprüfstände nutzen kann. Die Produkt-ID wird im Simulationsmodell ausgewertet: das Fahrzeug wird dementsprechend zur Nacharbeit geschickt oder nicht. Die Nacharbeitszeiten für jedes Fahrzeug lassen sich ebenfalls durch die Produkt-ID ermitteln und abbilden.

---

## **7.3 Verbesserung**

In diesem Abschnitt werden zunächst die einzelnen durchgeführten Zuordnungsregeln und die daraus resultierenden Verbesserungen beschrieben (Abschn. 7.3.1). Daran anschließend werden die Ergebnisse der einzelnen Verbesserungen dargestellt und erläutert (Abschn. 7.3.2).

### **7.3.1 Verbesserungsschritte**

Insgesamt werden sieben VS (Verbesserungsschritte) im Projekt beschrieben und durch die Simulation bewertet. Die VS sind zum Teil eine Kombinationen aus mehreren Zuordnungsregeln. Im Projektverlauf werden folgende VS untersucht:

- VS1: Einsteuersstrategie auf Basis der Prüfzeiten in Station 3
- VS2: Längenorientierte Steuerung
- VS3: Einsteuersstrategie auf Basis der längsten Prüfzeiten im gesamten RPS

- VS4: VS3 + dynamische Zuordnung anhand einer Prognose
- VS5: VS3 + Vermeidung der Prozessstörung\_3/4
- VS6: VS4 + Vermeidung der Prozessstörung\_3/4
- VS7: Nur Vermeidung der Prozessstörung\_3/4

Alle hier aufgelisteten VS werden im Folgenden detailliert erläutert.

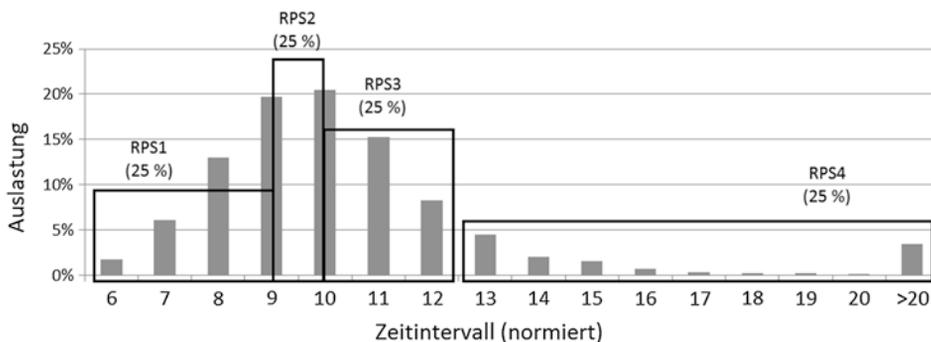
### VS1: Einsteuerstrategie auf Basis der Prüfzeiten in Station 3

Wie in Abschn. 7.2.3 beschrieben, sind die Prüfzeiten für jedes Fahrzeug in der Station 3 bereits vor dem Rollenprüfstand durch die Fahrzeugklasse und die Ausstattung bekannt. VS1 bezieht sich darauf, dass alle Fahrzeuge anhand ihrer Prüfzeit in der Station 3 klassifiziert und je nach Prüfzeit einem Rollenprüfstand zugeordnet werden. Bei gleichmäßiger Aufteilung auf die RPS ergibt sich das Histogramm in Abb. 7.5.

Die genaue Klassifizierung sieht wie folgt aus:

- RPS1: 0–9:13 min
- RPS2: 9:13–10:30 min
- RPS3: 10:30–12:00 min
- RPS4: > 12:00 min

Aus dieser Klassifizierung ergibt sich folgende Zuordnungsregel für die Fahrzeuge, die einen RPS nutzen sollen: Zunächst wird der bevorzugte RPS anhand der beschriebenen Klassifizierung ermittelt. Ist die Station 1 des bevorzugten RPS frei, wird das Fahrzeug dorthin umgelagert. Falls die Station 1 dieses RPS besetzt ist, werden alle freien RPS priorisiert aufgelistet. Die Priorisierung erfolgt anhand der Prüfzeit in Station 3. Das Fahrzeug wird auf den RPS mit der höchsten Priorisierung gefahren. Falls kein RPS frei ist, wartet das Fahrzeug auf einem NA-Platz. Falls alle NA-Plätze belegt sind, kommt es zu einem Rückstau auf das Produktionsband und somit zu einem Bandstopp.



**Abb. 7.5** Prüfstandsklassifizierung Station 3

Für die beschriebene Zuordnungsregel kann folgendes Beispiel angegeben werden: Ein Fahrzeug besitzt eine Prüfzeit von 10 min in Station 3. Durch die Klassifizierung wird zunächst versucht, das Fahrzeug zum Rollenprüfstand 2 zu fahren. Ist dieser besetzt, wird abgefragt, ob RPS 1, 3 und 4 frei sind. Wenn alle frei sind, besitzt RPS 3 die höchste Priorität, da die untere Schranke der Klassifizierung (10:30 min) am nächsten an der Prüfzeit (10 min) liegt. RPS 1 besitzt die zweithöchste Priorität und RPS 4 die geringste.

### VS2: Längenorientierte Steuerung

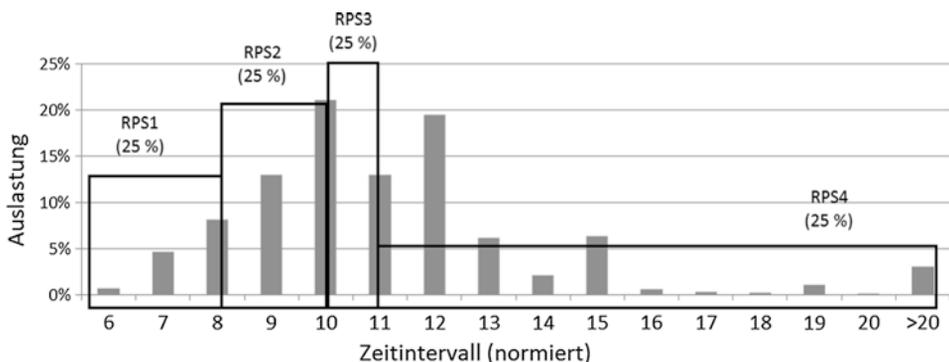
In diesem Verbesserungsschritt wird eine längenorientierte Steuerung untersucht. Da es durch die längeren Fahrzeuge zu Prozessstörungen kommt (vgl. Abschn. 7.2.3), sind möglichst alle Prozessstörungen auf einen RPS zu verlagern. Dadurch ergibt sich bei diesem RPS zwar eine sehr lange Taktzeit, allerdings könnte dies ausgeglichen werden, da auf den anderen RPS keine Prozessstörungen mehr auftreten und die Taktzeit dort wesentlich reduziert wird.

Die konkrete Zuordnungsregel sieht wie folgt aus: Alle Fahrzeuge mit einem Radstand größer als 4200 mm werden dem RPS 4 zugeordnet. Falls dieser besetzt ist, stehen auch die anderen RPS zur Verfügung.

### VS3: Einsteuernstrategie auf Basis der längsten Prüfzeiten im gesamten RPS

Der RPS besteht insgesamt aus 5 Stationen. Die Fahrprüfung findet in Station 3 statt. Meist ist die Prozesszeit in Station 3 am höchsten. Im VS1 werden die Fahrzeuge nach dieser Prozesszeit gesteuert. Im Projektverlauf durch das Simulationsmodell hat sich jedoch gezeigt, dass es Fahrzeuge gibt, die auf anderen Stationen ihre längste Prozesszeit haben. Besonders bei Fahrzeugen mit einem größeren Radstand als 4500 mm kommt es in der Station 4 zu einer langen Prozesszeit: Befindet sich dieses lange Fahrzeug in Station 5, so ist die Station 4 durch die Prozessstörung\_4/5 immer noch besetzt. Die Prozesszeit in Station 4 erhöht sich für diese Fahrzeuge somit um die Prozesszeit der Station 5.

Werden Fahrzeuge mit einer relativ kurzen Prozesszeit in Station 3 und einer längeren Prozesszeit auf einer anderen Station gemäß der Zuordnungsregel von VS1 eingeordnet,



**Abb. 7.6** Prüfstandsklassifizierung über den gesamten Rollenprüfstand

so kommt es zu folgendem Effekt: Die Fahrzeuge durchfahren relativ schnell die Station 3, allerdings werden sie an einer anderen Station mehr Zeit benötigen, als es die Klassifizierung vorgibt. Dadurch bremsen diese Fahrzeuge die anderen Fahrzeuge auf der RPS-Linie aus.

Wird die längste Prozesszeit eines Fahrzeugs über den gesamten RPS berücksichtigt, ergibt sich für die einzelne RPS-Linie ein regelmäßigerer Takt. Die Prüfstandsklassifizierung ist Abb. 7.6 zu entnehmen.

Die genaue Klassifizierung sieht wie folgt aus:

- RPS1: 0–8:53 min
- RPS2: 8:53–10:11 min
- RPS3: 10:11–11:44 min
- RPS4: >12:00 min

Zum Bestimmen eines RPS wird nach demselben Muster wie in VS1 vorgegangen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass für die Klassifizierung nicht nur die Station 3 entscheidend ist, sondern die längste Prozesszeit eines Fahrzeugs auf dem gesamten RPS. Die Stationszeiten sind für jedes Fahrzeug vorher durch die Fahrzeugklasse und die Ausstattung abschätzbar.

#### **VS4: VS3 + dynamische Zuordnung anhand einer Prognose**

VS4 baut auf VS3 auf. Allerdings wird die Klassifizierung aus Abb. 7.6 auf andere Art ermittelt. Die Klassifizierung für VS3 ergibt sich aus allen Fahrzeugen, die über den Betrachtungszeitraum gefertigt werden. Diese Klassifizierung kann sich jedoch durch Tagesprogramme der Produktion ändern: So kann es sein, dass an einem Tag besonders viele Fahrzeuge mit einer relativ kleinen Prozesszeit gefertigt werden. Um den beschriebenen Aspekt zu berücksichtigen, werden zur Klassifizierung nur die nächsten  $x$  Fahrzeuge betrachtet. Der Parameter  $x$  kann im Simulationsmodell parametrisiert werden. So können zum Beispiel 50 oder 100 Fahrzeuge als Prognose für die Klassifizierung genutzt werden. Die Zuordnungsregeln gelten analog wie in VS3.

#### **VS5: VS3 + Vermeidung der Prozessstörung\_3/4**

VS5 baut auf VS3 auf. Zusätzlich wird jedoch durch die Zuteilung versucht, die Prozessstörung\_3/4 (vgl. Abschn. 7.2.3) zu vermeiden. Hierzu darf hinter einem Fahrzeug mit einem größeren Radstand als 4500 mm kein Fahrzeug mit größerem Radstand als 4200 mm eingeordnet werden. Die Vermeidung der Prozessstörung\_3/4 hat hierbei eine höhere Priorität als die korrekte Einteilung in die jeweilige Prüfstandsklasse. Folgende Zuordnungsregeln gelten für VS5: Angenommen ein Fahrzeug mit einem größeren Radstand als 4200 mm möchte zu einem RPS fahren und in allen RPS ist Station 1 frei. So stehen zunächst 4 RPS in einer möglichen Liste. Befindet sich jedoch auf einem der RPS in Station 2 ein Fahrzeug mit einem größeren Radstand als 4500 mm, so wird dieser RPS als Option aus der Liste gestrichen. Erst danach wird das Fahrzeug gemäß der Prüf-

standsklassifizierung zugeordnet. Ist kein RPS verfügbar, ohne dass es zur Prozessstörung\_3/4 kommt, so wird diese Prozessstörung in Kauf genommen; das Fahrzeug wird nur gemäß der Prüfstandsklassifizierung eingeteilt.

#### **VS6: VS4 + Vermeidung der Prozessstörung\_3/4**

Hierbei handelt es sich um eine Kombination von VS4 und VS5: Zunächst wird analog zum VS5 versucht, die Prozessstörung\_3/4 durch die Zuordnung zu verhindern. Danach wird auf die Prüfstandsklassifizierung geachtet. Die Prüfstandsklassifizierung wird hierbei dynamisch für die nächsten  $x$  Fahrzeuge ermittelt.

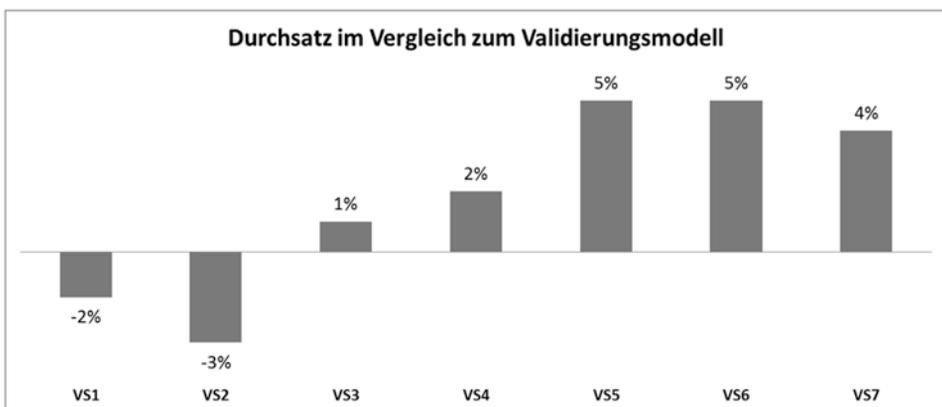
#### **VS7: Nur Vermeidung der Prozessstörung\_3/4**

Durch diesen VS sollen die Effekte durch die Vermeidung der Prozessstörung\_3/4 unabhängig von den anderen VS bewertet werden. Dies bedeutet, dass die Fahrzeuge nach Möglichkeit so zugeordnet werden, dass die Prozessstörung\_3/4 nicht auftritt. Ist dies nicht möglich, werden die Fahrzeuge zufällig auf einen der Rollenprüfstände geschickt.

### **7.3.2 Ergebnisse der Verbesserungen**

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der einzelnen VS aus Abschn. 7.3.1 zusammengefasst und erläutert. Ein Großteil des Beispielprojektes besteht aus der Modellierung der Prozesse und anschließender Validierung des Modells. Denn nur, wenn das Modell die Realität hinreichend genau abbildet, können mögliche Ausbringungssteigerungen untersucht und bewertet werden.

In Abb. 7.7 sind die Ergebnisse der einzelnen Verbesserungen im Vergleich zum Validierungsmodell dargestellt. Das Validierungsmodell bildet die reale Ausbringungsmenge ab. Die Kenngröße zur Bewertung ist der Durchsatz an Fahrzeugen über die RPS. Durch



**Abb. 7.7** Ergebnisse der VS

die Klassifizierung in Abhängigkeit der Prüfzeit in Station 3 (VS1) verschlechtert sich der Durchsatz um 2 %. Die reine Längensortierung (VS2) senkt den Durchsatz ebenfalls und zwar um 3 %. Erst VS3 sorgt für eine Durchsatzsteigerung: Hier werden für die Klassifizierung alle Stationen im RPS berücksichtigt. Bei einem Vergleich von VS3 und VS1 ist erkennbar, dass die alleinige Betrachtung der Station 3 dazu geführt hat, dass die Fahrzeuge sich durch die unterschiedlichen Prüfzeiten an den jeweiligen Stationen ausgebremst haben. Erst durch die Betrachtung aller Prüfzeiten kommt es zu einer Glättung der Taktzeiten. Die dynamische Klassifizierung anhand einer Prognose (VS4) erhöht den Durchsatz nochmals ein wenig (2 %).

Die größte Steigerung der Ausbringungsmenge gelingt jedoch durch die Vermeidung der Prozessstörung<sub>3/4</sub>. Allein durch diese Zuordnungsregel erhöht sich der Durchsatz um 4 % (VS7). Die Kombination von Prüfstandsklassifizierung wie in VS3 und Vermeidung der Prozessstörung<sub>3/4</sub> erhöht den Durchsatz um 5 % (VS5). Die Kombination von dynamischer Prüfstandsklassifizierung und Vermeidung der Prozessstörung<sub>3/4</sub> erhöht den Durchsatz ebenfalls um 5 % (VS6). Durch Wechselwirkungen der Verbesserungsalgorithmen ist das Ergebnis hier kleiner als die Addition.

---

## 7.4 Fazit

In dem vorgestellten Beispielprojekt wird die Steigerung der Ausbringungsmenge der RPS durch ein Simulationsmodell untersucht. Nach der Erstellung eines Simulationsmodells, welches die Realität hinreichend genau abbildet (Abschn. 7.2), werden gemeinsam mit dem Projektpartner verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten erarbeitet (Abschn. 7.3.1). Anhand des Simulationsmodells werden diese untersucht und durch Kennzahlen bewertet (Abschn. 7.3.2). Insgesamt gelingt eine Ausbringungssteigerung von 5 %. Weitere Kennzahlen sind Personalauslastung am Band, Auslastung der einzelnen Stationen und die Füllstände der gesamten RPS.

Die Zuordnungsregeln werden gemeinsam mit dem Projektpartner entwickelt, so dass es für die Fertigung teilweise ohne IT-Unterstützung möglich wird, die Zuordnungsregeln umzusetzen und damit den Durchsatz der Rollenprüfstände zu erhöhen.

Die in diesem Projekt definierten VS sind als Beispiel für andere Fertigungssysteme zu verstehen. Dabei können je nach Fertigungssystem weitere Zuordnungsregeln definiert werden. Ebenso müssen die einzelnen VS für jedes System neu untersucht und bewertet werden.

Die Erhöhung des Durchsatzes wird durch die Implementierung verbesserter Zuordnungsregeln innerhalb des Simulationsmodells erreicht. Eine weitere Ausbringungssteigerung ist durch die Verbesserung der einzelnen Prozesse unter Umständen möglich. Hierzu sind jedoch meist strukturelle Anpassungen der RPS nötig. Durch die strukturellen Anpassungen entstehen Investitionskosten. Ein weiterer Vorteil des Simulationsmodells besteht darin, dass die Auswirkungen von strukturellen Änderungen ohne Investitionsrisiko bewertbar werden.



**Niklas Rommelspacher** Im Jahr 2013 Abschluss seines Masterstudiums des Wirtschaftsingenieurwesens mit dem technischen Schwerpunkt Maschinenbau an der TU Darmstadt. Schwerpunkte während des Studiums waren außerdem Produktion, Logistik und Operations Research. Praxiserfahrung bei der AUDI AG in der Produktionsplanung und der Entwicklung von Fertigungskonzepten. Seit 2013 Berater und Projektmanager in Simulationsprojekten bei der SimPlan AG, dadurch u. a. tiefgehende Einblicke in die Produktions- und Logistikprozesse der Automobilindustrie.



# Simulation in der mechanischen Fertigung im Bereich Antriebsstrang

# 8

Arnim Steinel, Stefan Sutter, Jörg Kemper  
und Sven Spieckermann

## 8.1 Simulation als ständiger Begleiter des Tagesgeschäftes

In der Automobilindustrie und bei vielen Zulieferern hat sich die Simulation als planungs-  
begleitendes Werkzeug durchgesetzt. Das gilt auch für Simulationsanwendungen im Be-  
reich Antriebsstrang (Powertrain) und der Fertigung von Komponenten für den Antriebs-  
strang (vgl. Jayaraman und Gunal 1997). Wurde die Simulation früher eher in späten  
Planungsphasen zur Verifizierung eingesetzt, begleitet sie heute tatsächlich den Produkt-  
entstehungsprozess und die Entstehung der Fertigungseinrichtung. Bei der Adam Opel AG  
hat sich schon vor dem Jahr 2000 die Erkenntnis durchgesetzt, dass die Erstellung eines  
Simulationsmodells bereits die Entscheidungsfindung für ein Linienlayout, Linienkon-  
zept, den Umfang des Maschinenparks oder das Verkettungskonzept positiv beeinflusst  
(vgl. Gora 2003 sowie Sommer und Steinel 2003). Erste Anwendungen von Materialfluss-  
simulationen gehen im Bereich Motor- und Getriebefertigung bis in das Jahr 1996 zurück.  
Dabei ist die Simulation nicht mehr der Planung nachgelagert, sondern begleitet sie oder  
ist ihr sogar voraus. Beginnend bei der Grobplanung wird das Simulationsmodell bis zur  
Inbetriebnahme der realen Anlage immer detaillierter ausgeführt. Mit der Inbetriebnahme  
endet bei vielen Anwendern der Lebenszyklus des Simulationsmodells. Die Adam Opel

---

A. Steinel · S. Sutter  
Opel Automobile GmbH, Rüsselsheim am Main, Deutschland

J. Kemper  
SimPlan Integrations GmbH, Witten, Deutschland

S. Spieckermann (✉)  
SimPlan AG, Hanau, Deutschland  
E-Mail: [sven.spieckermann@simplan.de](mailto:sven.spieckermann@simplan.de)

AG ist hingegen wie eine Reihe anderer Automobilhersteller auch (vgl. Mayer und Spieckermann 2010) bemüht, alle Simulationsmodelle dauerhaft auf dem aktuellen Stand zu halten und damit sicherzustellen, dass jederzeit auf sich verändernde Situationen oder Anforderungen im Werk reagiert werden kann. Folgende Aufgaben werden immer wieder mit bestehenden oder zu diesem Zweck neu erstellten Modellen gelöst:

- Kapazitätserweiterung bestehender Produktionslinien
- Integration neuer Typen
- Umstellung des Steuerungssystems, z. B. zur Bestandsreduktion
- Untersuchung alternativer Rüstkonzepte zur Durchlaufzeitsenkung
- Werkzeugstandmengenoptimierung
- Losgrößenoptimierung zur Senkung von Beständen
- Untersuchung alternativer Teamkonzepte
- Steigerung der Verfügbarkeit durch Anpassung bestehender Pufferkapazitäten

Diese Aufgaben sind charakteristisch für Simulationsanwendungen im Bereich der Komponentenfertigung für den Antriebsstrang. Die in der Komponentenfertigung eingesetzten Maschinen für mechanische Bearbeitung wie Drehen, Fräsen, Schleifen oder Honen verwenden in vielen Fällen typspezifische Werkzeuge, so dass sich regelmäßig Fragen nach der Anzahl sinnvoll in eine Fertigungslinie integrierbarer Typen, nach der Anzahl der Umrüstungen und nach sinnvollen Losgrößen stellen. Insgesamt wird deutlich, dass die Aufgabenstellungen vielfältig und anspruchsvoll sind. Bei der Adam Opel AG arbeitet daher eine Gruppe von Prozessingenieuren ausschließlich an Materialflusssimulationen. Die Anwendungsexperten der Gruppe erstellen und warten Simulationsmodelle, begleiten die Datenbeschaffung, führen Experimente durch und präsentieren die Ergebnisse in Planungsabteilungen und Werken. Zum Einsatz kommt dabei unter anderem ein generisches Simulationsmodell, das sich zur Abbildung nahezu aller im Tagesgeschäft aufkommenden Fragestellungen eignet. Dieses generische Modell wird in diesem Beitrag ebenso beschrieben wie ein warteschlangenbasiertes Modell, das zuvor bei der Adam Opel AG im Einsatz war. Zunächst wirft der nächste Abschnitt einen kurzen Blick in die Historie der Ablaufsimulation in diesem Anwendungsbereich bei der Adam Opel AG.

---

## 8.2 Rückblick

In etwa seit dem Jahr 2001 nutzt die Adam Opel AG im Bereich Antriebsstrang das Simulationstool AutoMod des börsennotierten amerikanischen Unternehmens Applied Materials (vgl. Muller 2015 für einen kurzen technischen Überblick). Dieses Tool ist auch heute noch erfolgreich im Einsatz. Zu Beginn des Einsatzes von AutoMod, das über eine Visualisierung in 3D verfügt, waren die erstellten Simulationsmodelle immer layoutorientiert. Maschinen, Personal und der Teilefluss wurden detailliert und dreidimensional dargestellt. Die Erstellung dieser layoutorientierten Modelle erfolgte individuell für jede Fertigungslinie und war verglichen mit dem heu-

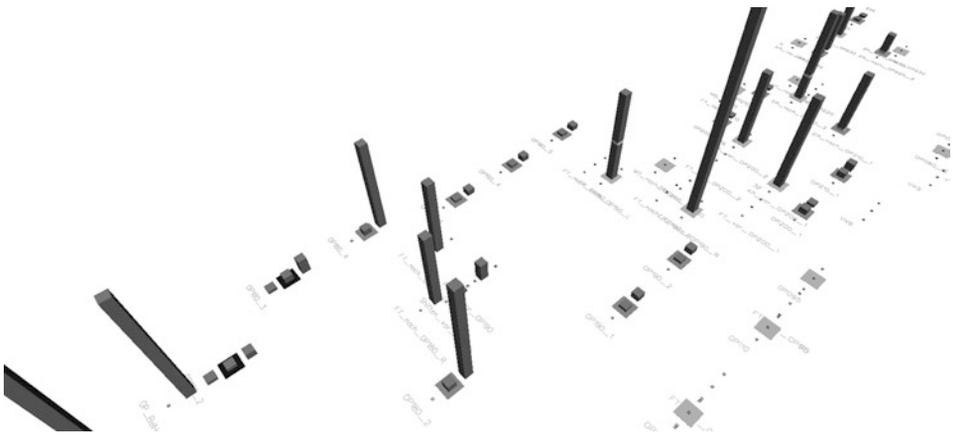


### 8.3 Ein warteschlangenbasiertes Fertigungsmodell

Im Laufe der Zeit stieg die Nachfrage nach Simulationsstudien im Bereich mechanische Fertigung bei der Adam Opel AG kontinuierlich. Der immer größer werdende Bedarf konnte alsbald mit dem verfügbaren Team von Simulationsingenieuren nicht mehr bewältigt werden. Gleichzeitig wurden Aufwand und Nutzen der in den einzelnen Werken installierten Modelle gegeneinander abgewogen. Es zeigte sich, dass der über die ursprüngliche, durch die Zentralplanung begleitete, Experimentierphase hinausgehende Erkenntnisgewinn in den Werken eher gering war. Die einzelnen Modelle wurden aus Zeitgründen und aufgrund jeweils anderer Prioritäten im Tagesgeschäft nur sporadisch bis gar nicht genutzt. Aus dieser Erkenntnis heraus fiel die Entscheidung zum Verzicht auf die Installation von Modellen in den Fertigungswerken. Die Unterstützung der Werke erfolgte fortan direkt durch die Simulationsgruppe in der Zentralplanung. Dies ermöglichte insbesondere bei der Simulation von Fertigungslinien die Abkehr von streng layoutbasierten 3D-Modellen hin zu einfacher zu erstellenden warteschlangenbasierten Modellen, die aufgrund der Terminologie im Simulationswerkzeug AutoMod auch als Queuemodelle bezeichnet werden.

In einem Queuemodell wird weitgehend auf grafische Elemente und Animationen verzichtet. Dies betrifft hauptsächlich die detaillierte Darstellung von Maschinen, Förder-technik und weiteren linienspezifischen Besonderheiten. Das Beispiel in Abb. 8.2 zeigt ein solches Queuemodell. Die Höhe der Stapel symbolisiert jeweils die Anzahl der Bauteile, die sich in den verschiedenen Maschinen und Warteschlangen befinden. Auch wenn diese Art der Modellierung auf den ersten Blick weniger anspruchsvoll anmutet, werden doch alle das Simulationsergebnis beeinflussenden Prozesse und Abläufe in gleichbleibend hoher Genauigkeit und der Realität entsprechend abgebildet.

Der nächste Schritt zur Verkürzung der Modellierungszeit war, Queuemodelle automatisiert über Eingangsdaten zu erstellen. Dazu wurde eine Reihe von Ist-Systemen (Fertigungslinien)



**Abb. 8.2** Modell mit Queue-Bausteinen

analysiert und in Prozessschritte zerlegt. Im Falle des Fertigungsmodelles wurde in einem ersten Schritt der Weg gewählt, komplexe Systeme, wie beispielsweise eine Zahnradfertigung, auf Basisprozesse zu reduzieren. Das Ziel war, mit Hilfe der Aneinanderreihung und Parametrierung eines Basisprozesses das Verhalten des realen Systems ohne nennenswerten Genauigkeitsverlust abbilden zu können. Die praktische Umsetzung erfolgte in mehreren Workshops mit Anwendungsexperten und Simulationsspezialisten. Im Ergebnis wurde im Simulationswerkzeug AutoMod ein neuer Basisprozess „Operation“ erarbeitet, beschrieben und modelliert.

Insgesamt ergeben sich auf diese Weise stark vereinfachte Modellstrukturen. Jede Fertigungslinie verfügt über mindestens eine Teile-Quelle und eine Teile-Senke. Zwischen diesen beiden die Systemgrenze bildenden Prozessen befinden sich aneinandergereiht die Operationen. Eine Operation besteht aus mindestens einer Maschine, in der Regel aber mehreren parallel arbeitenden Maschinen, die einem bestimmten Arbeitsschritt im Arbeitsplan der Teile zugeordnet sind. Jede Operation verfügt über einen Speicher, der die Teile zwischen den einzelnen Operationen puffert und jeweils einen kleinen Puffer vor sowie einen weiteren kleinen Puffer hinter (Input-/Outputpuffer) jeder einzelnen Maschine der Operation.

Die einzelnen Komponenten der Operation wurden nicht nur durch Menge, Kapazität oder Taktzeit parametriert, sondern auch durch eine Funktion. So gab es verschiedene Speicherarten, Maschinentypen und diverse zur Auswahl stehende Ausprägungen des Teiletransportes zwischen Speicher und Maschinenpuffer. Die Parametrierung des Modells erfolgte wie schon bei den layoutorientierten Modellen extern in einem Frontend auf Excel-Basis, weil es sich gegenüber anderen Varianten als höchst praktikabel erwiesen hatte.

Nach einer mehrmonatigen Modellierungs- und Validierungsphase ist ein Modell entstanden, welches durch rein auf Excel basierte Parametrierung in der Lage war, sämtliche Einzelteilmfertigungen des Bereiches ME Propulsion Systems der Adam Opel AG experimentierfähig abzubilden. Die Ergebnisse waren mit denen der wesentlich detaillierteren Layoutmodelle vergleichbar. Das lag daran, dass der Abstraktionsgrad nicht so hoch war, wie ein schneller Vergleich von Abb. 8.1 mit Abb. 8.2 vielleicht vermuten lässt. So konnte beispielsweise das für die ursprünglichen Layoutmodelle entwickelte Werkermodell auch in die Queuemodelle übernommen werden, indem es gekapselt und mit einer definierten Schnittstelle versehen wurde. Auch die in den Layoutmodellen verwendeten Maschinentypen und bei der Adam Opel AG vergleichsweise sehr detailliert abgebildeten Ereignisarten wie Störungsbehebung, Werkzeugwechsel, Rüstvorgänge, Qualitätskontrollen, etc. haben in standardisierter Form Einzug in das Queuemodell erhalten. Damit wurden die wesentlichen die Linienleistung beeinflussenden Faktoren Maschine, Mensch und Qualität im Kern unverändert übernommen.

Mit dem Queuemodell entstand ein auf die Belange der mechanischen Fertigung bei der Adam Opel AG abgestimmtes Universalmodell, das bis zu 100 Operationen mit jeweils 10 Maschinen abbilden konnte. Speicher, Maschinen, Puffer und die Produkte wurden durch die AutoMod-Bausteine Loads (bewegliche Modellelemente), Queues,

Farben und Labels (Texte) in einer einfachen Matrix soweit visualisiert wie es notwendig erschien, um den Überblick über die Modellstrukturen und Operationen behalten zu können. Dies gelang so gut, dass es zu einer üblichen und praktikablen Vorgehensweise wurde, z. B. alle Linien einer Zahnradfertigung in einem Modell zusammenzufassen und alle Eingangs- und Ergebnisdaten in einer Excel-Tabelle zu verwalten. Dadurch wurde es auch möglich, linienübergreifende Werkerteams zu modellieren und zu untersuchen. Der Modellierungsaufwand reduzierte sich auf die Parametrierung des Frontends. Die Aufwände für die Erstellung der Benutzeroberfläche in Form einer linien-spezifischen Excel-Tabelle konnten entfallen. Durch den Verzicht auf layoutorientierte Animationen und die iterative Überarbeitung des AutoMod-Bausteins „Operation“ zur Modellierung der Maschinenprozesse konnten die Modelllaufzeiten sukzessive weiter gesenkt werden.

Der nächste Evolutionsschritt der Simulationsmodelle für den Bereich ME Propulsion Systems der Adam Opel AG wäre konsequenterweise die Erstellung eines ähnlichen Modells zur Abbildung von Montagelinien gewesen. Dazu ist es nicht gekommen, weil die Entwicklungen im Automobilsektor wesentlich größere Schritte von den Simulationsexperten der Adam Opel AG und der SimPlan Integrations GmbH verlangten, die im nächsten Abschnitt beschrieben sind.

---

## 8.4 Das generische Modell

Rund um das Jahr 2010 vollzog sich bei der Adam Opel AG ein Wandel in den Fertigungsstrukturen. Es ergaben sich neue Anforderungen an die Produktion und damit auch an die Simulation. Waren bis dato große Stückzahlen bei kleiner Typenvielfalt die Regel, wandelten sich die Anforderungen stark in Richtung steigender Typenvielfalt bei reduzierten Losgrößen. Im Zusammenhang mit der Forderung nach gleichzeitig geringeren Beständen innerhalb der Fertigungslinien und kürzerer Durchlaufzeit bei unveränderter Versorgungssicherheit der nachfolgenden Montagen ergaben sich Zielkonflikte, die auch mittels Simulation untersucht und soweit wie möglich gelöst werden sollten.

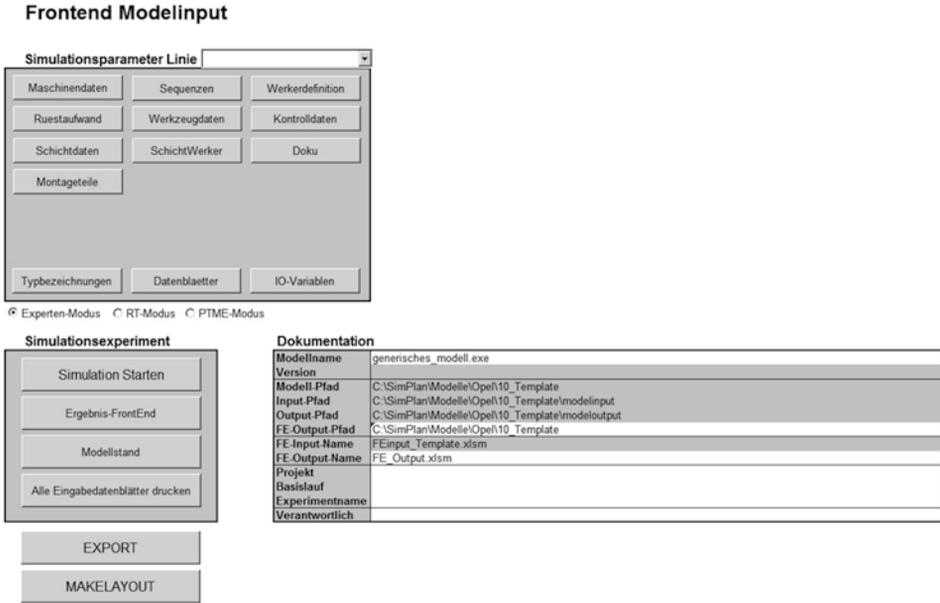
War das Push-Prinzip bis dahin die dominierende Steuerungsstrategie, sollte es nunmehr durch Pull-Prinzipien, zu denen auch das Kanban Prinzip gehört, abgelöst werden. Ursprünglich sollten diese neuen Anforderungen in das zu diesem Zeitpunkt etablierte, auf Queues und einfachen Prozessen basierende, Fertigungsmodell integriert werden. Schnell wurde aber klar, dass damit auch der dem Fertigungsmodell zu Grunde liegende Kernprozess „Operation“ wachsen müsste. Zur Vermeidung eines immer komplexer werdenden Kernprozesses, einhergehend mit zunehmend unübersichtlicherer Parametrierbarkeit, wurde eine grundlegende Erweiterung vorgenommen. Der Kernprozess Operation wurde in wenige, einfachere und für sich betrachtet übersichtlichere Bausteine zerlegt, die bei der Modellierung einer Fertigungslinie in ihrer Gesamtheit und Verknüpfung wiederum das

Gesamtsystem abbilden können und zusätzlich einen Genauigkeitsverlust gegenüber einem eingangs beschriebenen Layoutmodell vermeiden.

Interessant ist, dass es im Rahmen dieses Entwicklungsschrittes einen engen Austausch mit den Entwicklungen gegeben hat, die auf Basis des Simulationswerkzeugs PlantSimulation von Siemens zum sogenannten VDA-Bausteinkasten geführt haben (vgl. Mayer und Pöge 2010). Im Prinzip lehnte sich die Weiterentwicklung des ursprünglichen Queuemodells an die Entwicklungen dieses auf einem anderen Simulationswerkzeug basierenden Bausteinkastens an. Ein radikaler Wechsel des Simulationswerkzeugs kam allerdings nicht in Frage, da damit der bereits gesetzte hohe Modellierungsstandard, insbesondere bei der Abbildung des Personaleinflusses (Werkermodell) und des Maschinenprozesses, aufgegeben oder mit unverhältnismäßig hohem Aufwand hätte portiert werden müssen. Aus diesen Überlegungen resultierte das Konzept eines mit dem Werkzeug AutoMod implementierten sogenannten generischen Modelles. Es sollte durch weitere Zerlegung und Abstraktion unterschiedlicher Prozesse entstehen und in einer Prozessdatenbank münden. Aus der Kombination der funktionsbezogen modellierten Prozesse sollte ein hochgradig detailliertes Gesamtsystem erstellbar sein, das nicht nur Fertigungslinien, sondern auch Montageprozesse inklusive der steuerungstechnischen Interaktionen umfassen kann. Bei allen Neuerungen wurde als Schnittstelle zum Benutzer weiterhin auf MS Excel gesetzt, sowohl auf Seiten der Eingangsdaten als auch der Experimentdurchführung und Ergebnisdarstellung. Wie auch beim Vorgänger, dem queuebasierten Fertigungsmodell, wurden alle in der Vergangenheit verwendeten und damit als validiert zu betrachtenden Werkerabläufe und das Werkermodell übernommen. Gleiches gilt für die etablierten Maschinenprozesse und Abläufe.

Heute verfügt das generische Modell über ca. 40 funktional unterschiedliche Standardprozesse, die frei miteinander kombinierbar sind und sowohl bei der Modellierung von Linienfertigungen als auch Montagelinien zum Einsatz kommen. Einige wenige sollen als beispielhaft genannt werden: Quelle, Senke, Fördertechnik, Zentrum, Cellmaster, Manuelle Be- und Entladung, Werkstückträger-Be- und -Entladung, Reparaturstation, Manueller Transport, etc. Mit dem generischen Modell ist es möglich, eine Vielzahl von Steuerungssystemen wie Push, Pull oder Kanban abzubilden und zu untersuchen. Der Steuerungsprozess „dynamische Maschine“ aktiviert beispielsweise bedarfsabhängig Maschinen oder ordnet sie unterschiedlichen Linien zur Lastglättung zu. Im Bereich der Montage gibt es Prozesse, die verschiedene Strategien zur Verteilung von Motoren auf Prüfstände ermöglichen. Für einige Prozesse gibt es sogenannte AddOns, die Standardprozesse um Spezialfunktionen erweitern. Alle Prozesse sind so entwickelt, dass sie wahlweise im Layout- und im Queue-Modus betrieben werden können. Damit kann das Modell ausgehend vom Blocklayout der Grobplanung bis zum finalen Ausbaustand die Planung begleiten. Es wächst einfach mit.

Die Prozessparametrierung erfolgt weiterhin im Excel-Frontend, welches durch im Hintergrund arbeitende Makros benutzerfreundlicher geworden ist. Abb. 8.3 zeigt beispielhaft eine Maske des Frontends.



**Abb. 8.3** Darstellung des Frontends

Die Vielzahl an Prozessen, Prozessparametern und Werkerauftragsarten ist ohne eine ausführliche Dokumentation nicht beherrschbar. Aus diesem Grund existiert ein Wiki-Server, der als Dokumentationsplattform und Downloadserver für den jeweils aktuellen Modellstand und das Excel-Frontend-Template dient (vgl. Abb. 8.4).

Mit dem generischen Modell ist es durch die Aufspaltung in viele kleine Bausteine möglich, sich wieder stärker dem tatsächlichen Layout des abzubildenden Systems anzunähern. Jedes Fördertechnikelement, jede Maschine, jede Reparaturstation oder auch Prüfplätze können dort im Layout platziert werden, wo sie sich tatsächlich befinden. Im Falle von Motor- oder Getriebemontagelinien ist nahezu kein Unterschied zu den ursprünglich individuell erstellten layoutorientierten Modellen zu erkennen. Insbesondere im Fall von geschlossenen Werkstückträgerkreisläufen kann die Visualisierung der Automatisierungstechnik zum Erkenntnisgewinn beitragen.

Die bereits mit dem Fertigungsmodell erzielten Modellierungszeiteinsparungen konnten mit dem generischen Modell weiter gesteigert werden. Vor allem aber hat sich die Simulationslaufzeit weiter reduziert. Benötigte ein Layoutmodell für die Simulation von beispielsweise 40 Tagen noch zwei Stunden, sind es mit dem generischen Modell nur noch um die fünf Minuten. Möglich wurde dies insbesondere durch straffe, kurze Modellierungen der Prozesse (Codedreduktion).

Mit dem generischen Modell konnte bewiesen werden, dass es auch mit vergleichsweise schon sehr lange auf dem Markt befindlichen Simulationswerkzeugen wie AutoMod möglich

Anmelden

[Hauptseite](#)
[Diskussion](#)
[Lesen](#)
[Quelltext anzeigen](#)
[Versionsgeschichte](#)

**Hauptseite**

Sie befinden sich in der Dokumentation des generischen Modells.

Im Folgenden finden Sie eine Übersicht der Hauptthemenblöcke. Folgen Sie den Überschriften oder benutzen Sie die Suchfunktion. Sollten Sie über die Links auf dieser Seite nicht zu dem gewünschten Artikel gelangen oder auch die Suchfunktion erfolglos sein, ist der Artikel wohl noch nicht angelegt. Um ganz sicher zu sein, versuchen Sie es bitte noch über die Übersicht aller angelegten Artikel und Kategorien.

**Modell**

Hier finden Sie allgemeine Informationen zum **Modell** und alle **Downloads**.

**Modellierung und Validierung**

Hier finden Sie (hoffentlich) Antworten auf viele Fragen der Modellierung, wichtige Hinweise zur Validierung und die FAQ zur Fehlersuche.

**Prozesstypen**

Hier finden Sie eine Übersicht aller **Prozesstypen**.

**Prozessparameter**

Hier finden Sie eine Übersicht aller **Prozessparameter**.

**Werkermodul**

Hier finden Sie alles was das **Werkermodul** betrifft.

**Auftragsarten**

Hier finden Sie alle **Werkerauftragsarten**.

**States**

Hier finden Sie eine Übersicht aller ausgewiesenen **States**.

**IO-Variablen**

Hier finden Sie eine Übersicht aller **IO-Variablen**.

**Ergebnisdiagramme**

Hier finden Sie eine Übersicht aller **Ergebnisdiagramme**.

**Abb. 8.4** Wiki

ist, komplexe bausteinorientierte Simulationsmodelle zu erstellen. Es ist eine Frage der Vorgehensweise bei der Modellierung und natürlich auch von der Erfahrung der Simulationsexperten abhängig, ob ein Simulationswerkzeug für den jeweiligen Anwendungsfall geeignet ist oder nicht.

## 8.5 Ausblick

Wie beschrieben hat sich seit dem Jahr 2000 ein deutlicher Wandel in den Fertigungsstrukturen vollzogen, dem die Erstellung von Simulationsmodellen für die mechanische Fertigung bei der Adam Opel AG durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung gerecht

geworden ist. Diese Entwicklung geht aktuell weiter. So soll ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Zukunftsprojekt Industrie 4.0 neue Maßstäbe in Produktion und Logistik setzen. Bezogen auf die Automobilindustrie, insbesondere den Bereich Antriebsstrang, gibt es Tendenzen, die durch steuerungstechnische Optimierungen kaum noch zu verbessernden linienbezogenen Fertigungsstrukturen in Richtung werkstattfertigungsähnlicher Strukturen zu verändern. Ob und in welchem Umfang dies möglich und unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll ist, bleibt abzuwarten. Sicher ist aber, dass Fragen zu diesem Thema nur mit Hilfe entsprechender Simulationsstudien zu beantworten sind. Auch die Adam Opel AG ist hier aktiv, was zu neuen Anforderungen an die Simulationsmodelle und an deren Entwickler führt. Bei der Umsetzung von werkstattfertigungsähnlichen Strukturen z. B. in einer Getriebeherstellung stellen sich ganz neue Anforderungen an Teilelogistik, Maschinenbelegungsplanung und Überwachung. Inwieweit und vor allem wie diese Herausforderungen in Simulationsmodellen umgesetzt werden, ist ebenso spannend wie anspruchsvoll und damit eines der Zukunftsthemen das u. a. in einem Forschungsprojekt untersucht wird (vgl. Uhlmann et al. 2015).

---

## Literatur

- Gora HJ (2003) Synergien in der Fabriksimulation durch Zusammenarbeit mit Entwicklungspartnern. In: Bayer J, Collisi T, Wenzel S (Hrsg) Simulation in der Automobilproduktion. Springer, Berlin, S 17–27
- Jayaraman A, Gunal AK (1997) Applications of discrete-event simulation in the design of automotive powertrain manufacturing systems. In: Andradóttir S, Healy KJ, Withers DH, Nelson BL (Hrsg) Proceedings of the 1997 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 758–764
- Mayer G, Pöge C (2010) Auf dem Weg zum Standard – Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation, Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 29–36
- Mayer G, Spieckermann S (2010) Life-cycle of simulation models: requirements and case studies in the automotive industry. *J Simul* 4:255–259
- Muller M (2015) AutoMod: modeling the real-world complexities of manufacturing, distribution, and logistics systems for over 30 years. In: Yilmaz L, WKV C, Moon I, TMK R, Macal C, Rossetti MD (Hrsg) Proceedings of the 2015 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 4137–4148
- Sommer A, Steinel A (2003) Planungsunterstützende Simulationswerkzeuge kommen in der Automobilindustrie zunehmend zum Einsatz. In: Bayer J, Collisi T, Wenzel S (Hrsg) Simulation in der Automobilproduktion. Springer, Berlin, S 29–35
- Uhlmann E, Schalllock B, Otto F (2015) Intelligente Werkstattfertigung. *wt Werkstatttechnik online* 4:184–189



**Arnim Steinel** Studierte Allgemeinen Maschinenbau mit Schwerpunkt Fertigungstechnik an der TH Darmstadt. Seit Februar 1993 ist er Angestellter der Adam Opel GmbH in Rüsselsheim. Nach fünfjähriger Tätigkeit in der Fertigungsplanung als Process Engineer ist er aktuell im Bereich Throughput Simulation & Management Systems beschäftigt. Hier ist er verantwortlich für die simulative Abbildung von Bearbeitungs- und Montagesystemen in der Motoren- und Getriebefertigung.



**Stefan Sutter** Erlangte seinen Abschluss im Fach Maschinenbau mit Schwerpunkt Produktionstechnik an der TU Kaiserslautern. Seit 2003 ist er im Bereich Materialflusssimulation bei der Adam Opel GmbH tätig. Zunächst lag das Arbeitsgebiet in der Erstellung von Simulationsmodellen von Fertigungs- und Montagesystemen und der Durchführung von Simulationsstudien sowie Workshops mit den Werken im Rahmen der kontinuierlichen Verbesserung. Im Jahr 2014 übernahm er die Leitung der Arbeitsgruppe Throughput Simulation & Management Systems in der Hauptabteilung Manufacturing Engineering Propulsion Systems.



**Jörg Kemper** Nach Abschluss seines Studiums des allgemeinen Maschinenbaus an der Ruhr-Universität Bochum im Jahr 1991 verantwortlich für den Software- und Projektvertrieb im Bereich Simulation bei der Thyssen Maschinenbau GmbH und ab dem Jahr 1994 Gruppenleiter Ablaufsimulation bei einem Logistikplaner in Dortmund. Mit der Gründung der SimPlan Integrations GmbH im Jahr 2001 Geschäftsführender Gesellschafter und verantwortlich für die Bereiche Vertrieb und kommerzielle Projektabwicklung.



**Dr. Sven Spieckermann** Jahrgang 1967, seit dem Abschluss seines Studiums der Wirtschaftsinformatik an der TU Darmstadt im Jahr 1994 Berater und Projektleiter Simulation bei der SimPlan Gruppe. 1997 Berufung in die Geschäftsleitung und heute Sprecher des Vorstands der SimPlan AG. Promotion über Simulations- und Optimierungsaufgabenstellungen im Jahr 2002 an der TU Braunschweig. Lehrbeauftragter für Simulation an den Technischen Universitäten in Braunschweig, Darmstadt und Karlsruhe (KIT).



# Möglichkeiten, Grenzen und Herausforderungen der Ablaufsimulation hinsichtlich der Gestaltung moderner Motorenmontagekonzepte

9

Jasmin Pennicke und Thomas Strigl

## 9.1 Powertrain-Montagesysteme

Der Produktionsbereich Powertrain (Deutsch: Antriebsstrang) fertigt die Antriebskomponenten eines Fahrzeuges. Hierzu zählen der Motor inklusive seiner Komponenten (konventioneller Motor oder Elektromotor), das Getriebe sowie die Achsen und alle sonstigen für den Antrieb erforderlichen Wellen. Neben der mechanischen Bearbeitung der Teile in der Fertigung müssen diese in Montagesystemen zu vollständigen Antriebskomponenten zusammengefügt werden. Powertrain-Montagesysteme unterscheiden sich aufgrund der Produktgröße und Variantenvielfalt erheblich von der klassischen Fahrzeugendmontage.

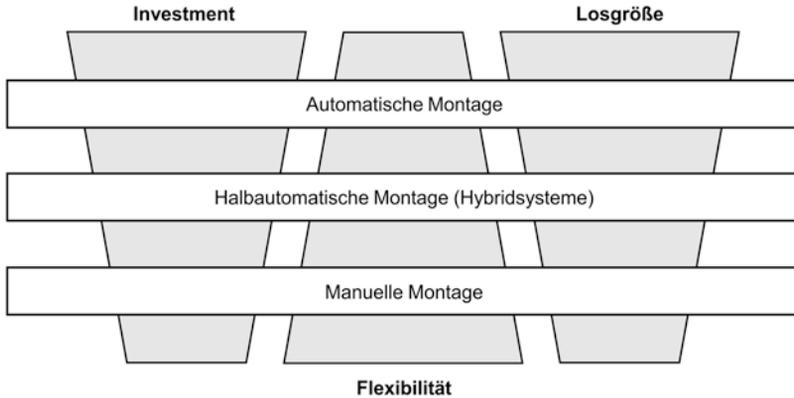
Montagesysteme lassen sich grundsätzlich in automatische, halbautomatische und manuelle Montagesysteme unterscheiden (Abb. 9.1). Die automatische Montage erfordert hohe Investitionen bei großen Stückzahlen. Für kleine Stückzahlen und eine hohe Variantenvielfalt ist eine automatische Montage zumeist nicht wirtschaftlich.

Ein Großteil der aktuellen Montagesysteme im Bereich Powertrain ist den halbautomatischen Montagesystemen zuzuordnen. Dies liegt einerseits an der geforderten Flexibilität und der hohen Variantenvielfalt, andererseits an einer teilweise nicht wirtschaftlich zu realisierenden Vollautomatisierung.

---

J. Pennicke  
Daimler AG, Stuttgart, Deutschland

T. Strigl (✉)  
Baden Baden, Deutschland  
E-Mail: [thomas.strigl@extern.edag-ps.de](mailto:thomas.strigl@extern.edag-ps.de)



**Abb. 9.1** Auswahlkriterien von Montagesystemen (nach Lotter und Wiendahl 2012, S. 3)

Die auch zukünftig steigende Variantenvielfalt in der Automobilindustrie, einhergehend mit kürzeren Produktlebenszyklen, stellt an die planerische Gestaltung der Systeme hohe Anforderungen. Daher gelten folgende Planungsgrundsätze (Lotter und Wiendahl 2012, S. 4):

- die Montage muss flexibler werden,
- der Anteil wiederverwendbarer Komponenten einer Montageanlage muss erhöht werden,
- die Variantenbildung muss zu einem spätestmöglichen Zeitpunkt erfolgen,
- die Montagekosten müssen reduziert werden und
- die Montagesysteme müssen schnellstmöglich die Planstückzahl erreichen.

Eine wichtige planerische Grundsatzentscheidung zur Gestaltung eines Montagesystems ist die Wahl des Montageprinzips. Abb. 9.2 zeigt eine Übersicht über die Fertigungsformen und Anordnungsprinzipien von Montageprozessen nach Grundig (2015). Ein wesentliches Merkmal ist, ob ein Werker stationsgebunden eingesetzt wird. Stationsgebunden bedeutet, dass der Werker die Station nicht verlässt und stets identische Arbeitsinhalte verrichtet. Entweder erfolgt dies an einem festen Arbeitsplatz oder mitlaufend mit dem bewegten Montageobjekt. Bei einer Gruppenmontage hingegen bewegen sich die Werker zwischen den Stationen.

Je nach gewähltem Montageprinzip kann der Transport der Werkstücke zwischen den Stationen manuell durch Personal oder automatisiert durch ein Fördersystem erfolgen. Bei dem Einsatz von Fördersystemen wird zwischen der kontinuierlichen Fließmontage und der intermittierenden Montage unterschieden. Bei einer kontinuierlichen Fließmontage werden die Werkstückträger kontinuierlich gefördert und das Personal bewegt sich parallel dazu. Bei der intermittierenden Montage halten die Werkstückträger in den Montagesystemen an. Diese können in getaktete und ungetaktete Systeme aufgeteilt werden, wobei in getakteten Systemen die Werkstückträger fest mit dem Transfersystem verbunden sind, so dass alle Werkstückträger gleichzeitig transportiert werden. In ungetakteten Systemen können die

	Fertigungsform	Ortsveränderlichkeit Montageelemente		Anordnungsprinzip (Schema)
		Montageobjekt	Montagearbeitsplatz	
Stationäre Montage	Baustellenmontage (BM)* Einzelplatzmontage (EM)**	stationär	stationär	
	Gruppenmontage (GM)		beweglich	
Gleitende Montage	Reihenmontage (RM)	beweglich	stationär	
	Taktstraßenmontage (TM)			
	Fließmontage (FM)	beweglich		

Legende: Montageobjekt    Montagearbeitsplatz    Taktgebender Montagearbeitsplatz

\* am Einsatzort    \*\* am Montageort

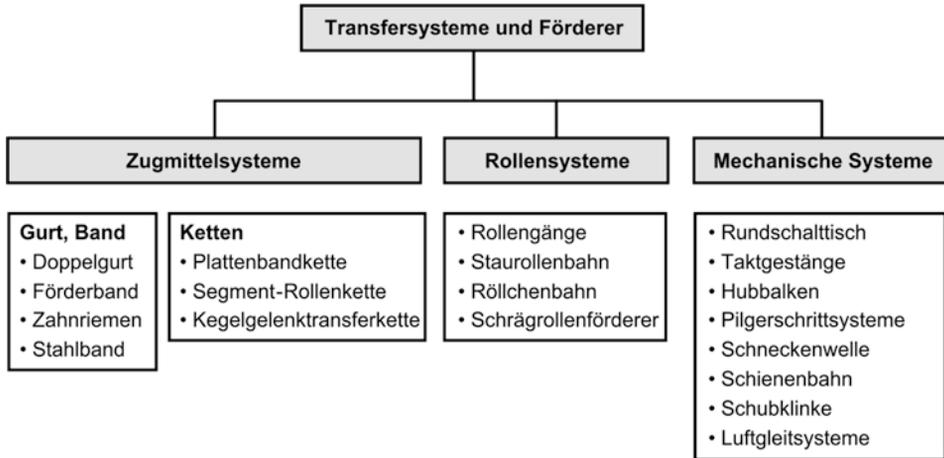
**Abb. 9.2** Fertigungsformen – Montageprozesse (nach Grundig 2015, S. 153)

Transporte zwischen den Stationen unabhängig voneinander stattfinden. Über staufähige Förderstrecken kann ein Puffern der Werkstücke zwischen den Stationen bei schwankenden Taktzeiten stattfinden und dadurch ein Entkoppeln der Stationen realisiert werden.

Für die Realisierung des Transfer- und Fördersystems existieren unterschiedliche Technologien. Abb. 9.3 zeigt einen Überblick.

In Powertrain-Montagen sind Doppelgurtförderer oder auch Staurollenbahnen mit Werkstückträgern sehr häufig anzutreffen. Werkstückträgersysteme ermöglichen eine stabile Aufnahme der Werkstücke und ein genaues Positionieren in den Montagestationen. Das genaue Positionieren ist insbesondere in automatisierten Stationen von Bedeutung.

Die Arbeitsinhalte zur Montage des Produktes müssen so auf Montagestationen aufgeteilt werden, dass auf der einen Seite die geplante Taktzeit eingehalten und andererseits die Montierbarkeit und technische Gestaltung in der Station gewährleistet werden kann. Überschreitet der Arbeitsinhalt in einer Station den geplanten maximalen Arbeitsinhalt, so muss dieser auf andere Stationen verteilt oder in parallele Arbeitsstationen investiert werden. Das Fördersystem muss dieser unter Umständen notwendigen Parallelisierung der Arbeiten Rechnung tragen. Weiterhin sind eventuell erforderliche Prüf- oder Nacharbeitsstrategien in der Gestaltung des Fördersystems zu berücksichtigen. Für die Detailgestaltung der Austattung der Montagestationen wird häufig auch der englische Begriff Line Balancing verwendet.



**Abb. 9.3** Gliederung der Fördersysteme (nach Lotter und Wiendahl 2012, S. 213)

Alle planerischen Maßnahmen, wie die Wahl des Montageprinzips, die Planung des Fördersystems und der Entkopplung zwischen den Stationen sowie die technische Gestaltung und die Ausstattung der einzelnen Stationen, beeinflussen direkt die realisierbare Systemausbringung. Insbesondere die Wahl des Verkettungsprinzips hat einen bedeutenden Einfluss. Grundsätzlich kann zwischen loser, elastischer und starrer Verkettung unterschieden werden. Eine lose Verkettung bedeutet praktisch eine unbegrenzte Pufferkapazität zwischen den Stationen. Hierbei treten keine Verkettungsverluste durch einen Rückstau zwischen den Montagestationen auf. Elastische Systeme hingegen erlauben durch eine begrenzte Pufferkapazität eine gewisse Entkopplung der Systeme. Eine starre Verkettung hingegen ermöglicht keine flexiblen Zwischenpuffer. Dadurch wirken sich alle Störungen oder Taktzeitüberschreitungen innerhalb des starr verketteten Systems direkt auf alle anderen Stationen aus. Generell sind die Verkettungsverluste somit abhängig von Störverhalten und Pufferkapazitäten. Die Materialflusssimulation ermöglicht, diese Einflüsse exakt zu quantifizieren.

## 9.2 Übliche planerische simulationsrelevante Fragestellungen hinsichtlich aktueller Powertrain-Montagesysteme

Eine Aufgabe der Planung ist die Festlegung des grundsätzlichen Montagekonzeptes. Dies bedeutet, dass die Montageprinzipien, das eingesetzte Fördersystem, das Layout des Montagesystems, die Ausstattung sowie die Ausgestaltung der Montagestationen festgelegt werden müssen. Dies geschieht zumeist nicht durch eine einzelne Person, sondern durch eine Gruppe von Planungsexperten. Die Materialflusssimulation ist ein Planungswerkzeug, das die Auswirkung des gewählten Montagekonzeptes auf die zu erwartende Ausbringung zuverlässig bewerten kann. Hierbei wird die Simulation vor allem genutzt, um folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Wird mit dem geplanten Montagesystem die angestrebte Ausbringung erreicht bzw. führen geplante Maßnahmen zur Erreichung dieser Ausbringung?
- An welchen Stellen besteht Optimierungspotenzial (z. B. Anzahl verwendeter Werkstückladungsträger, Änderung von Steuerungslogik)? Sind eindeutige Engpässe in der Linie erkennbar?
- Kann durch die Optimierung der Austaktung eine verbesserte Ausbringung der Montagelinie erreicht werden?
- Welche Auswirkung hat die Wahl eines anderen Montagekonzeptes?
- Was sind geeignete Nacharbeitsstrategien für fehlerhafte Teile?
- Wie wird das Personal in der Montagelinie optimal eingesetzt (z. B. für Mehrmaschinenbedienung, Rüstaufgaben oder bei überschneidender Pausenbelegung)?

Zusammengefasst kann folgende planerische Hauptfragestellung abgeleitet werden: Wie kann die geforderte Ausbringung bei größtmöglicher Flexibilität (Losgröße 1) unter Einsatz von minimalen Investitionen und minimalen laufenden Kosten erreicht werden?

Ein Hauptvorteil der Simulation ist, dass die Daten sämtlicher beteiligter Planungsdisziplinen wie z. B. Layout- und Materialflussgestaltung, Austaktung oder Steuerungstechnik in ein neutrales Bewertungsmodell einfließen. Insofern nimmt die Materialflusssimulation auch eine wichtige Rolle als Diskussions- und Kommunikationsplattform im Planungsprozess ein. Auf Basis der Vorgaben der Planung wird durch einen Simulationsexperten ein Modell erstellt, das zur Beantwortung der Fragestellungen geeignet ist und die Planung bei der Wahl des optimalen Montagesystems unterstützt.

Im Rahmen von Simulationsexperimenten werden in der Regel folgende Kennzahlen ausgewertet:

- Ausbringung pro Stunde
- Anlagenverfügbarkeit/Zustandsanzeige
- Belastung des Personals
- Anzahl Ladungsträger im Umlauf inklusive Nacharbeit
- Anzahl Ausschussmotoren/Wiederholläufer im Prüfbereich

Diese Kennzahlen ermöglichen eine Bewertung des geplanten und simulierten Montagesystems. In Abhängigkeit von der konkreten Fragestellung sind die einzelnen Kennzahlen entsprechend zu gewichten.

---

### 9.3 Modellierung von Powertrain-Montagesystemen

Die Modellierung von Powertrain-Montagen kann mit unterschiedlichen Funktionsbausteinen vorgenommen werden. Die Auswahl der relevanten Bausteine hängt in erster Linie vom abzubildenden Montageprinzip und der gewünschten Modellgenauigkeit und -performanz ab. Generell wird zwischen platz- und taktorientierten sowie längenorientierten Bausteinen unterschieden.

Eine platz- und taktororientierte Modellierung bildet grundsätzlich alle „Plätze“ eines Fertigungssystems mit einer Kapazität und einer Taktzeit ab. Für die Dauer der Taktzeit verharret das Werkstück somit auf einem definierten Platz. So kann z. B. eine Pufferstrecke als eine Aneinanderreihung von Takten modelliert werden. Die Taktzeit ergibt sich aus der Zeit, die das Fördersystem benötigt, um die Werkstücke über die Distanz der Länge eines Werkstückträgers zu transportieren. Der Werkstücktransport, d. h. der Übergang des Werkstücks von einem Platz auf den nächsten, wird in einer rein platzorientierten Modellierung nicht abgebildet. Nach Ende eines Taktes wechselt das Werkstück sofort in Null-Zeit in den nächsten Takt.

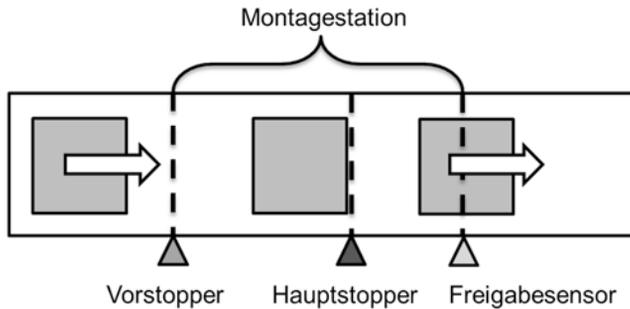
Eine längenorientierte Modellierung hingegen bildet jede Bewegung des Werkstücks korrekt ab. Das bedeutet, die Objekte bewegen sich kontinuierlich entlang der Förderstrecke mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit. In der Abbildung von Stationen kann somit z. B. zwischen Ein- und Ausfahrzeiten sowie Bearbeitungszeiten unterschieden werden. Bei einer längenorientierten Modellierung lassen sich daher Stationsübergänge detaillierter modellieren, und Fragestellungen bzgl. des zeitlichen Verhaltens können wesentlich genauer beantwortet werden.

Zudem besteht die Möglichkeit, platz- und längenorientierte Modellierung zu mischen. Hierdurch ergeben sich allerdings Interpretationsprobleme an den Grenzen dieser unterschiedlichen Ansätze. Ein Werkstück muss eine längenorientierte Förderstrecke kontinuierlich verlassen, gelangt jedoch in Null-Zeit auf eine platzorientierte Montagestation.

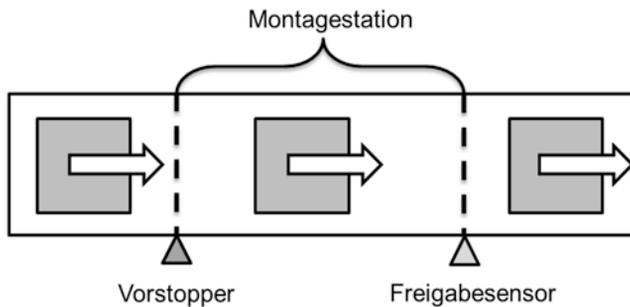
Für die Auswahl von geeigneten Bausteinen müssen zunächst die simulationsrelevanten Montagestationen und -prinzipien betrachtet werden. Ein Großteil aktueller Powertrain-Montagen wird als Fließ- und Taktstraßenmontagen mit fester Zuordnung des Personals zu den einzelnen Arbeitsplätzen realisiert. Durch die Modellierung dieser beiden Konzepte können auch andere Montageprinzipien, wie z. B. U-Zellen aus dem Bereich der Gruppenmontage umgesetzt werden. Die Simulation unterscheidet sich dabei hinsichtlich der Modellierung hauptsächlich durch eine komplexere Gestaltung der Personalauszuordnung zu den Montagestationen. Die Objekte hingegen bewegen sich unabhängig davon fließend oder getaktet entlang des Layouts.

### **Taktstraßenmontage**

Abb. 9.4 zeigt die Prinzipskizze einer getakteten Montagestation. Bei dieser Form der Montage werden die Werkstückträger in der Montagestation an einer definierten Position angehalten; der Mitarbeiter kann an diesem Platz alle Arbeitsinhalte durchführen. In der Regel besteht eine Station jeweils aus Vor- und Hauptstopper und einem Freigabesensor. Ein ankommendes Werkstück wird am Vorstopper so lange zurückgehalten, bis die Arbeitsstation freigegeben wird. Dies geschieht durch die Überfahrt des Freigabesensors. Je nach Stationsaufteilung wird die Freigabe durch Bug oder Heck des ausfahrenden Werkstückträgers ausgelöst. Nach der Einfahrt des Bauteils in die Station wird dieses am Hauptstopper angehalten, und die Bearbeitungszeit beginnt. Ein Freigabesensor ist nicht zwingend erforderlich, da die Freigabe auch durch den Hauptstopper ausgelöst werden kann. Ebenso kann der Vorstopper entfallen, wenn das nachfolgende Bauteil auf das Werkstück am Hauptstopper direkt auffahren darf.



**Abb. 9.4** Funktionsprinzip einer Taktstraßenmontagestation



**Abb. 9.5** Funktionsprinzip einer Fließmontagestation

Bei der Auslegung bzw. Ausstattung getakteter Montagestationen müssen neben der Bearbeitungszeit zusätzlich sowohl Ein- und Ausfahrzeiten als auch Reaktionszeiten entsprechend der Sensorsignale berücksichtigt werden. Darf ein Werkstück z. B. erst einfahren, wenn das vorhergehende Werkstück vollständig aus der Station ausgefahren ist, addiert sich die Taktzeit aus Einfahrzeit, Bearbeitungszeit und anschließender Zeit zum Ausfahren des Werkstücks. Wird hingegen der Vorstopper gleichzeitig mit dem Hauptstopper freigegeben, erfolgt der Werkstückwechsel parallel. Die Taktzeit kann somit um die Ausfahrzeit reduziert werden.

### Fließmontage

Abb. 9.5 visualisiert das Funktionsprinzip einer Fließmontagestation. Im Gegensatz zur getakteten Montage bewegt sich der Mitarbeiter innerhalb solcher Station parallel zum Werkstückträger. Die Zeit, die für die Durchfahrt des Stationsabschnitts benötigt wird, muss dabei größer als die Bearbeitungszeit sein oder dieser entsprechen. Die Durchfahrtszeit kann demnach der Taktzeit gleichgesetzt werden. Optional können Vorstopper und Freigabesensoren verwendet werden, um das Auffahren von Werkstückträgern innerhalb einer Station zu vermeiden.

## Stationszustände

Für die Modellierung aller Montagesysteme ist die Definition verschiedener Stationszustände erforderlich. Anhand dieser Zustände können im Rahmen der Auswertung Engpässe erkannt werden.

Tab. 9.1 zeigt mögliche Definitionen von Zuständen in Anlehnung an deren Beschreibung in der Dokumentation des VDA Automotive Bausteinkastens für die Powertrain-Montagebausteine (VDA 2016). Hierbei wird wie beschrieben zwischen Takt- und Fließbetrieb unterschieden. Außerdem beinhaltet die Tabelle auch Zustände, die auftreten, wenn kein Personal für den Arbeitsplatz zur Verfügung steht. Dieser Fall kann z. B. bei U-Zellen auftreten, die keine feste Zuordnung des Personals zu einzelnen Arbeitsstationen aufweisen. Allerdings treten die Zustände nur im Taktbetrieb auf, da Fließmontagen immer mit fester Personalzuordnung umgesetzt werden.

Der Zustand „100 % Produzierend“ kann hingegen nur bei Fließmontagen auftreten, da dort auch mehrere Werker in einem Arbeitsbereich eingesetzt werden können. Der Zustand macht eine Aussage darüber, ob das Personal in dem Arbeitsbereich ausgelastet ist.

Im Rahmen der Entwicklung des VDA Automotive Bausteinkastens wurde eine längenorientierte Modellierungslösung für die beschriebenen Montagestationen aufgrund von Vorteilen hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit gewählt. Längenorientierte Bausteine bieten besonders bei der Simulation von Fließmontagen deutliche Vorteile gegenüber platzorientierten Objekten, da der Fluss der Werkstücke durch die Linie sehr detailgetreu nachgebildet werden kann. Insbesondere das Verhalten der Montage bei der Verwendung von Stopperrn und Freigabesensoren oder von speziellen fördertechnischen Lösungen wie z. B. komplexe Prüf- und Nacharbeitsbereiche kann nur bedingt und mit viel Modellierungsaufwand durch platzorientierte Bausteine umgesetzt werden.

Beispielsweise kann eine getaktete Montagestation durch eine platzorientierte Modellierung dargestellt werden, solange kein Sonderverhalten durch das Ein- und Ausfahren von Werkstückträgern hervorgerufen wird. Bereits durch das Aufstauen mehrerer Objekte in einer Station müssten die Zeiten für jeden einzelnen Platz in der Simulation berechnet und überwacht werden, wohingegen das Nachrücken der Werkstücke durch Verwendung von längenorientierten Bausteinen bereits ohne zusätzlichen Aufwand abgebildet ist. Die Steuerung des Materialflusses im Simulationsmodell über eine längenorientierte Abbildung aller Sensoren und Stopper ist zusätzlich wesentlich näher an tatsächlichen Automatisierungslösungen. Dies erleichtert im Allgemeinen die Akzeptanz des Simulationsmodells und damit die Modell- und Ergebnisdiskussion mit allen Planungsbeteiligten.

Ein wesentlicher Nachteil dieser Modellierungsform ist die geringere Performanz im Vergleich zu platzorientierten Modellierungsansätzen.

**Tab. 9.1** Simulationszustände von Montagestationen

Zustand	Taktbetrieb	Fließbetrieb
Inaktiv	Die Montagestation ist nicht aktiv.	Die Montagestation ist nicht aktiv.
Ungeplant	Ungeplante Zeit ohne Schicht.	Ungeplante Zeit ohne Schicht.
Pause	Die Montagestation pausiert.	Die Montagestation pausiert.
Einlauf frei	Die Montagestation befindet sich im Wartezustand auf das nächste Werkstück. Es befindet sich kein Werkstück am Eingang der Montagestation.	Kein Werker hat den Zustand „Arbeitend“ oder „Gehend“, und kein Werkstück wartet am Freigabesensor auf den Weitertransport.
Auslauf belegt	Die Bearbeitung eines Werkstücks wurde beendet. Das aktuelle Werkstück befindet sich am Auslauf. Erst wenn das Werkstück ausgefahren wird, wird dieser Zustand beendet.	Kein Werker hat den Zustand „Arbeitend“ oder „Gehend“, aber mindestens ein Werkstück wartet am Freigabesensor auf den Weitertransport.
Störung	Die Montagestation ist gestört.	Die Montagestation ist gestört.
Warten auf Werker	Die Montagestation wartet auf eine Ressource.	–
Warten auf Teile	Die Montagestation wartet auf Anbauteile.	Die Montagestation wartet auf Anbauteile.
Ausfahren	Das Werkstück fährt aus der Montagestation aus. Der Zustand beginnt, sobald die Bearbeitung des Werkstücks beendet wurde. Gibt es keinen Freigabesensor, dann endet der Zustand, sobald das Werkstück den Hauptstopper mit dem Heck passiert hat. Gibt es einen Freigabesensor, dann endet der Zustand, sobald das Werkstück den Freigabesensor passiert.	–
Einfahren	Das Werkstück fährt in die Montagestation ein. Der Zustand tritt nur auf, wenn die Montagestation einen Vorstopper besitzt. Der Zustand beginnt, wenn ein Werkstück am Vorstopper zur Einfahrt freigegeben wird. Der Zustand endet, wenn das Werkstück den Hauptstopper erreicht.	–
Produzierend	Die Bearbeitung eines Werkstücks wird in der Montagestation durchgeführt.	Mindestens ein Werker im Fließbereich hat den Zustand „Arbeitend“ oder „Gehend“
100 % Produzierend	.	Alle Werker im Fließbereich haben den Zustand „Arbeitend“ oder „Gehend“.

## 9.4 Personalintegration in Montagesysteme und Abbildung im Modell

Personal kann in Simulationsmodellen der Powertrain-Montage in unterschiedlicher Detaillierung berücksichtigt werden. Die einfachste Form der Modellierung ist die Berücksichtigung des Personaleinflusses in der Taktzeit von Montagestationen. Das Personal wird hierbei nicht explizit abgebildet. Für erweiterte Fragestellungen, beispielsweise hinsichtlich Mehrmaschinenbedienung und Springer- oder Logistikfähigkeiten des Personals, erlaubt diese Art der Abbildung jedoch keine genauen Antworten. Übliche Fragestellungen bzgl. des Personaleinsatzes sind beispielsweise:

- Wie müssen Personalressourcen ausgelegt sein?
- Welche Qualifikationen muss das Personal aufweisen und welchen Einfluss hat beispielsweise die Mehrfachqualifikation?
- Wie wirken sich Springer auf die Systemleistung aus?
- Welche Auswirkung haben unterschiedliche Pausenregelungen wie z. B. überlappende Pausen?
- Kann das Personal Nebentätigkeiten wie z. B. Bestückung der Montagelinien übernehmen?

Für derartige Fragestellungen muss das Personal selbst als Ressource abgebildet werden. Dies bedeutet, dass Montagestationen erst mit der Bearbeitung beginnen können, wenn eine geeignete Personalressource an der Station zur Verfügung steht. Zusätzlich müssen bei der Abbildung von Personal als Ressource unter anderem folgende Fragestellungen im Modell Berücksichtigung finden:

- Wie werden eventuelle Wege des Personals abgebildet?
- Wie werden persönliche Verteilzeiten abgebildet?
- Hat das Personal eine konstante Arbeitszeit oder ist diese schwankend?
- Was geschieht zu Pausenbeginn mit bereits begonnenen Tätigkeiten?

Prinzipiell kann zwischen unterschiedlichen Arten der Personalintegration in Powertrain-Montagen unterschieden werden:

- Personal Montage
  - Feste Zuordnung zu Montagestation
  - Feste Zuordnung zu Montagestation mit Nebentätigkeiten
  - Mehrmaschinenbedienung
  - Springer
- Personal Logistik
- Personal Instandhaltung/Wartung
- Personal Nacharbeit

Überwiegend wird Personal, das im direkten Zusammenhang mit der Ausbringung der Linie steht, detailliert in einem Simulationsmodell abgebildet. Montagepersonal, das direkt einer Montagestation zugeordnet ist, wird wie anfangs beschrieben nur über die Takt- bzw. Bearbeitungszeit und nicht explizit als Ressource modelliert.

Bekommt das Personal allerdings auch eine Nebentätigkeit zugeordnet, muss die Ressource inklusive ihrer Fähigkeiten und Zuständigkeiten modelliert werden. Anhand dieser Definition können andere Stationen diese definierten Werker abrufen. Besonders im Fall der Mehrmaschinenbedienung muss dabei auch auf die Priorisierung der Tätigkeiten und deren Ablaufreihenfolge geachtet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Simulation von U-Zellenmontagen. Meist muss das Personal dabei in einer vorgegebenen Reihenfolge Arbeitsschritte an mehreren Stationen ausführen. Je mehr Werker dabei im Einsatz sind, desto schwieriger wird die Steuerung der einzelnen Ressourcen. Auch die Reaktion auf Störungen von Stationen oder die Entstehung von Ausschuss muss dabei berücksichtigt werden, da dies Einfluss auf die Tätigkeiten der Werker hat.

Die gleiche Form der detaillierten Modellierung von Personalressourcen muss auch bei der Berücksichtigung von Instandhaltung, Wartung und Nacharbeit angewendet werden. Die Schwierigkeit liegt in diesen Fällen bei der korrekten Angabe von Bearbeitungszeiten. Besonders in der Nacharbeit können die Umfänge stark schwanken und somit auch die Belegung der Personalressourcen. Hinzu kommt, dass die Nacharbeit dadurch Einfluss auf die Anzahl von Werkstückträgern im Montagesystem haben kann, wenn z. B. Motoren inklusive Ladungsträger ausgeschleust werden.

Auf die Abbildung von Logistikpersonal wird im Rahmen von Montagesimulationen weitgehend verzichtet, da diese meist nicht im Fokus der Fragestellung des Montageplaners liegen. Ihr Einfluss wird in der Regel durch Materialverfügbarkeit an der Montagestation abgebildet.

Die Dauer einer Tätigkeit bzw. die Bearbeitungszeit an einer Station wird meist für die Simulation vom Planer vorgegeben. Eine Ermittlung dieser Zeit kann z. B. durch die Anwendung des Methods-Time Measurement (MTM) Verfahrens vorgenommen werden. Auf dieser Basis ist es möglich, die einzelnen Montagestationen auszutakten oder auch die verschiedenen Arbeitsinhalte möglichst gleichmäßig anhand ihres Zeitverbrauchs über die Stationen zu verteilen.

Die Abbildung des Personalverhaltens in verketteten Montagelinien ist allerdings in den meisten Fällen mit Schwierigkeiten behaftet. Besonders die Bearbeitungszeiten sind ein häufiger Diskussionspunkt. Daher ist besonders hier auf die Verwendung der Vorgabezeiten aus der Planung zu achten, wenn diese durch genormte Verfahren ermittelt wurden. Im realen Betrieb sind diese Zeiten vom Werker abhängig – je nach Geschlecht, Alter, Einarbeitungsgrad oder auch täglicher Form können Zeiten für ein und dieselbe Tätigkeit daher stark schwanken.

Besonders in den Bereichen Instandhaltung, Wartung und Nacharbeit ist die Zeitermittlung sehr schwierig durchzuführen, da die Tätigkeiten sich nur selten wiederholen und damit nicht genormt sind. Insofern stellt sich für jede Simulation die Frage, wie exakt Personalressourcen und -zeiten abgebildet werden sollen. Sind die Eingangsparameter zu unscharf, so ist von einer detaillierten Modellierung abzuraten, da sonst eine Scheingenauigkeit erzeugt würde.

## 9.5 Zusammenfassung und Ausblick

Unter Verwendung des VDA Automotive Bausteinkastens werden Montagelinien im Bereich Powertrain standardisiert durch längenorientierte Bausteine in der Simulation abgebildet. Der Detaillierungsgrad ist durch diese Modellierungsform bereits zu Beginn eines Projektes sehr hoch. Allerdings bleibt die Komplexität dabei durch standardisierte Modellierung und einfache Parametrierung beherrschbar. Personal wird meist nur implizit durch Bearbeitungszeiten berücksichtigt. Nur bei alternativen Montagekonzepten ist es sinnvoll, Werker detaillierter abzubilden.

Die Montagesimulation bietet eine neutrale Form der Konzeptbewertung unter Integration aller Planungsbeteiligten. Um im Rahmen des iterativen Planungsprozesses alle erforderlichen Daten in Zukunft effizienter integrieren zu können, werden Schnittstellen zu anderen Planungssystemen realisiert. Diese Vernetzung bietet die Möglichkeit, die Simulation aufwandsärmer und reaktionsschneller in den Planungsprozess einzubinden und so idealtypische Montagekonzepte zu entwickeln.

---

## Literatur

Grundig CG (2015) Fabrikplanung. Carl Hanser, München

Lotter B, Wiendahl H-P (2012) Montage in der industriellen Produktion. Springer, Berlin/Heidelberg

VDA (2016) Dokumentation VDA Automotive Bausteinkasten. Resource document. [http://80.246.62.67/svn/bsk/V06/VDA-Automotive-BSK\\_Dokumentation\\_Plant120\\_V06.030.chm](http://80.246.62.67/svn/bsk/V06/VDA-Automotive-BSK_Dokumentation_Plant120_V06.030.chm). Zugegriffen am 05.05.2016



**Jasmin Pennicke** Maschinenbaustudium an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg in Stuttgart als Auszubildende der Daimler AG mit anschließendem Einstieg in den Konzern 2009. Von 2011 bis 2014 Mitarbeiterin im Bereich Digitale Fabrik mit dem Schwerpunkt Materialflussoptimierung und Mitglied der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation im Verband der Automobilindustrie (VDA). Seit 2016 Teamleiterin im Bereich Layout- und Materialflussplanung Vorbetriebe (Gießerei und Schmiede) Powertrain im Mercedes-Benz Werk Untertürkheim.



**Dr. Thomas Strigl** Nach dem Maschinenbaustudium der Fachrichtung Produktionstechnik an der TH Karlsruhe und der INSA de Lyon von 1996–2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH und Promotion am Institut für Fabrikanlagen der Universität Hannover. Von 2000–2015 Geschäftsführer der iSILOG GmbH, einem Simulationsdienstleister mit Sitz in Baden-Baden. Seit 2015 Leiter Business Development Simulationsdienstleistungen und Software der EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG mit Hauptsitz in Fulda.



Bernd Noche, Mathias Bös und Nan Liu

Automobilfabriken sind praktisch immer in globale Lieferketten integriert. Um die Versorgung dieser Werke sicherzustellen, müssen Lieferketten so robust gestaltet werden, dass sie mögliche Störeinflüsse ausgleichen können. Für die Gestaltung von Lieferketten stellt sich daher die Frage, wo Standorte für Konsolidierungspunkte aufgebaut werden sollen, wie hoch die Bestände in Pufferlagern sein müssen oder wie viele Transporte und Containerbewegungen bewältigt werden müssen. Zur Beantwortung der skizzierten Fragestellungen stellt der Beitrag eine Vorgehensweise und ein methodisches Konzept zur Modellbildung vor. Die Simulationstechnik bietet die Chance, dynamische Einflüsse und die vielfältigen Wechselwirkungen dieser Prozesse zu untersuchen. Dies umfasst auch die Standortoptimierung zur Analyse von Varianten für den Aufbau möglicher Transport- und Lagerungskonfigurationen der betrachteten Lieferketten. Anhand eines Fallbeispiels, das sich auf die Inbound-Logistik bezieht, werden in diesem Beitrag die Anwendung der Simulation erläutert und mögliche Untersuchungsaspekte präsentiert. Es wird aufgezeigt, wie zu untersuchende Risiken in Szenarien umgesetzt werden können und wie sich Versorgungsketten stabilisieren lassen.

---

B. Noche (✉)  
Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Deutschland  
E-Mail: [bernd.noeche@uni-due.de](mailto:bernd.noeche@uni-due.de)

M. Bös  
SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH, Dortmund, Deutschland

N. Liu  
Meerbusch, Deutschland

## 10.1 Einleitung

Die Gestaltung der Versorgung von Produktionsstandorten (Supply Chain Design) und die Konzeption von Betriebsstrategien zu deren Ausführung (Supply Chain Management) sind nicht nur in der Automobilindustrie feste Bestandteile der Planung von Produktionswerken. Günstig ist es, wenn dazu vor der Planung der internen Logistik zunächst die Festlegung der externen Logistik erfolgt. Leider lässt sich dieses Prinzip oft nicht umsetzen, denn es muss, sobald ein Werk steht und sich die Produktionsbedingungen ändern, reagiert werden. Die Versorgungsketten müssen neu justiert werden, Lieferanten werden gegebenenfalls ausgetauscht, globale Lieferketten durch lokale Lieferketten ersetzt. Der Aufbau der Versorgungsketten geschieht unter der Prämisse, dass die Materialversorgung der Werke innerhalb eines vorgegebenen Risikorahmens nicht abreißen darf. Es stellen sich Fragen nach den optimalen Standorten für Konsolidierungspunkte, der Höhe der Bestände innerhalb dieser Pufferlager oder der Anzahl der Transporte und Containerbewegungen. Dabei interessiert die komplette Breite der Betriebsszenarien – in der Spitze und auch bei der Überbrückung von Ausfällen. Für die Versorgung auch in schwierigen Situationen müssen Notkonzepte entwickelt und bewertet werden sowie Notkapazitäten abrufbar sein.

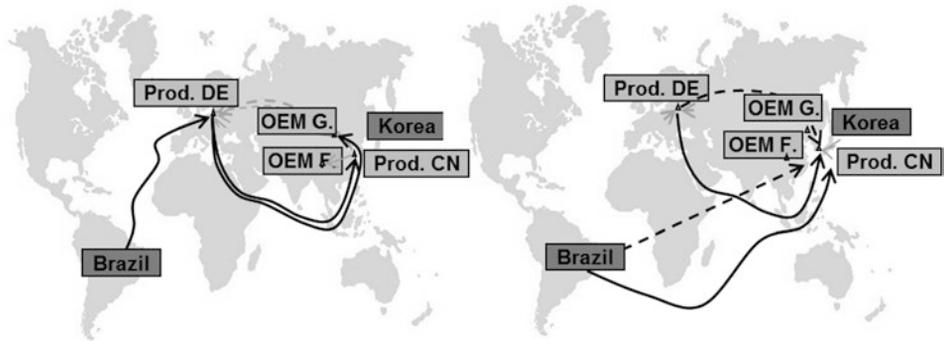
Zur Beantwortung der skizzierten Fragestellungen werden in dem vorliegenden Beitrag eine Vorgehensweise und ein methodisches Konzept zum Aufbau von Simulationsmodellen vorgestellt. Die Simulationstechnik bietet dabei die Chance, stochastische dynamische Einflüsse und die vielfältigen Wechselwirkungen der Logistikprozesse zu untersuchen. Komplizierter ist in diesem Zusammenhang der Aufbau von möglichen Transport- und Lagerungskonfigurationen. Geographische Aspekte spielen ebenso eine Rolle wie der aktuelle Ausbau der Transportinfrastruktur. Diese Aufgabe wird mit Hilfe eines Standortoptimierungsinstrumentes gelöst, mit dem gemäß vorgegebenen Kriterien eine Kombination von günstigen intermodalen Transportverbindungen ermittelt wird. Auf der Basis dieser Vorgaben werden Simulationsmodelle generiert. Sie bilden die Basis für die Analyse von Betriebsszenarien, die das Risiko der Transportkette betreffen. Die Beurteilung von Risiken entlang von Liefer- und Transportketten ist eine Fragestellung, die bisher nur unzureichend wissenschaftlich begleitet worden ist. Anhand eines Fallbeispiels, das sich auf die Inbound-Logistik bezieht, werden in diesem Beitrag einzelne Szenarien erläutert und mögliche Untersuchungen präsentiert. Des Weiteren werden exemplarisch Kennzahlen vorgestellt und beurteilt.

---

## 10.2 Ausgangssituation und Stand der Technik

Teile und Komponenten werden weltweit in Produktionsverbänden hergestellt und anschließend zu den jeweiligen Werken transportiert. Die Gründe für diese Vorgehensweise sind vielfältig, oft sind es die standortabhängigen Herstellungskosten, die in Verbindung mit der Berücksichtigung der Transportkosten den Ausschlag geben, aber auch Qualität und Imagegründe sind zu berücksichtigen.

Tian (2011) hat diese Aspekte detailliert am Beispiel von Automobiltüren dargestellt. In verschiedenen Szenarien untersucht Tian, wie mehrere Baugruppen und eine Unterbaugruppe



**Abb. 10.1** Supply Chain Design am Beispiel von Automobiltüren (Tian 2011, S. 76)

zu den Automobilwerken nach China gelangen (Abb. 10.1) können. In Szenario I werden Baugruppen und eine Unterbaugruppe primär zu einem Konsolidierungspunkt in Deutschland gebracht und anschließend ausgeliefert, die Baugruppen 2 und 3 werden direkt an den Automobilhersteller (Original Equipment Manufacturer – OEM) geliefert. In Szenario II werden weitere Baugruppen aus Spanien und Polen zu einem festgelegten Konsolidierungspunkt nach Deutschland gebracht und dann nach China transportiert. Die Baugruppen aus Brasilien und Korea hingegen werden jeweils direkt nach China transportiert.

Die genannten Fragestellungen überlagern sich auch noch mit Überlegungen des Aufbaus von lokalen Lieferketten (in diesem Fall also mit der Frage, ob Lieferketten in China mit chinesischen Lieferanten etabliert werden können), mit der Konsequenz, dass sich globale Lieferketten einzelner Baugruppen nicht mehr lohnen, weil keine wirtschaftlichen Transportmengen entstehen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Produktionsvolumina zunehmen oder wenn gesetzliche Regelungen in den Zielländern Importe verteuern oder durch administrative Vorgaben zu kompliziert werden. Sensibel sind die Lieferkettenkonzepte auch im Hinblick auf Veränderungen im Absatzvolumen der einzelnen Märkte, wenn Produkte und Modelle auslaufen oder Schwankungen im Modell-Mix eine Abschätzung erschweren.

Auch die lokalen Lieferketten bieten Ansatzpunkte für weitere Überlegungen und Optimierungen. An dieser Stelle kommen Inbound- und Outbound-Fragestellungen zum Tragen. Unter Inbound werden dabei in diesem Beitrag die Lieferkettenprozesse bis zum Wareneingang beim OEM verstanden, während mit Outbound die Lieferkettenprozesse ausgehend vom Wareneingang des OEM bezeichnet werden. In der Literatur werden die Begriffe Inbound oder Outbound hingegen oft nur sehr eng auf Wareneingänge bzw. Warenausgänge beim OEM bezogen. Klaassen (2012) hat die Inbound-Prozesse für den Bereich Engine Services der Fluggesellschaft KLM untersucht und dabei die Simulationstechnik erfolgreich eingesetzt. Van Huyssteen (2014) bezieht sich mit seinem Fallbeispiel ebenfalls lediglich auf die Wareneingangs- und Warenausgangsprozesse.

Die Betrachtung der Inbound- und Outbound-Prozesse hat jedoch auch einen engen Bezug zum Management von Lieferketten (Supply Chain Management – SCM). In ihrer Publikation zur Definition von SCM heben Mentzer et al. (2001) hervor, dass Inbound- und Outbound-Aktivitäten der Logistik zugeordnet werden, die wiederum ein Teil des

SCMs seien. Im Hinblick auf die Automobilindustrie erläutern Iyer et al. (2009) aus der Sicht von Toyota die Thematik des SCMs. Dabei geht es um Standortfragen für Läger der Lieferanten, Häfen, die bevorzugt genutzt werden sollen, und um Belieferungsstrategien, wie z. B. die bedarfssynchrone Anlieferung (Just-in-Time) oder die reihenfolgesynchrone Anlieferung (Just-in-Sequence).

### 10.2.1 Simulation von Transportnetzen

Die Anwendung der Simulationstechnik zur Optimierung von Transportnetzen wird nur relativ selten in der Literatur behandelt. Eine Ausnahme bildet die Publikation von März (2008), die sich intensiv mit dieser Thematik auseinandersetzt und eine Anwendungsumgebung dazu beschreibt. Das Ziel seiner Analysen ist dabei, durch mathematische Optimierung mit dynamischer Betrachtung der Transportvorgänge mit Hilfe von Simulation die Strukturen und Prozesse so auszulegen, dass ein Kompromiss zwischen hohem Liefergrad und minimalen Kosten erreicht wird. Am Beispiel eines Speditionsunternehmens wird seine Vorgehensweise konkretisiert.

Im SCM ist die Gestaltung von Transportnetzen bereits häufiger mit der Simulationstechnik untersucht worden. So werden beispielsweise von Min und Zhou (2002) diesbezügliche Anwendungen der Simulationstechnik beschrieben. Insgesamt wird im Rahmen des Designs von Supply Chains in einer Reihe von Arbeiten der Nutzen der Simulationstechnik anerkannt. Retzlaff-Roberts und Nichols (1997) sind der Meinung, dass Modellierung und Simulation eine effektive Art und Weise sind, die Leistungsfähigkeit von Lieferketten zu bewerten. In ihren Modellen werden individuelle Produktionspläne modelliert, die für begrenzende Produktionskapazitäten erstellt werden. Durch Vereinfachungen soll auch gezeigt werden, wie leistungsfähig die Lieferketten durch optimierte Produktionspläne sind. Arntzen et al. (1995) haben die Entwicklung eines globalen Lieferkettenmodells mittels gemischt-ganzzahliger linearer Optimierung beschrieben. Damit untersuchen sie Aspekte im Zusammenhang mit Standorten von Kunden und Lieferanten, Durchlaufzeiten und Kosten von verschiedenen Transportmodellen.

Archibald et al. (1999) studieren einen hypothetischen global agierenden Nahrungsmittelhersteller mit Produktionsstandorten in Nord-Amerika und betrachten Transportoptionen, Bestandsentwicklungen und kollaborative Planung. Cachon und Zipkin (1999) untersuchen eine zweistufige serielle Lieferkette mit stochastischer Nachfrage. Sie entwickeln ein mathematisches Modell, um konkurrierende und kooperative Bestandspolitiken zu untersuchen. Ein Grundgerüst zur Minimierung der globalen Kosten einer Lieferkette einer Produktion und einer zweistufigen Hierarchie von Lieferanten wird durch Novak und Eppinger (2001) vorgestellt. Dieses adressiert die Wahlmöglichkeit zwischen einer internen Produktion und der externen Beschaffung von Komponenten in der Automobilindustrie und fokussiert sich auf die Verbindung zwischen Produktkomplexität und vertikaler Integration. Tang et al. (2004) entwickeln eine Heuristik zur Integration von Entscheidungen zur Produktzuordnung, Losgrößenbestimmung, Transport und Auftragsgröße für ein logistisches Netzwerk mit mehreren Lieferanten und Kundenbeziehungen in einem globalen Produktionssystem. Zsidisin (2006) studiert Charakteristiken von Inbound-Versorgungen, die die

Wahrnehmung von Risiken betreffen und die eine Klassifikation von Quellen von Versorgungsrisiken erstellen.

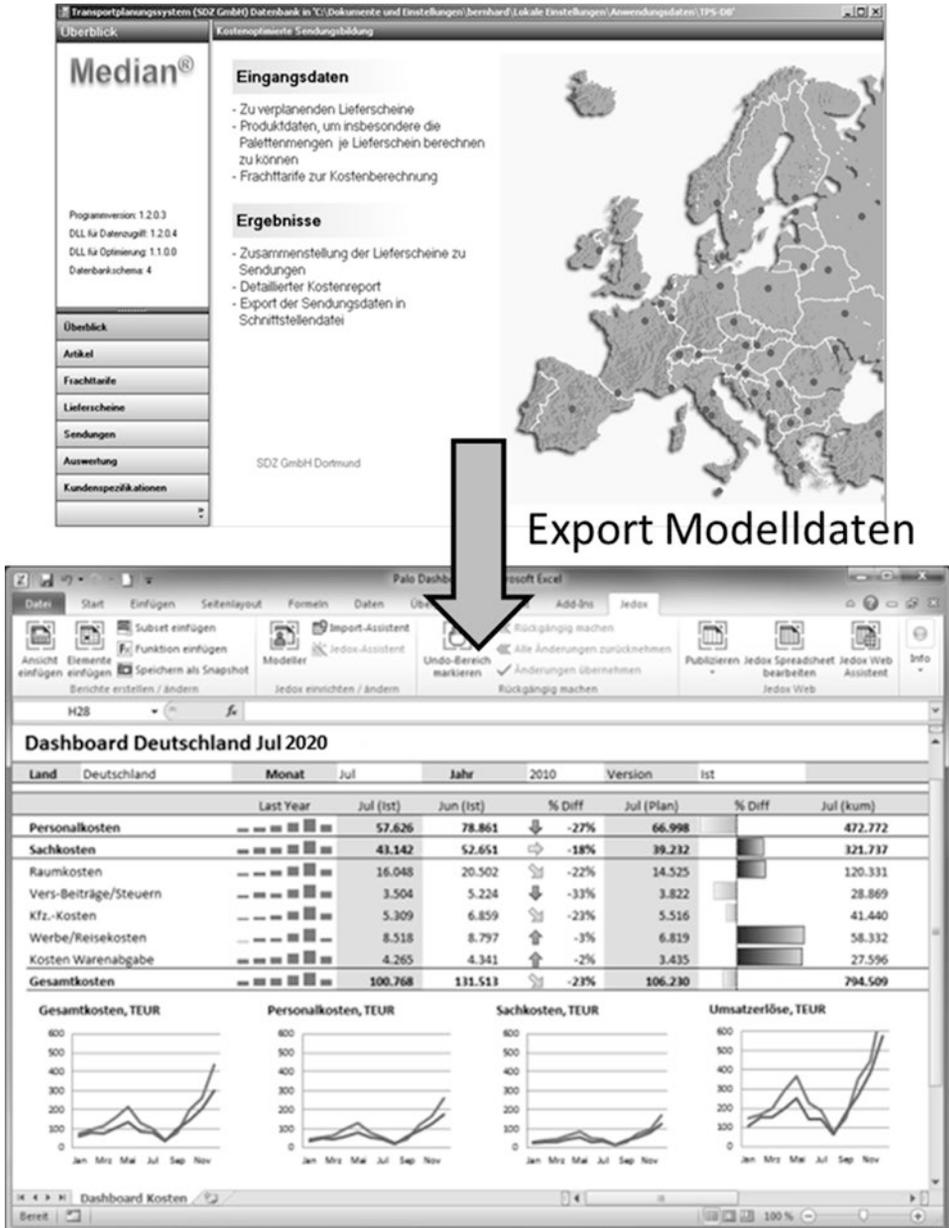
Eine kombinierte Analyse von Standorten in Verbindung mit Lieferkettenkonzepten ist in der Literatur kaum zu finden, insbesondere, wenn es darum geht, die Transportketten detaillierter in Verbindung mit lokalen Gegebenheiten zu betrachten. Des Weiteren muss festgestellt werden, dass viele Veröffentlichungen die Problemstellungen relativ abstrakt behandeln und auf operative Belange nicht eingehen. Dabei ist dies besonders wichtig, da der Abriss einer Versorgungskette für ein Automobilwerk viel höhere Kosten erzeugt, als die Optimierung einer globalen Lieferkette jemals einsparen kann. Für den Aufbau der lokalen Versorgungsketten von Automobilwerken ergibt sich daher eine Fülle von Fragestellungen, die je nach Standort erheblich variieren. Trotzdem kann festgestellt werden, dass immer wieder die gleichen Klassen von Informationen für die Analysen zugrunde gelegt werden können. Für die Inbound- und Outbound-Simulationen werden typischerweise folgende Informationen benötigt:

- Standorte von Produktion und Lieferanten sowie Konsolidierungspunkte,
- Transportentfernungen und Transportzeiten,
- Liefervolumina der einzelnen Lieferanten und Art der Lieferung,
- geplante Produktionsleistung des Automobilwerkes,
- Anzahl und Typ der Transportmittel (Lkw, Schiff, Zug),
- Containeranzahl,
- Transportkostensätze,
- Lagerkostensätze,
- Transportpläne der einzelnen Transportmittel.

Die Simulation liefert Ergebnisse, die die Konfiguration der Transportnetzwerke betreffen und die Systemkosten zum Betrieb des Netzwerkes bestimmen.

### 10.2.2 Standortoptimierung

Ausgangspunkt der Modellierung ist die Planung der Standorte. Vorgegeben sind in einem Beispiel zunächst lediglich der Standort des Automobilwerkes und die Standorte der Lieferanten. Eine wesentliche Information ist die Vorgabe des langfristigen Produktionsvolumens oder eine grobe Programmplanung, aus der die Struktur der Lieferungen entnommen werden kann. Da auf dieser Planungsebene nur sehr vorläufige Informationen vorliegen, müssen die Analysen auf die vorhandene Datengenauigkeit angepasst werden. So ist es beispielsweise völlig ausreichend, die Transportvolumina auf der Basis von Kubikmetern [m<sup>3</sup>] zu ermitteln. Daraus lassen sich die Anzahl Container und das zu lagernde Volumen bestimmen, sodass sowohl die Lagerfläche als auch die ungefähren Abmessungen des Systems festgelegt werden können. Diese Informationen reichen aus, um Flächen in den anvisierten Regionen zu erwerben, Mietverträge abzuschließen und einen ersten Eindruck über die Transport- und Lagerungskosten zu erhalten.



**Abb. 10.2** Zusammenspiel von Standortplanung und Simulationsmodell

Im Folgenden ist der prinzipielle Aufbau eines zweistufigen Entscheidungsunterstützungssystems dargestellt (Abb. 10.2). Ausgangspunkt ist ein Instrument zur Analyse einer vorgegebenen (geplanten oder bestehenden) Modellstruktur. Die Analyse erfolgt auf der Basis eines Geographischen Informationssystems (GIS), d. h., von allen Prozessbeteiligten

werden die Standortdaten über die GIS-Koordinaten eingegeben, die spätere Darstellung der ermittelten Standorte, wie z. B. der Konsolidierungspunkte und Häfen, werden ebenfalls als GIS-Koordinaten ausgegeben und visualisiert. Bestimmt werden auch Routeninformationen, die für die Festlegung der Transportrouten (sowohl von Direktverkehren als auch von Sammelgutverkehren) notwendig sind.

Das Ergebnis der Standortoptimierung wird mit Hilfe eines eigenen Ergebnisdienstes zusammengestellt. Die Basisdaten werden exportiert und an ein Simulations-Cockpit übergeben. Dort dienen die Daten als Ausgangsbasis für den Aufbau des Simulationsmodells. Das Simulationsmodell kann nicht vollständig generiert werden, da eine Reihe von Fragestellungen auf einer operativen Basis entschieden werden müssen. Dazu gehören Informationen, wie z. B. Abfahrtszeitpunkte von Lkw oder Schiffen, Kapazität und Anzahl der eingesetzten Transportmittel oder auch Be- und Entladezeiten.

---

## 10.3 Ein Praxisbeispiel

In Rahmen der Überprüfung des Inbound-Logistikkonzeptes eines Automobilwerkes soll die Simulationstechnik genutzt werden, um verschiedene strategische Entscheidungen zu fällen. Die Ausgangslage und der prinzipielle Aufbau des Modells werden detaillierter erläutert (vgl. Abb. 10.3). In der Region sind viele Lieferanten angesiedelt, die teilweise eigene Konsolidierungspunkte geschaffen haben. Gesucht wird ein Standort für den Bau eines Konsolidierungslagers und die Planung der Transportketten. Neben den Kosten interessieren vor allem Fragestellungen im Hinblick auf die Versorgungssicherheit des Automobilwerkes.

### 10.3.1 Modellbeschreibung

Im Modell werden Standorte und Konsolidierungspunkte (KP) sowie Transporte (TP) zwischen den einzelnen Standorten abgebildet (Abb. 10.3).

Das Lieferantenkonsolidierungszentrum (LKZ) ist ein zentraler Anlaufpunkt für Lieferanten, die Transporte in kleineren Gebinden abliefern. Üblicherweise werden über Routentransporte (Sammelgutverkehre, z. B. in Form von Milk-runs) eines Logistikdienstleisters die einzelnen Lieferanten in regelmäßigen Zeitabständen angefahren und ihre Produktion eingesammelt. Weitere Transporte ergeben sich durch Direkttransporte von Lieferanten mit großvolumigen Gütern und durch Lieferanten, die sich zusammengeschlossen haben und selbst kleinere Konsolidierungspunkte betreiben. Im LKZ können verschiedene logistische Aufgaben als Mehrwertdienste (Value-added-Services – VAS) durchgeführt werden. Vom Direktumschlag (Cross-docking) über die Konsolidierung kleinerer Gebindemengen in Container (CH) können auch Dienste zur Bereitstellung leerer Container angeboten werden. Im vorliegenden Fall müssen die Container zum nächstgelegenen Hafen gebracht werden, um dann via Schiff zu einem Hafen in der Nähe des Automobilwerkes zu gelangen. Von dort aus werden die Container per Lkw zum Werkslager gebracht.

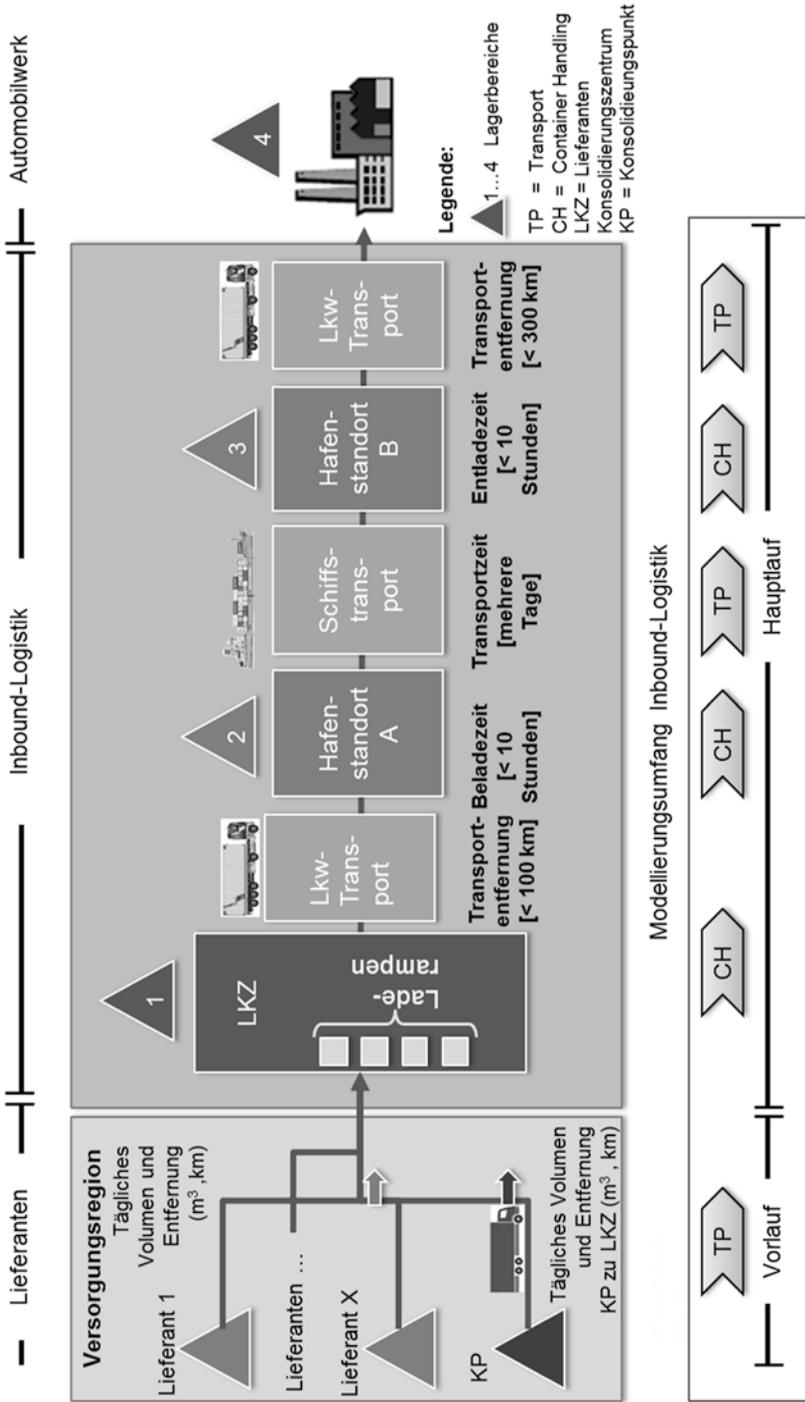


Abb. 10.3 Modellierungsumfang für die Untersuchung der Inbound-Logistik

Für den Aufbau des LKZ stehen verschiedene Standorte zur Auswahl. Die Standortentscheidung hängt von vielen Faktoren ab. Neben Aspekten wie Kosten für den Bau des Lager- systems spielen auch die Transportkosten von den Lieferanten in das Lager und die Transportkosten vom LKZ zum Hafen eine entscheidende Rolle. Darüber hinaus sind auch die Umlaufzeiten der Lkw zu bestimmen, der Lkw-Einsatz muss kontinuierlich möglich sein. Des Weiteren muss geprüft werden, inwieweit mit diesem Gesamtkonzept die Versorgung des Automobilwerkes sichergestellt werden kann, da zwischen dem LKZ und dem Automobilwerk ein multimodaler Transport mit einer Reihe von Risiken liegt. So können beispielsweise einzelne Schiffe ausfallen, ein derartiger Ausfall hätte große Auswirkungen, da er eine Vielzahl an Containern und Waren betrifft. Zudem kann durch starken Wind der Hafen stillgelegt werden, sodass die Kräne nicht mehr die Container verladen können. Prinzipiell können diese Risiken bis zu einem bestimmten Umfang, z. B. durch entsprechend große Pufferlager im Automobilwerk, abgedeckt werden. Die kontinuierliche Reduzierung der Höhe der Umlaufbestände ist jedoch im Gegensatz dazu ein erklärtes Ziel des Lean Managements.

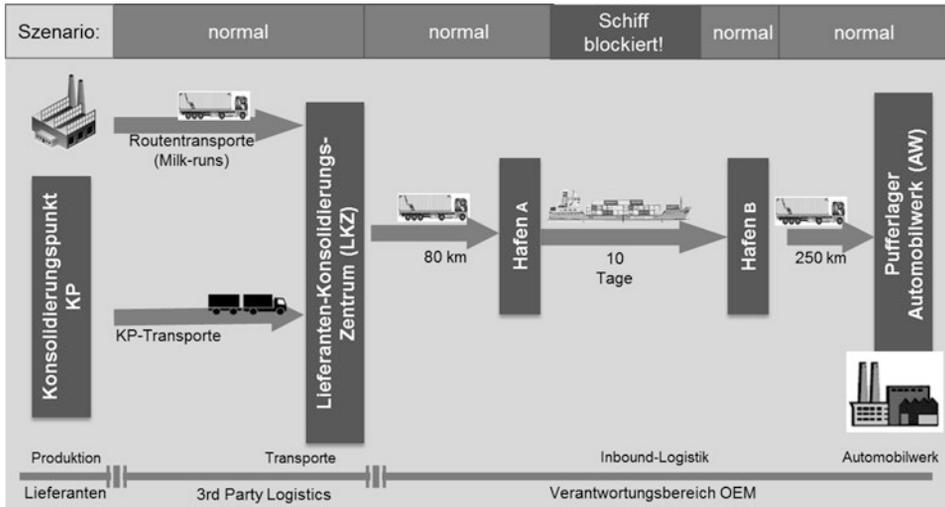
Folgende Fragestellungen sollen konkret durch die Simulation beantwortet werden:

- Kann innerhalb der vorgegebenen Zukunfts- und Risikoszenarien eine 100-prozentige Versorgung der Produktion gewährleistet werden?
- Welcher Standort soll als Konsolidierungspunkt gewählt werden?
- Wie groß muss der Konsolidierungspunkt werden?
- Wie viele Rampen benötigt der Umschlagspunkt?
- Mit welcher Anzahl an Lkw muss insgesamt zur Bewältigung des Transports gerechnet werden?
- Welche Transportzeiten ergeben sich?
- Mit welchen Transportkosten (Lkw und Schiff) muss gerechnet werden?
- Wie sieht ein Notfallplan aus?
- Wie verhält sich das Transportnetzwerk in einzelnen Szenarien?

Für die Beantwortung dieser Fragen müssen Experimentserien festgelegt werden. Dies erfolgt gemeinsam mit allen Projektbeteiligten bereits zu Beginn des Projektes, um das Modellkonzept auf die Beantwortung dieser Fragen ausrichten zu können. Die Analyse erfolgt gemäß dem Experimentplan und startet mit Daten, die aus der Standortplanung übernommen werden können.

### 10.3.2 Untersuchung von Szenarien

Um zu einer Investitionsentscheidung zu gelangen, werden verschiedene Szenarien festgelegt und mit Hilfe der Simulationstechnik untersucht. Im Folgenden sind fünf Szenarien skizziert:



**Abb. 10.4** Veranschaulichung der zu untersuchenden Szenarien am Beispiel des Ausfalls eines Schiffes

- Szenario I: alles normal
- Szenario II: Verkehrsstau
- Szenario III: Häfen geschlossen
- Szenario IV: Schiff blockiert
- Szenario V: Hafen geschlossen und Schiff blockiert

Zur Veranschaulichung der Szenarien dient ein vereinfachtes Flussdiagramm (Abb. 10.4). Dargestellt sind die verschiedenen Transport- und Lagerungsabschnitte sowie die markierten Ausfallszenarien.

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsläufe werden pro Experiment in einem Auswertungsblatt zusammengefasst (vgl. Abb. 10.5), diese Abbildung stellt die Situation eines Basisexperimentes dar. Im oberen Abschnitt der Tabelle sind relevante Eingabeparameter zusammengestellt. Auf der linken Seite der Tabelle werden wesentliche Kennzahlen des Experimentes ausgegeben, die eine Überprüfung der Simulationsergebnisse durch den Anwender ermöglichen. Dieser kann die Ergebnisse durch den Vergleich mit Real- oder Plandaten überprüfen und so das Simulationsmodell validieren. Auf der rechten Seite der Tabelle finden sich dazu im Wesentlichen Angaben zur Umrechnung der Ergebnisse in Kosten des Szenarios (sowie zusätzliche Kennzahlen zur Übersicht).

In dem dargestellten Szenario (Abb. 10.4) fällt ein Schiffstransport aus, der die Güter von mehreren Lieferanten transportiert. Es wird davon ausgegangen, dass kein weiteres Schiff zur Verfügung steht, um die Fracht zu übernehmen und Alternativen wie Zug- oder Lkw-Transport nicht kurzfristig greifen können.

In den Diagrammen (vgl. Abb. 10.6) ist zu erkennen, dass der Ausfall eines Schiffes tatsächlich gravierende Auswirkungen auf den Lagerbestand in Hafen B hat; auch der Bestand im Pufferlager des Automobilwerkes ist über einen signifikanten Einbruch betroffen – allerdings ist die Versorgung der Produktion nicht gefährdet. Für die Beurteilung der Szenarien

Szenario: Normale Situation			
Anfangsbestand im Hafen A (Faktor)	2	LKZ-Standort	Stadt XXX
Anfangsbestand Im Werk (Faktor)	3	Durchschnittlicher Bestand Hafen B	16.000
Ziel-Durchführungszeit Not-Transport (Tage)	40	Durchschnittlicher Bestand Pufferlager AW	24.000
Vorbereitungszeit Not-Transport (Tage)	8	Gesamtkosten	485.477
Transport-Volumen	m <sup>3</sup>	Transportkosten	479.901
Routenumlauf	5.200	Routenumlauf (€)	98.906
KC	1.324	KC (€)	933
LKZ zu Hafen A	8.561	LKZ zu Hafen A (€)	45.261
Schiff	8.562	Schiff und Hafen B zu Pufferlager AW (€)	334.801
Werk	8.560	LKZ-Kosten	5.576
Anzahl Lkw-Transporte	Anzahl	Bestandskosten (€)	2.296
Routenumlauf	407	Handhabungskosten (€)	3.280
KC	33	LKZ	Anzahl
Hafen A	213	Anzahl Rampen LKZ WE	27
Hafen B zu Pufferlager AW	213	Anzahl Rampen LKZ WA	85
Durchlaufzeit Transporte	Mittel Tage	LKZ-Fläche (m <sup>2</sup> )	16.275
Routenumlauf	3	Anzahl Container pro Tag	Anzahl
KC	1	LKZ zu Hafen A	213
LKZ zu Hafen A	1	Hafen B zu Pufferlager AW	213
Hafen B zu Pufferlager AW	6	pro Schiff	213

Pufferlager AW: Pufferlager Automobilwerk      LKZ: Lieferanten Konsolidierungszentrum

Abb. 10.5 Standardauswertungsblatt zur Bewertung der Szenarien

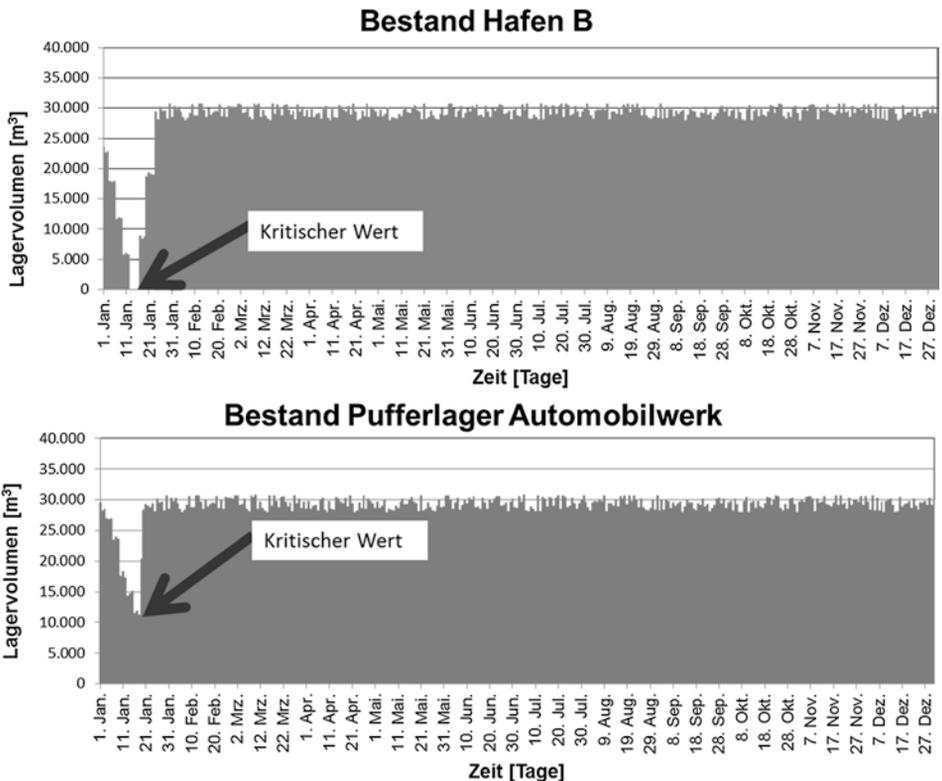
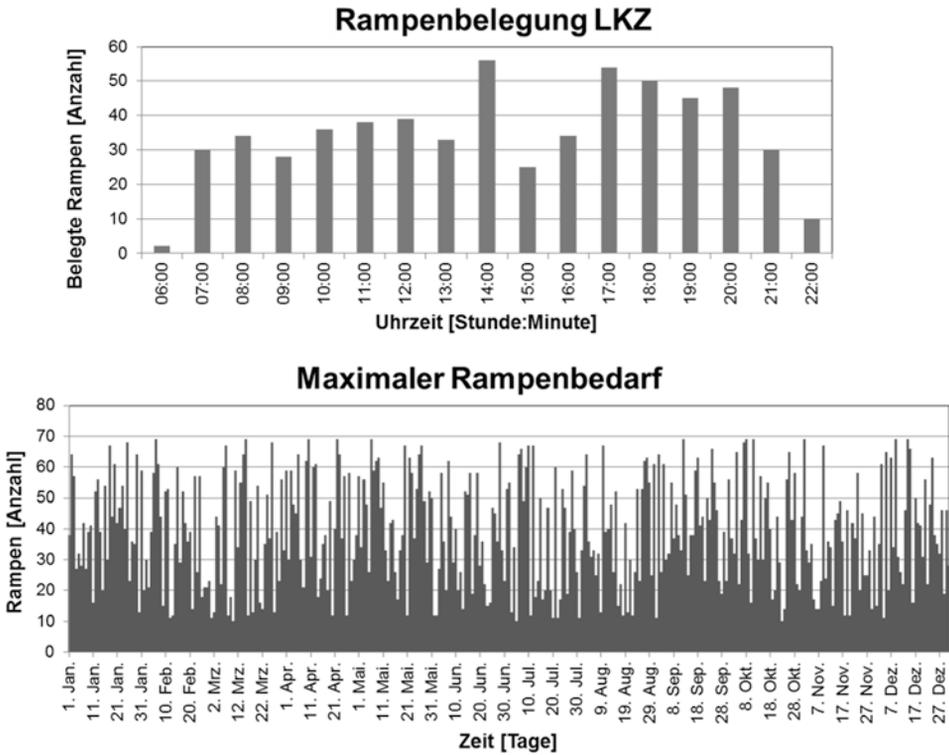


Abb. 10.6 Bestandsverläufe in kritischen Lagerbereichen



**Abb. 10.7** Rampenbedarf im LKZ

müssen Schwellenwerte festgelegt werden. Dazu gehört beispielsweise die Beantwortung der folgenden Frage: Wie viele Tage soll das Pufferlager im Automobilwerk überbrücken können, wenn die Versorgung aus dem Hafen (z. B. bei Streik) vollständig zum Erliegen kommt?

Mit der Durchführung der Simulation ergeben sich weitere Kennzahlen, die Informationen über den Rampenbedarf liefern. Im Beispiel (Abb. 10.7) schwankt der Bedarf um 60 Plätze (zwischen Minimum und Maximum); auch im Tagesverlauf ergeben sich interessante Ergebnisse, da weder eine gleichmäßige Belegung aller Rampen erreicht wird noch ein einzelner Zeitraum mit einem Spitzenbedarf an Rampen festgestellt werden kann. Die Anzahl der Rampen für eingehende Ware liegt bei etwa 25 % der Gesamtanzahl. Dies ergibt sich durch die erheblich längere Beladezeit beim Warenausgang.

## 10.4 Zusammenfassung und Fazit

Im vorliegenden Beitrag wird ein Entscheidungsunterstützungssystem vorgestellt, das sich speziell mit der Thematik der Inbound-Logistik befasst. Bei dem Design von Lieferketten werden oft globale Aspekte in den Vordergrund gestellt und Kosteneinsparungen ausgewiesen, die sich durch Rationalisierungen in der Produktion und der Vermeidung

von Transporten bzw. Bündelungen ergeben. Übersehen wird dabei, dass der Aufbau der Transportketten in Verbindung mit der Auswahl von Konsolidierungspunkten ebenfalls Risiken enthält und dass Einsparungen, die auf globaler Ebene erzielt werden, auf lokaler Ebene wieder verloren gehen können.

Das Entscheidungsunterstützungssystem besteht im Wesentlichen aus einem Instrument zur Unterstützung der Standort- und Routenplanung und einem Simulationsmodell. Das Simulationsmodell wird auf der Basis der Standortdaten generiert und durch zusätzliche Informationen vervollständigt. Diese Informationen sind oft Gegenstand von weiterführenden Optimierungsschritten, die allerdings der Standortoptimierung nachgelagert sind.

Vorgestellt wird die Vorgehensweise an einem konkreten Fallbeispiel. Dies umfasst einen intermodalen Transport der Güter über mehrere Konsolidierungspunkte bis zum OEM. Diese werden über Routenverkehre von Lieferanten und Depots eingesammelt. In Konsolidierungszentren erfolgt die Verdichtung zu Containern, die zunächst mittels Lkw-Verkehren transportiert und im nächsten Abschnitt per Schiff bis zu einem Hafenstandort in der Nähe des OEM transportiert werden. Von dort gelangen die Container schließlich über weitere Lkw-Transporte in das Pufferlager des OEM.

Zur Analyse der Abläufe und Überprüfung der Transportkonzepte werden mehrere Szenarien präsentiert. Wichtigstes Kriterium ist dabei die Sicherstellung der Produktionsversorgung des Automobilwerkes. Dazu werden systematisch Risikoszenarien abgeleitet, die die einzelnen Komponenten der Transportketten betreffen – auch Überlagerungen von Risiken können betrachtet werden. Beispielsweise werden zur Risikominimierung Notfallpläne erstellt und simuliert, um abschätzen zu können, inwieweit diese Pläne greifen. Die Risikoszenarien betreffen auch Ausfälle von Transportkomponenten und Lagersystemen. Ursachen können Wettereinflüsse, Streiks oder auch Produktionsunterbrechungen eines Lieferanten sein.

Das entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem hat sich im praktischen Einsatz bewährt. Besonders der schnelle Aufbau von Simulationsmodellen bei sich ändernden Rahmenbedingungen hat sich als vorteilhaft erwiesen. Das Konzept, die Ergebnisse übersichtlich auf einer Seite in Tabellenform darzustellen, ist ebenfalls ein Erfolg. Dargestellt werden sowohl Eingabeparameter als auch Ergebnisse der Experimente und die jeweils resultierenden Kosten. Nicht alle Ergebnisse ergeben sich aus der Simulation und Optimierung. Manche Informationen ergeben sich aus Randbedingungen, wie z. B. die Festlegung der Flächenbedarfe. Derartige Daten sind in das Ergebnisblatt integriert, um einen besseren Überblick über die Szenarien zu erhalten und diese besser vergleichen zu können.

Die Simulation zur methodischen Unterstützung der Standortoptimierung wird aktuell noch wenig eingesetzt. Dabei bietet diese Anwendung umfangreiche Optimierungspotenziale. Aufgrund fehlender Transparenz bei der heutigen Analyse und Planung von Lieferketten können weder optimale Standorte ermittelt noch die Knoten und Kanten des Transportnetzwerkes bedarfsorientiert dimensioniert werden. Durch den Einsatz der Simulationstechnik können diese Transportnetzwerke dynamisch und für unterschiedliche Anforderungen untersucht werden. Zudem werden durch die Berücksichtigung von Risikofaktoren in der Simulation die Transportnetzwerke prozesssicher und kosten- und serviceoptimal gestaltbar.

## Literatur

- Archibald G, Karabakal N, Karlsson P (1999) Supply chain vs. supply chain. Using simulation to compete beyond the four walls. In: Farrington PA, Nembhard HB, Sturrock DT, Evans GW (Hrsg) Proceedings of the 1999 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 1207–1214
- Arntzen BC, Brown GG, Terry Harrison P, Trafton LL (1995) Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interfaces* 25:69–93
- Cachon GP, Zipkin PH (1999) Competitive and cooperative inventory policies in a two-stage supply chain. *Manag Sci* 45:936–953
- Iyer A, Seshadri S, Vasher R (2009) Toyota supply chain management: a strategic approach to Toyota's renowned systems. McGraw Hill Professional, New York
- Klaassen M (2012) Improving inbound logistics at KLM engine services. Master Thesis, Department of Industrial Engineering & Management, Universität Twente
- März L (2008) Anwendungsumgebung zur Simulation und Optimierung von Transportnetzen. In: Engelhardt-Nowitzki C, Nowitzki O, Krenn B (Hrsg) Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement. Gabler GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, S 105–119
- Mentzer JT, De Witt W, Keebler JS, Min S, Nix NW, Smith CD, Zacharia ZG (2001) Defining supply chain management. *J Bus Logist* 22:1–25
- Min H, Zhou G (2002) Supply chain modelling: past, present and future. *Comput Indust Eng* 43:231–249
- Novak S, Eppinger SD (2001) Sourcing by design: product complexity and the supply chain. *Manag Sci* 47:189–204
- Retzlaff-Roberts D, Nichols EL Jr (1997) Using computer simulation to reduce supply chain cycle time. FedEx: center for supply chain management. *Cycle Time Res* 3:69–78
- Tang J, Yung KL, Ip AWH (2004) Heuristics-based integrated decisions for logistics network systems. *J Manuf Syst* 23:1–13
- Tian Y (2011) Automotive supply chain evaluation with conventional model and integrated model. Dissertation, Universität Duisburg-Essen
- Van Huyssteen F (2014) Simulation provides insight needed to balance warehouse in/outbound demand. In: Tolk A, Diallo SY, Ryzhov IO, Yilmaz L, Buckley S, Miller JA (Hrsg) Proceedings of the 2014 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 4183–4184
- Zsidisin GA (2006) Managerial perceptions of supply risk. *J Supp Chain Manag* 39:14–26



**Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche** Nach dem Studium der Technischen Kybernetik an der Universität Stuttgart wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Förder- und Lagerwesen der Universität Dortmund von 1982–1983 und am Fraunhofer-Institut für Transporttechnik und Warendistribution, dem heutigen Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund, von 1983–1987. Im Jahr 1989 Promotion an der Universität Dortmund. Seit 1987 Geschäftsführer der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH in Dortmund und seit 2000 Professor an der Universität Duisburg-Essen und Inhaber des Lehrstuhls Transportsysteme und -logistik. Ab 2014 Vorstandsvorsitzender des Zentrums für Logistik und Verkehr als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Duisburg-Essen.



**Mathias Bös** Seit dem Abschluss des Studiums des Maschinenbaus an der TU Dortmund im Jahr 1997 zunächst Projekt Ingenieur bei der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH; später Leiter für Simulationsprojekte in den Bereichen Logistik, Produktion und Flughafen. Seit 2001 Geschäftsführer der SDZ GmbH. Fachausschussmitglied im Verein Deutscher Ingenieure für Digitale Fabrik und Logistiksysteme und -management. Mitglied in der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) und im Innovationsbeirat des LOG-IT-Club.



**Dr.-Ing. Nan Liu** Geb. am 27.11.1981 in Shaanxi (China), war vom 15.08.2010 bis 31.08.2013 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Transportsysteme und -logistik, Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Duisburg-Essen tätig und promovierte im Jahr 2015. Vom 01.08.2008 bis 01.10.2015 war er bei der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH in Dortmund als Projektleiter beschäftigt.



Bernd Noche und Mathias Bös

Durch eine fortschreitende Vernetzung aller Partner und Prozesse innerhalb von Lieferketten ergeben sich neue Risiken bei der Fabrik- und Logistikplanung. Geschäftsprozesse werden immer stärker gekoppelt, so dass Sicherheiten innerhalb dieser Prozesse weiter reduziert werden. Gleichzeitig steigt marktbedingt die Dynamik innerhalb der Lieferketten, wohingegen die Vorhersagbarkeit dieser Dynamik nur schwer möglich ist. Dies führt zu Systemen, die immer stärker situativ (zustandsorientiert) gesteuert werden.

Die Automobilindustrie ist Vorreiter bei der Vernetzung mit Lieferanten. Gleichzeitig reduziert sie noch weiter bestehende Sicherheiten in den Lieferketten (Supply Chains). Dies hat Auswirkungen auf die Fabrik- und Logistikplanung. Neben den Abläufen innerhalb der Gebäude geraten auch die Prozesse auf dem Werksgelände außerhalb der Gebäude immer stärker in den Blickpunkt der Planung. Dies beinhaltet die Werkverkehre, um Produktion und Logistik mit Material oder Ware zu versorgen sowie den Versand (Abtransport) von Ware. Diese Werkverkehre resultieren in einem Güterverkehr, der über das Werksgelände geführt (und dazu gesteuert) werden muss. Bei Schichtwechsel werden diese Verkehre zudem durch Individualverkehre der Mitarbeiter überlagert.

---

B. Noche (✉)  
Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Deutschland  
E-Mail: [bernd.noch@uni-due.de](mailto:bernd.noch@uni-due.de)

M. Bös  
SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH, Dortmund, Deutschland

## 11.1 Ausgangssituation

Mit dem Outsourcing (Auslagerung von Leistungen) in vielen Bereichen der Automobilindustrie konnten erhebliche Rationalisierungspotenziale aktiviert werden. Logistikdienstleister bringen dabei die Zulieferteile von nahen Industrieparks, aber auch von ferneren Produktionsstandorten an die Montagearbeitsplätze der Fahrzeughersteller. Die Rolle der Automobilfabriken verändert sich dadurch, sie werden mehr und mehr zu Montagefabriken mit Rohbau- und Lackieranlagen. Dies hat Konsequenzen für die Fabriken. Einerseits betrifft dies die Struktur der Hallen. Die modernen Automobilfabriken bieten im Bereich der Montage eine Architektur, die günstig für das Andocken von LKW und Trailer ist und die viele Rampen anbietet. Zwei Beispiele verdeutlichen den Trend (vgl. Abb. 11.1).

Diese Werke wurden nach dem Paradigma „Form Follows Flow“ (die Form folgt dem Materialfluss) des Architekten Henn (1995) aufgebaut. Allerdings lässt sich dies nicht überall umsetzen, speziell in den Automobilwerken, die schon vor Jahrzehnten gebaut worden sind. In den Werken, die praktisch aus rechteckigen, großen Montagehallen oder aus verteilten Hallen auf einem Werksgelände bestehen, lässt sich dies nicht realisieren. Durch die Auslagerungskonzepte kommen immer mehr Verkehre auf das Werksgelände. Dies verursacht viele Probleme: Blockade von Zufahrtswegen, Stauungen auf dem Werksgelände, starken Verkehr und belegte Parkflächen. Aber nicht nur auf dem Werksgelände ergeben sich Probleme. Der Verkehr vor den Werkstoren wird intensiviert und kann auf den Zufahrtsstraßen zu langen Stauungen im öffentlichen Verkehr führen. Damit werden Anwohner belästigt, die nicht nur Feinstaub und Lärm befürchten müssen, sondern auch zu Stoßzeiten häufig ihrerseits im Stau stehen. Diese Aspekte führen zu Protesten der Anwohner, die sich nicht selten zu Bürgerinitiativen zusammenschließen, um den Ausbau der



Werk Opel, Rüsselsheim (Google Maps 2015)

Werk Smart, Sarreguemines (Google Maps 2015)

**Abb. 11.1** Beispiele moderner Automobilwerke, Montage

Werksgelände zu verhindern. Auch die Behörden sind sensibilisiert und prüfen die Auswirkungen derartiger Vorhaben auf den öffentlichen Verkehr mittlerweile sehr umfassend. Dazu lassen sich auch Behörden die zukünftig zu erwartenden Auswirkungen dieser Vorhaben durch den Einsatz der Simulation im Rahmen der Genehmigungsverfahren aufzeigen. Im vorliegenden Beitrag wird vorgestellt, welche Fragestellungen im Zusammenhang zu den resultierenden Werkverkehren mit Hilfe der Simulationstechnik beantwortet werden können, welche Daten verwendet werden und welche Lösungsansätze sich ergeben.

---

## 11.2 Simulation der Transportverkehre

Der Transport der Güter in und zwischen den Werken hat einen großen Einfluss auf Umlaufzeiten, Materialbestände, Auslastungen von Flächenkapazitäten vor und in den Werken sowie auf die Kosten der einzelnen Transportvorgänge. Die Betriebsregeln in den Werken werden erheblich von der Materialverfügbarkeit bestimmt. In vielen Simulationsstudien wird davon ausgegangen, dass die Verfügbarkeit des benötigten Materials sichergestellt ist und dass durch die Transporte keine Rückwirkungen auf die innerbetrieblichen Materialflüsse erfolgen. Dementsprechend wird beispielsweise bei der Planung und Simulation von Distributionssystemen davon ausgegangen, dass die Systemlast innerhalb eines Zeitrahmens bewerkstelligt wird, der oft durch feste Tountabellen der LKW-Abfahrzeiten bestimmt ist (Noche 2003). Obwohl also dieser Aspekt sehr wichtig ist, gibt es nur relativ selten Simulationsstudien, die sich mit dem Zusammenspiel von innerbetrieblicher Logistik und außerbetrieblichen Transporten befassen. Bei einer Betrachtung der verschiedenen VDI-Richtlinien, die einen Bezug zur Simulation aufweisen (VDI (2001a), VDI (2001b), VDI (2007), VDI (2011)), fällt auf, dass dieser Bereich weitestgehend unerwähnt bleibt. So befasst sich beispielsweise die Digitale Fabrik kaum mit diesem Thema, obwohl die Auswirkungen auf die Fabrik erheblich sein können. Bei der Auswahl von Modullieferanten können die resultierenden Transportkosten sogar der entscheidende Wettbewerbsfaktor sein. Allerdings kippen diese Kostenmodelle, wenn die Transporte durch Verkehrseinflüsse gestört werden. Eine Publikation (Goedicke und Deymann 2010) hat sich mit dem Yard-Management befasst und somit die Betrachtungsgrenzen der Simulation ansatzweise über die Grenzen der Fabrikhallen hinausgezogen. Die sich in der VDI-Richtlinie 3633 mit dem „was“ (Wenzel 2010), d. h. mit dem Gegenstand der Simulation, befassenden Blätter 6 (VDI 2001a), 7 (VDI 2001b) und 8 (VDI 2007) betreffen die Abbildung des Personals in Simulationsmodellen, die Kostensimulation, die maschinennahe Simulation und das Thema Geschäftsprozessmodellierung und Simulation. Die Verkehrssimulation zur Abbildung von Transportverkehren wird jedoch auch innerhalb dieser Anwendungsfelder nicht thematisiert. Bei der Formulierung einer Zukunftsvision des Einsatzes der Simulation in der Automobilindustrie (Mayer und Pöge 2013) wird diesem Aspekt ebenfalls keine weitere Bedeutung eingeräumt.

Eine internationale Literaturrecherche ergibt mehrere aktuelle Publikationen, die sich mit der Thematik aus verschiedenen Blickwinkeln befassen. In der Regel werden dabei Aspekte des Lieferkettenmanagements mit Transporten verbunden. Schroër et al. (2014)

berichten von der Entwicklung eines Simulationsmodells zur Bewertung der Transporte zwischen den Terminals in Rotterdam Maasvlakte unter der Nutzung ereignisdiskreter Simulation. Ergebnisse der Studie betreffen Auslastungen der Fahrzeuge und der Terminalausrüstung sowie Wartezeiten der Fahrer. Interessant ist insbesondere die Kopplung der LKW-Transporte mit Schiffstransporten zwischen den Terminals. Deshalb wird sowohl das Straßennetzwerk als auch das Netzwerk der Wasserwege abgebildet.

FR8NET ist ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Planung und dem Betrieb von intermodalen Transporten (Dube et al. 2014). Die Simulationskomponente des Systems dient zur Bewertung und zum Vergleich verschiedener Geschäftsszenarien.

Eine weitere Nutzung der Transportsimulation wird für den Hafen von Valparaiso in Chile vorgestellt (Valenzuela 2014). Mit Hilfe des Simulationsmodells wurden Szenarien im Hinblick auf die Anzahl der LKW, die Verteilung der Schiffe auf zwei Terminals, die Geschwindigkeit der LKW, die Anzahl der Tore und die Bedienzeiten an der Pforte in Terminal 1 untersucht. Ausgangspunkt der LKW-Bewegungen ist ein externes Parkplatzareal, das zur Vorbereitung der Einfahrt in den Hafen angefahren werden muss. In einer weiteren Studie aus den USA (Young 2013) wird die Simulationstechnik zur Beurteilung neuer Gesetze bei der Regulierung der Fahrerlenkzeiten eingesetzt.

Insgesamt muss aber festgestellt werden, dass die Nutzung der Simulationstechnik für die Beurteilung kombinierter innerbetrieblicher und außerbetrieblicher Materialflüsse nur relativ selten eingesetzt wird. Gerade die Automobilindustrie hat jedoch hier besondere Anforderungen, die weitergehende Analysen erfordern. Insbesondere durch immer weiter fortschreitende Kopplung von Prozessen über Standortgrenzen hinweg auf der einen und den drohenden Verkehrsinfarkt in Deutschland und Europa auf der anderen Seite gewinnt dieser Aspekt immer stärkere Bedeutung. Um die Konzepte für die Verkehrswegeplanung absichern zu können, kann die Methode der Simulation sehr nutzbringend eingesetzt werden. Sie schafft Transparenz über die resultierenden Verkehrsströme auf dem Werksgelände sowie an den Schnittstellen zum öffentlichen Verkehr. Auf diese Weise können unterschiedliche Konzepte bewertet werden. Bestandteil dieser Simulationen sind auch die Strategien („Verkehrsregeln“) für die Verkehre auf dem Werksgelände. Diese müssen z. T. in IT-Systeme implementiert werden, welche zur Disposition (z. B. Verwaltung von Wareneingangs-(WE) und Warenausgangs-(WA)Toren) und Steuerung (z. B. Abruf wartender LKW von Aufstellplätzen zu Be- und Entladeplätzen) zum Einsatz kommen. Die Simulation umfasst dazu die Topografie (Verkehrswege), den Verkehrsablauf, die vorgesehene Verkehrstechnik sowie die Verkehrsorganisation.

Im Folgenden werden Beispiele aufgelistet, die die Anwendung und den Einsatz von Simulation bei der Verkehrsplanung von Werksgeländen untermauern. Es geht um die Planung

- von Verkehren auf Werksgeländen (Anlieferung, Abholung),
- der Schnittstellen (Pforte oder Werkstor, Werkszufahrt) zum öffentlichen Verkehr,
- von Verkehrsflüssen und Verkehrswegen auf Werksgeländen,
- der Hoflogistik bzw. dem Yard Management (u. a. von Zufahrts- und Dispositionsregeln),

- von Verkehrsorganisation (im Sinne von Verkehrsregeln),
- der Verkehrstechnik und
- von begleitenden Prozessen der Verkehre (Ankunft am Werksgelände, Anmeldung, Erhalt der Zufahrtberechtigung, etc., auch um die Automatisierung dieser Prozesse).

Die Ziele der Simulationsstudien befassen sich beispielsweise mit folgenden Themenfeldern:

- Beeinflussung des öffentlichen Verkehrs durch Verkehre und Verkehrsstörungen auf nicht öffentlichem Gelände
- Ermittlung der Belastung von Verkehrswegen auf privatem (nicht öffentlichem) Gelände und Absicherung von Verkehrswegekonzepten
- Ermittlung der Belastung von Verkehrsknotenpunkten
- Ermittlung von Fahrtzeiten (Mittelwert, Schwankungsbreite)
- Dimensionierung von Verkehrsmitteln, Ermittlung der Auslastung von (internen) Transportmitteln
- Vergleich von Versorgungskonzepten auf Basis unterschiedlicher Verkehrs- oder Transportmittel
- Dimensionierung von Einrichtungen wie Parkplätzen (z. B. am bzw. vor dem Werkstor), Abfertigungsschalter, WE- und WA-Tore, etc.
- Entwicklung und Absicherung von Verkehrsregeln für Verkehre auf Werksgelände
- Absicherung der Ver- und Entsorgungsflüsse über die Verkehrswege
- Ermittlung der Ver- und Entsorgungssicherheit einzelner Abliefer- und Beladestellen
- Reduzierung von Stand- und Wartezeiten
- Ermittlung des Einflusses von Störgrößen auf den Verkehr

Der Umfang der Simulation der außerbetrieblichen Verkehre betrifft oft

- die Abbildung der Verkehrswege (inklusive Fahrtrichtung, Kapazität je Spur) und Kreuzungen,
- die Analyse der Verkehrsabläufe (Ankunft am Werksgelände, Anmeldung, Einfahrtberechtigung, etc.),
- die Untersuchung der Verkehrsorganisation (u. a. der Verkehrsregeln, inkl. Routing auf dem Werksgelände),
- die Bestimmung der Verkehrstechnik (u. a. Lichtsignalanlagen),
- die Modellierung der Schnittstellen (insbesondere der Be- und Entladestellen, Schnittstelle zu Produktion und Logistik) sowie
- die Datenaufbereitung.

Die Datenaufbereitung ist bei Verkehrssimulationen etwas anders als bei ‚klassischen‘ Simulationen von Produktion und Logistik. Denn neben der Beschreibung der Belastung der Schnittstellen auf dem Werksgelände müssen die Schnittstellen zum öffentlichen Verkehr beschrieben werden. Dazu erfolgen in der Regel Verkehrszählungen, die in einem aufwendigen Prozess für die Simulation aufbereitet werden müssen (u. a. durch eine Beurteilung und Qualifizierung der künftigen Verkehrssituation gemäß Richtlinien von

Genehmigungsbehörden und Straßenverkehrsämtern). Die werksinternen Schnittstellen können dagegen wie bei Fabrik- und Logistiksimulationen beschrieben werden (Extrapolation von Ist-Daten mit Geschäftserwartungen).

---

## 11.3 Anwendungsbeispiele

Durch intensive LKW-Verkehre auf den Werksgeländen entstehen lange Wartezeiten für die LKW-Fahrer. Dies treibt die Kosten der Transportketten in die Höhe und erhöht die Umlaufbestände der Lieferketten. Die Ursachen für den intensiven Transport liegen nicht nur in der Auslagerung von Leistungen begründet, die dazu führt, dass viele Module nicht mehr direkt auf dem Werksgelände produziert werden. Oft sind es unüberlegte Planungen, die zwar die Produktionskosten im Blick behalten, Stückzahlen steigern und Renditen berechnen, die aber nicht berücksichtigen, was passiert, wenn das Material gar nicht mehr an die Bänder gelangen kann oder wenn große Pufferbestände aufgebaut werden müssen, weil beispielsweise Baustellen die Verkehre behindern.

So ist etwa bei der Planung eines Distributionszentrums durch Auflagen der Kommune ein unidirektionaler zweispuriger Verkehr um ein Werksgelände festgelegt worden. Der Parkplatz für die LKW wurde so gelegt, dass die Fahrzeuge zunächst am Eingangstor vorbeifahren müssen, um dann auf einer Freifläche zu parken. Wenn die Fahrer später auf das Werksgelände einfahren dürfen, müssen sie praktisch das gesamte Werksgelände noch einmal umfahren, um dann über das Eingangstor einfahren zu können. Bei der Ausfahrt verlassen die Fahrzeuge das Werksgelände über ein zweites Tor. Allerdings werden die Fahrzeuge durch die unidirektionale Verkehrsführung dazu gezwungen, ein drittes Mal am Eingangstor vorbei zu fahren und können erst danach die Urbanisation verlassen. Schon bei überschlägigen Berechnungen ergibt sich in diesem Fall in Spitzenzeiten eine Verkehrsbelastung von ca. 2.000 LKW pro Stunde! Dies lässt sich auch durch eine gute Verkehrsführung nicht mehr bewältigen, zumal weitere öffentliche Verkehre die Straße belasten. Der begrenzende Faktor dieses Werkes ist fortan nicht mehr die Größe des Geländes, sondern die Verkehrsführung, die zu einem Kollaps des öffentlichen Verkehrs an den Schnittstellen zum Werk führt.

In den folgenden Unterkapiteln werden nun einzelne Beispiele erläutert, die einen Einblick in konkrete Fragestellungen geben. Eine systematische Zusammenstellung der Aufgabenstellungen ist damit nicht möglich und angestrebt; dazu bedarf es der Veröffentlichung von vielen weiteren Beispielen und Erfahrungen.

### 11.3.1 Fahrplangestaltung

Das erste Beispiel behandelt die Organisation der Transporte eines Fahrzeug-Moduls von einem Komponentenwerk zu verschiedenen Montagewerken. Die Module werden in speziellen Gestellen transportiert, so dass sich ein regelmäßiger Transport von Fertigware vom Komponentenhersteller zu den Montagewerken ergibt. Im Rücklauf werden jeweils Leergestelle zurückgeliefert.

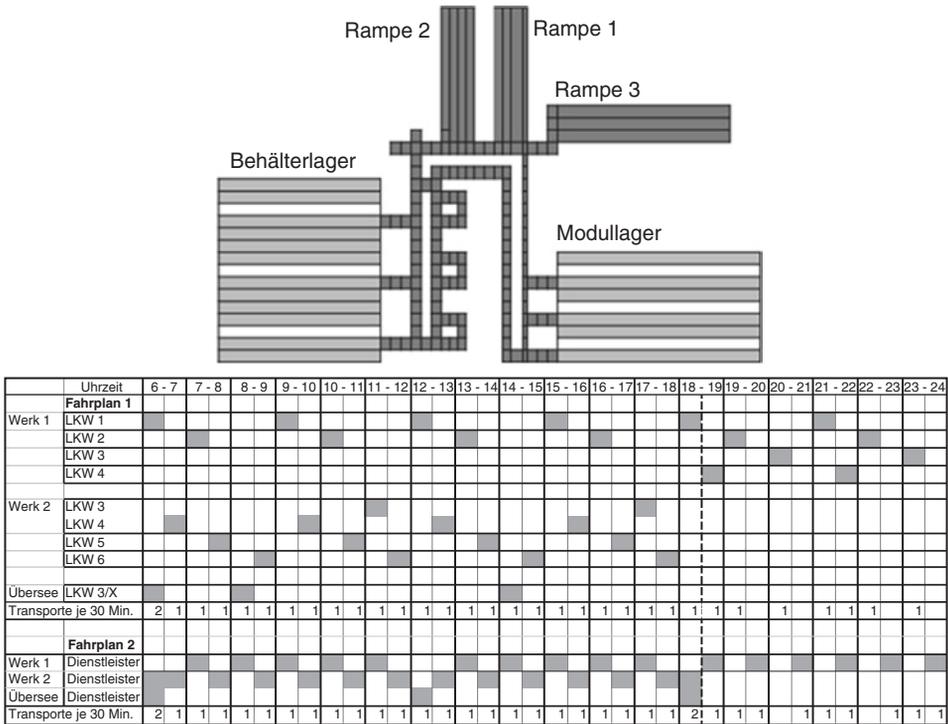


Abb. 11.2 Transportfrequenzen in Abhängigkeit vom Outsourcing-Konzept

Die Planung soll u. a. zur Beantwortung der Frage führen, ob die Transporte durch einen eigenen Fuhrpark oder durch einen Logistikdienstleister durchgeführt werden sollen.

Eigentlich scheint die Sache klar zu sein: Wenn volle LKW im Umlauf permanent gefahren werden können, muss sich ein eigener Fuhrpark lohnen. Um diese Aussage zu beurteilen, wurden mehrere Fahrpläne erstellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass innerhalb einer Stunde jeweils nur zwei Rampen durch das Lager und die begrenzte Fördertechnik beschickt werden können. Nur in Ausnahmefällen dürfen innerhalb einer Stunde drei Beladungen erfolgen (vgl. den oberen Teil in Abb. 11.2 mit der Darstellung der innerbetrieblichen Fördertechnik und den drei Rampen). Ab 18:30 Uhr darf nur noch ein Montagewerk angefahren werden, der Rücklauf der leeren Behälter kann in der Nacht aus Lärmschutzgründen nicht durchgeführt werden. In der Nacht sollen die Transporte insgesamt beschränkt werden.

Die Erzeugung der Fahrpläne obliegt dem Planer. Gültige Fahrpläne müssen die vorgegebenen Restriktionen einhalten, was die Komplexität für den Planer erhöht. Diese unterscheiden sich zudem noch für die beiden Alternativen des eigenen Fuhrparks bzw. des Auslagerungskonzeptes.

Der Aufbau der Fahrpläne bei eigenem Fuhrpark erfolgt auf Basis der Umlaufplanung je LKW. Dazu ist die Restriktion zu berücksichtigen, dass ein LKW eine Umlaufzeit von drei Stunden hat. Diese Restriktion kann sehr gut eingehalten werden, indem die Trans-

porte halbstündig über den Tag verteilt werden. In Summe werden sechs eigene LKW benötigt, um die Transportanforderungen zu erfüllen. Zusätzlich ist ein externer LKW für Überseeanlieferungen vorgesehen. Diese Alternative erfordert jedoch sieben Transporte in der Nacht. Dem Nachteil der Lärmbelästigung steht der Vorteil gegenüber, dass in den Montagewerken dadurch weniger Leergestelle gepuffert werden müssen.

Beim Auslagerungskonzept (Fahrplan 2 in Abb. 11.2) gibt es diese Restriktion der Umlaufzeit je LKW nicht. Diese Planung umfasst lediglich die Anlieferungszeiten je Transport. Hier muss lediglich bedacht werden, dass nicht zu viele LKW gleichzeitig bedient werden müssen. Beim Fahrplan 2 in Abb. 11.2 lässt sich erkennen, dass sich nur am Morgen und um 18:00 Uhr drei Verladungen innerhalb einer Stunde ergeben. Ab 18:30 Uhr erfolgen nur noch insgesamt 6 Verladungen.

In der durchgeführten Simulation kann bestätigt werden, dass beide Fahrpläne die gestellten Anforderungen erfüllen. Fahrplan 1 hat den Vorteil, dass er dem innerbetrieblichen Ablauf keine zusätzlichen Anforderungen stellt. Bei einer genauen Analyse der Varianten zeigt sich jedoch, dass die Fahrplanvariante 1 deutlich teurer ausfällt. Durch die Anzahl der zu beschaffenden Fahrzeuge, die teilweise nicht vollständig ausgelastet werden können, in Verbindung mit den Lenkzeitregelungen der Fahrer erweist sich aus der Sicht der Transportlogistik dieses Konzept als sehr unflexibel. Auch Störungen bei Stauungen oder durch den Ausfall eines Fahrzeugs können nur schlecht kompensiert werden.

Die Konsequenzen auf den innerbetrieblichen Materialfluss sind begrenzt. Auf der Seite des Modullieferanten müssen die Befüllung der Rampen mit den Modulen und die Rücknahme der Gestelle innerhalb eng bemessener Zeitfenster gelöst werden (ca. eine halbe Stunde pro Rampe). Dies ist durch eine zeitliche Entzerrung möglich. Die Rampen werden morgens, lange bevor die ersten LKW beladen werden, gefüllt. Eine weitere Lastspitze um 18:30 Uhr kann während des Tagesablaufs abgefangen werden. Ein besonderes Problem stellt die Rücknahme der Leergestelle dar. Hier kommen schlagartig pro LKW über 30 Gestelle an. Diese Spitze, speziell wenn sie sich mit mehreren Transporten überlagert, wirkt begrenzend für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems, da die Regalbediengeräte gleichzeitig Ein- und Auslagerungen vornehmen müssen und der Einlagerung der Leergestelle keine Priorität eingeräumt werden kann. Im ungünstigsten Fall können die LKWs ihre Leergestelle nicht entladen und die Entsorgung der Rampen verzögert sich ebenfalls. Eine weitere Herausforderung stellt sich beim OEM. Dort hängt die benötigte Größe der Pufferflächen von Fertigware und Leergestellen erheblich vom Transportkonzept ab.

Die Restriktionen bei der Gestaltung des Fahrplans der LKW und die Restriktionen des innerbetrieblichen Materialflusses können sich ungünstig überlagern, mit weitreichenden Konsequenzen für den Produktionsstandort des Automobilwerkes.

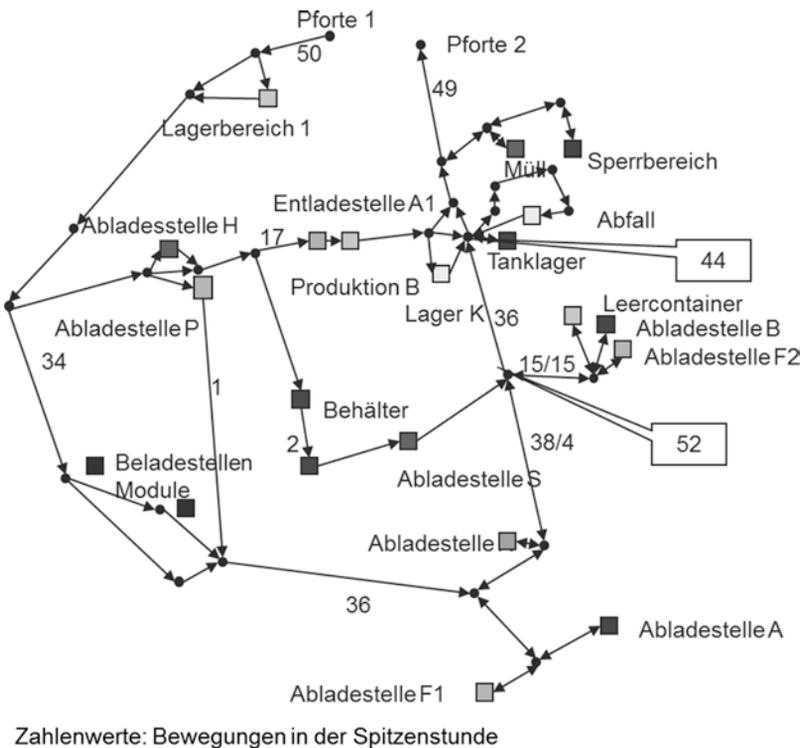
### 11.3.2 Werkverkehre

Im zweiten Beispiel handelt es sich um die Simulation von Werkverkehren. Die Anzahl der LKW auf dem Werksgelände muss beschränkt werden, da sich sonst die Fahrzeuge gegenseitig behindern würden. So lassen sich in Automobilwerken zum Teil sogar Rückwirkungen

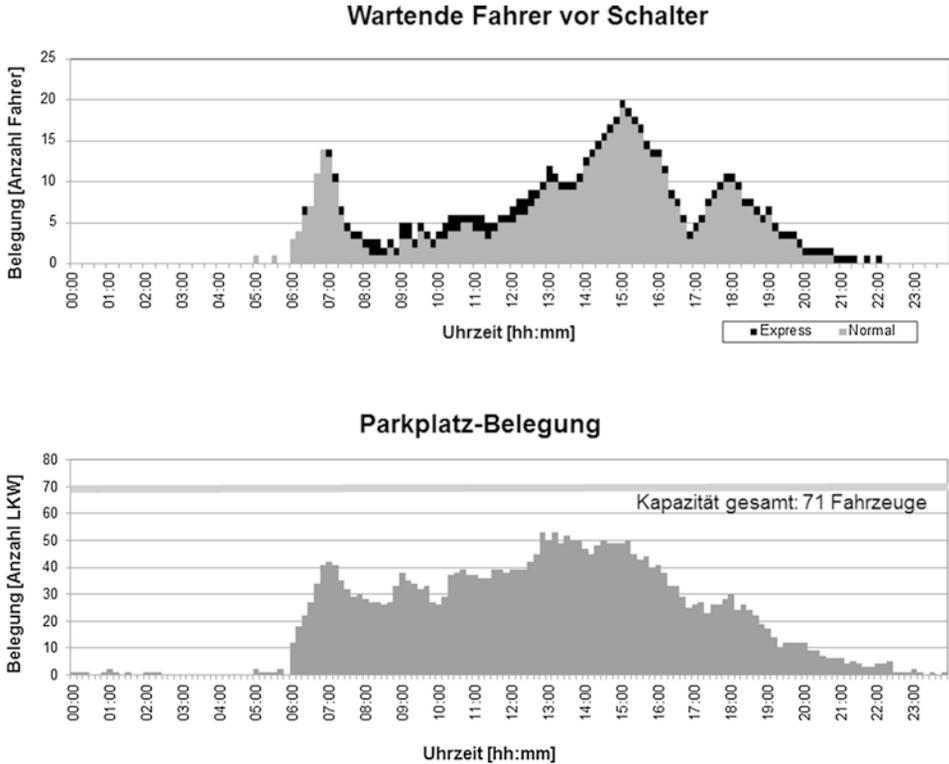
der LKW-Verkehre auf den innerbetrieblichen Schlepper-Hänger Verkehr beobachten. Die Verkehrssituation auf dem Werksgelände verschärft sich zudem auch durch die temporäre bis dauerhafte Nutzung von LKW-Parkplätzen als Lagerflächen für Gestelle und Leerbehälter. Es gibt Automobilwerke, in denen die Zufahrtstraßen zu den Hallen, die ursprünglich befahren werden konnten, als Lagerflächen von Halbzeugen genutzt werden. Dadurch werden die LKW gezwungen, längere Wege zu den Hallentoren zurückzulegen, was zu erhöhter Verweildauer auf dem Werksgelände führt.

Die Reglementierung des Einlasses der LKW auf das Werksgelände (u. a. bedingt durch wenige Parkplätze auf dem Werksgelände) führt jedoch zu anderen Effekten für die Transporteure. Durch Auslagerungsstrategien bei der Herstellung von Komponenten hat die Anzahl der LKW-Bewegungen erheblich zugenommen. Für die LKW-Fahrer ist die Situation unbefriedigend, da sie seitdem lange Wartezeiten in Kauf nehmen müssen und deshalb auch ihre täglich vorgesehenen Touren nicht mehr bewältigen können. Das Wegenetz auf dem Werksgelände kann durch die Sperrungen der Straßen zu komplizierten Verkehrsflüssen mit Gegenverkehr führen (vgl. Abb. 11.3).

Mit Hilfe der Simulationstechnik wurden die Werkverkehre genauer analysiert. Dabei konnte die Größe des Parkplatzes in der Nähe des Werkes genauer bestimmt werden. Des Weiteren wurde ermittelt, wie viele Fahrer sich an jeder Pforte befinden und auf



**Abb. 11.3** Beispiel des Streckennetzes eines Werkes zur Werkverkehrssimulation



**Abb. 11.4** Beispiele von Ergebnissen der Simulation der Transporte eines Werkverkehrs

Anweisungen warten. Hier zählt nicht nur die Wartezeit bis zur Einfahrt auf das Werks-  
gelände. Einen erheblichen Einfluss auf die Wartezeit der Fahrer hat auch der Ablauf  
beim Pfortner. Dort müssen entsprechende Dokumente geprüft werden, teilweise wer-  
den Inspektionen vorgenommen und durch Rückfragen bei der Spedition können sich  
weitere Verzögerungen ergeben.

Die Wartezeiten der Fahrer ergeben sich aber auch durch ihre eigene Disposition. Sie  
sind täglich in Touren eingebunden, die mehrere An- und Ablieferstandorte umfassen. Das  
führt dazu, dass Fahrer aus einer Region sehr früh morgens am selben Standort abgefertigt  
werden wollen, um anschließend in der Region weitere Beladungen durchführen zu könn-  
en. In anderen Fällen erreichen die Fahrzeuge die Region im Laufe des Tages und belie-  
fern zunächst andere Abladestellen. Dadurch gelangen sie erst am frühen Nachmittag zum  
Werk. Da dies häufig der Fall ist, ergeben sich hier die größten Spitzen. Die Simulation  
(vgl. Abb. 11.4) zeigt die Konsequenzen dieser persönlichen Dispositionsstrategien der  
Fahrer auf, die zu ungleich verteilten Ankünften und damit auch zu Abfertigungsspitzen  
führen. Aus diesen Beobachtungen lassen sich Strategien für die LKW-Disposition ablei-  
ten. Denn wenn es gelingt, die Anzahl der wartenden Fahrer zu reduzieren, lassen sich  
auch die Transportkosten senken.

### 11.3.3 Gestaltung von Werkszufahrten

In einem weiteren Beispiel wird die Gestaltung von Werkszufahrten beschrieben. Betrachtet wird wiederum ein Werksgelände mit einer hohen Anzahl an LKW-Ankünften. Diese finden sich beispielsweise in großen Industrieparks. Eine freie Zufahrt zum Werksgelände ist nicht erlaubt. Jeder Fahrer muss sich daher bei seiner Ankunft zunächst beim Werksschutz melden, um eine Einfahrterlaubnis zu bekommen. Die LKW kommen jedoch nicht gleichmäßig über den Tag verteilt, wie im Beispiel zuvor gibt es immer wieder Spitzenzeiten wie z. B. zu Beginn des Tages bzw. am Vormittag. In diesen Zeiten kommt es dann schnell zu langen Wartezeiten an den Schaltern sowie auf den Parkplätzen, auf denen die Fahrer ihre Fahrzeuge abgestellt haben.

Überlagert wird dies noch durch unterschiedliche Prozesse der Anmeldung. Insbesondere bei Gefahrgütern, Zollgütern, Waagen, usw. kommt es zu komplizierten Anmeldeprozessen mit langen Bearbeitungszeiten. Zeitverzögernd wirken sich hier auch unzureichende Qualifikationen des Sicherheitspersonals aus oder Sprachprobleme der LKW-Fahrer, die sich immer häufiger nicht oder kaum verständigen können.

Diese Aspekte muss die Gestaltung der Werkszufahrten berücksichtigen. Allerdings stehen für eine Werkzufahrt häufig auch nur eine begrenzte Fläche sowie ein schmales Budget zur Verfügung. Dies limitiert auch die Möglichkeiten zur Gestaltung von Parkplätzen, was wiederum zu einer immer häufigeren Automatisierung der Anmeldeprozesse an der Werkszufahrt führt. Die automatische Abwicklung, zumindest eines Teils der LKW, führt zu einer Verkürzung der Anmeldezeiten je LKW und damit zu einer spürbaren Reduzierung der benötigten Parkflächen. Allerdings wird die Bewertung der unterschiedlichen Planungsvarianten für alle Beteiligten immer schwieriger. Auch in diesen Fällen kommt daher die Simulation zum Einsatz.

Durch die Optimierung der Betriebsabläufe bei der LKW-Anmeldung können die Wartezeiten der Fahrer und die Auslastungen der Kontrolleure erheblich gesenkt werden (vgl. Abb. 11.5 mit einem Beispiel eines Ablaufprozesses des Anmeldevorganges von LKW-Fahrern). Auf der Basis von Simulationen werden sowohl unterschiedliche Layoutvarianten zur Gestaltung der Verkehrswege und Parkplätze der Werkszufahrten untersucht als auch verschiedene Gestaltungen der Prozesse. Fragen stellen sich hierbei nicht nur nach der Anzahl der benötigten Parkplätze, sondern auch nach der Anzahl von Terminals für die automatische Einfahrtkontrolle oder der Positionierung von Schaltergebäuden, Waagen, der eigentlichen Werkseinfahrt und der Verkehrsführung.

### 11.3.4 Anbindung an einen Industriepark

Im vierten Beispiel wird die Anbindung an einen Industriepark untersucht. Ein Logistikdienstleister hat seinen Umschlagpunkt in einer Entfernung von etwa 30 Minuten zum Automobilwerk errichtet. Da die Belieferung in einem Takt von ebenfalls 30 Minuten erfolgen muss, verkehren insgesamt drei LKW auf der Strecke, da auch durch die Be- und

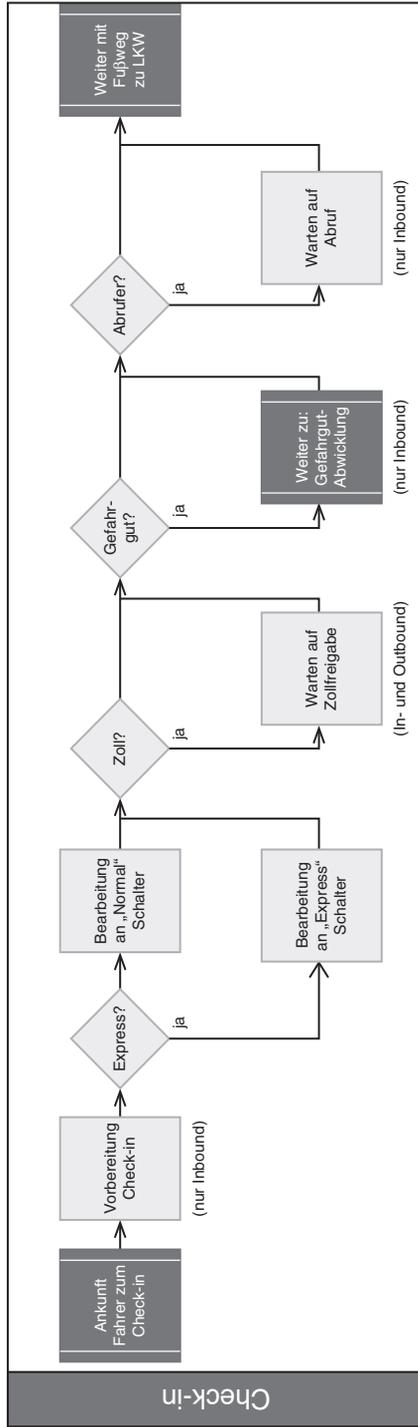
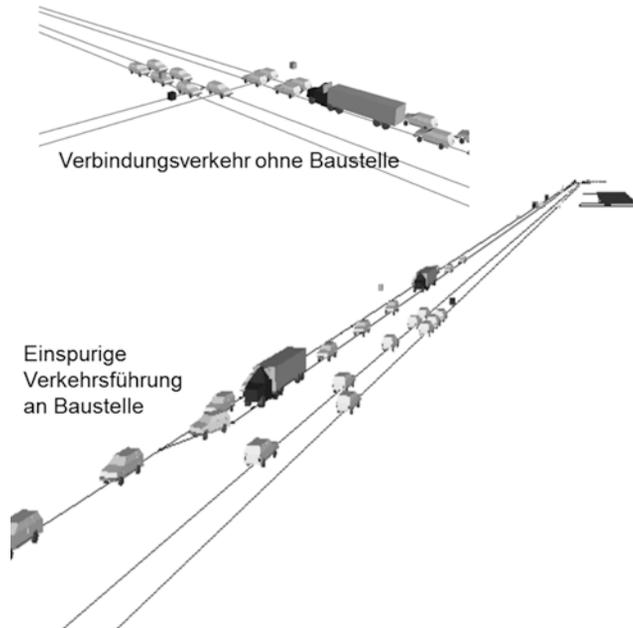


Abb. 11.5 Anmeldeprozess der LKW-Fahrer an der Werkseinfahrt



**Abb. 11.6** Simulation der Behinderung des Pendelverkehrs zwischen Industriepark und Automobilwerk durch eine Baustelle

Entladungen Zeit verloren geht. Besondere Probleme ergeben sich jedoch bei temporären Engpässen (vgl. Abb. 11.6). Dargestellt sind zwei Situationen. Im Normalfall fließt der Verkehr ungehindert und die LKW erreichen wie geplant ihr Ziel.

Durch die Einrichtung einer Baustelle auf der Strecke ändert sich die Situation grundlegend. Von der zweispurigen Strecke wird eine Spur für den Baustellenverkehr gesperrt, so dass sich am Zusammenführungspunkt Stauungen ergeben. Die Staulängen schwanken erheblich. Es ergeben sich Fahrzeiten, die bis zum Dreifachen der üblichen Zeit betragen. Um den Lieferservice gegenüber dem Kunden aufrecht zu erhalten, werden deshalb Maßnahmen eingeführt, die allerdings recht teuer sind. So werden in Spitzenzeiten zwei weitere LKW eingesetzt. Damit steigen die Umlaufbestände erheblich. Wenn kein Stau auftritt, stehen die Fahrzeuge auf dem Werksgelände und warten auf ihre Bedienung. Da sich auf dem Werksgelände kein Platz für Zwischenlagerungen befindet, müssen die LKW-Fahrer vor dem Werk warten. Mit Hilfe der Simulationstechnik konnten Entscheidungen unterstützt werden, die den Umlaufbestand an LKW festlegen. Durch realistische Annahmen in Bezug auf den öffentlichen Verkehr können die Schwankungsbreiten der Stauungen genauer prognostiziert werden.

## 11.4 Zusammenfassung und Fazit

Unter Güterverkehr wird in diesem Beitrag der Güterkraftverkehr auf öffentlichen Straßen und privatem Gelände (gemeint sind nicht öffentliche Verkehrswege, z. B. auf Werksgebäude) verstanden. Jeder Standort ist an das öffentliche Verkehrswegenetz angeschlossen,

meist über mehrere Schnittstellen. Die Dimensionierung dieser Verkehre sowie deren Steuerung (Routing) auf dem Werksgelände haben sich zu einem eigenen Planungsaspekt innerhalb der Fabrik- und Logistikplanung entwickelt. Insbesondere bei größeren Standorten bzw. bei der Erweiterung von bestehenden Standorten ist die Verkehrswegeplanung ein eigenständiger Planungsaspekt. Auch Standorte, die von mehreren Firmen genutzt werden (z. B. Industrie- oder Zuliefererparks), erfordern ein übergeordnetes Verkehrswegekzept. Die Verkehrswegeplanung berücksichtigt alle Anforderungen (qualitativ und quantitativ) an die Verkehre auf dem Werksgelände.

Zum einen hat die Gestaltung der Abfertigung der LKWs (bedingt durch ihre Schnittstellen) Auswirkungen auf den öffentlichen Verkehr und kann diesen in Spitzenzeiten stark beeinflussen. Dies kann zu ungewünschten behördlichen Auflagen für die Betriebsgenehmigung führen und gegebenenfalls sogar Auflagen für Investitionsmaßnahmen für den öffentlichen Verkehr zur Folge haben (z. B. Errichtung von Lichtsignalanlagen oder Umbauten von Verkehrswegen, wie beispielsweise den Bau von Kreisverkehren).

Zum anderen soll der Verkehr auch auf dem Werksgelände effizient und sicher erfolgen. Die Planung der Werks- und Lieferverkehre beeinflusst daher sowohl die Investition zur Erschließung bzw. zum Ausbau von Standorten als auch die Wirtschaftlichkeit der Abläufe innerhalb des Werkgeländes.

Anhand von vier Beispielen wurden in diesem Beitrag verschiedene Fragestellungen präsentiert, die mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulationstechnik beantwortet werden können. Die Schnittstellen der Werkverkehre liegen nicht nur in den Werken, sondern auch in der öffentlichen Verkehrsinfrastruktur. Daher müssen auch diese externen Faktoren berücksichtigt werden. Diese Simulationsanwendungen beantworten Fragestellungen die

- innerbetriebliche Abläufe und Materialflusstechniken betreffen (Beispiel 1),
- Werkstransporte mit den Schnittstellen zu den Produktionsbereichen umfassen (Beispiel 2),
- Dimensionierungen der Schnittstellen der Werke mit dem öffentlichen Verkehr behandeln (Beispiel 3) sowie
- Einflüsse des öffentlichen Verkehrs auf die Materialversorgung der Werke aufzeigen (Beispiel 4).

Die Beispiele zeigen auch, dass weitere Fragestellungen und Einflussfaktoren hinzukommen wie z. B. die Frage, ob sich ein Auslagerungskzept lohnt oder nicht oder inwieweit Verhandlungen mit Kommunen über die Verkehrsführung oder Einrichtung und Dauer von Baustellen wirtschaftliche und verkehrsbelastende Konsequenzen haben. Die Analyse der Verkehrsflüsse erhält auch deswegen eine immer größere Bedeutung, weil im Zuge der Nachhaltigkeitsdebatten die CO<sub>2</sub>-Belastung als eines der messbaren Kriterien immer wichtiger wird.

Aber auch die Bürger der Kommunen werden zunehmend sensibler gegenüber Verkehrsbelastungen. Viele Kommunen sind gezwungen, ein Konzept für den Schwerlastverkehr auszuarbeiten, um die Bürger vor Lärm und Staub zu schützen und eine bestimmte

Luftqualität zu gewährleisten. Dies kann z. B. in den Sommermonaten zu erheblichen Einschränkungen führen – gerade dort, wo Werke in der Nähe von Wohngebieten oder in der Nähe der Innenstädte liegen. Weitere Konsequenzen ergeben sich durch die Tatsache, dass Kommunen gesetzlich gezwungen sind, Klimaschutzkonzepte vorzulegen und entsprechende Maßnahmen vorschlagen müssen (Städtetag 2008 und Klimaschutzgesetz 2013). Das Klimaschutzgesetz gilt nicht nur für Gemeinden, sondern auch für andere öffentliche Stellen (wie z. B. Häfen). In diesem Zusammenhang werden viele Maßnahmen ergriffen und ausgebaut wie z. B. Verkehrsleitkonzepte, die, wenn bestimmte Zonen überlastet sind, LKW-Fahrern Parkzonen zuweisen. Die Fahrer sind gefordert, sich dort so lange aufzuhalten, bis ihnen weitere Anweisungen erteilt werden.

Der Verkehrsplanung kommt aber auch aus Effizienzgründen eine immer größere Bedeutung bei der Fabrik- und Logistikplanung zu. So sollen LKW-Standzeiten auf dem Werksgelände minimiert werden, um die Wirtschaftlichkeit der Transporte weiter zu steigern. Neben rein monetären Aspekten kommen auch hier gesetzliche Auflagen (z. B. weitgehende Einschränkung der Lenkzeiten der Fahrer) zum Tragen. Auf der anderen Seite müssen die Verkehrskonzepte auf Werksgeländen für unterschiedlich qualifizierte Teilnehmer ausgelegt werden.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass heute keine größere Investition, die Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen haben kann, direkt genehmigt wird. Es muss belegt werden, dass geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um verträgliche und von den Bürgern und Anrainern akzeptierte Lösungen zu erarbeiten. Dies betrifft in besonderem Maße Werke, die sich in unmittelbarer Stadtnähe befinden. Mit Hilfe der Simulationstechnik können auch kritische Bürger überzeugt werden, dass die vorgeschlagenen Investitionen ausreichen, um Stauungen, Lärm, Parkprobleme und sonstige Belastungen zu kontrollieren.

---

## Literatur

- Dube P, Gonçalves JPM, Mahatma S, Barahona F, Naphade M, Bedemann M (2014) Simulation based analytics for efficient planning and management in multimodal freight transportation industry. In: Tolk A, Diallo SY, Ryzhov IO, Yilmaz L, Buckley S, Miller JA (Hrsg) Proceedings of 2014 the winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 1943–1954
- Goedicke I, Deymann S (2010) Simulation von Strategien der Hoflogistik in Sortierzentren. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 253–260
- Henn G (1995) Form follows Flow – Die Fabrik der Zukunft als Innovationszentrum. In: Warnecke HJ (Hrsg) Fabrikstrukturen im Zeitalter des Wandels – welcher Weg führt zum Erfolg? Springer, Berlin/Heidelberg
- Klimaschutzgesetz Nordrhein-Westfalen (2013) Fassung vom 29. Januar. [https://recht.nrw.de/lmi/owa/br\\_text\\_anzeigen?v\\_id=10000000000000000574](https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_text_anzeigen?v_id=10000000000000000574)
- Mayer G, Pöge C (2013) Quo vadis Ablaufsimulation – Eine Zukunftsvision aus Sicht der Automobilindustrie. In: Dangelmaier W, Laroque CH, Klaas A (Hrsg) Simulation in Produktion und Logistik 2013. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, S 11–20

- Noche B (2003) Auswirkungen des Betriebs von Distributionszentren auf den Verkehr. In: Innovative Forschung und Lehre im Dienste einer nachhaltigen und integrierten Verkehrspolitik. Fachmesse „transport logistic“, 20–24. Mai, München. Sonderausgabe der Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e.V., Berlin, S 165–177
- Schroër JL, Corman F, Duinkerken MB, Negenborn RR, Lodewijks G (2014) Evaluation of inter terminal transport configurations at Rotterdam Maasvlakte using discrete event simulation. In: Tolk A, Diallo SY, Ryzhov IO, Yilmaz L, Buckley S, Miller JA (Hrsg) Proceedings of the 2014 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 1771–1782
- Städtetag Nordrhein-Westfalen (2008) Positionspapier „Klimaschutz in den Städten“. In: Eildienst, Informationen für Rat und Verwaltung, Heft 9 vom 12.09.2008, Köln
- Valenzuela S (2014) Vehicular traffic in the access into Port Of Valparaiso. In: Tolk A, Diallo SY, Ryzhov IO, Yilmaz L, Buckley S, Miller JA (Hrsg) Proceedings of the 2014 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 4189–4190
- VDI (2001a) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 6: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Abbildung des Personals in Simulationsmodellen. Beuth, Berlin
- VDI (2001b) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 7: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Kostensimulation. Beuth, Berlin
- VDI (2007) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 8: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Maschinennahe Simulation. Beuth, Berlin
- VDI (2011) VDI-Richtlinie 4499 Blatt 2: Digitale Fabrik – Digitaler Fabrikbetrieb. Beuth, Berlin
- Wenzel S (2010) VDI-Richtlinien zur Modellbildung und Simulation. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 543–550
- Young J (2013) Simulation-based truck fleet analysis to study the impact of federal motor carrier safety administration’s 2013 hours of service regulation changes. In: Pasupathy R, Kim S-H, Tolk A, Hill R, Kuhl ME (Hrsg) Proceedings of the 2013 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 3395–3405



**Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche** Nach dem Studium der Technischen Kybernetik an der Universität Stuttgart wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Förder- und Lagerwesen der Universität Dortmund von 1982–1983 und am Fraunhofer-Institut für Transporttechnik und Warendistribution, dem heutigen Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund, von 1983–1987. Im Jahr 1989 Promotion an der Universität Dortmund. Seit 1987 Geschäftsführer der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH in Dortmund und seit 2000 Professor an der Universität Duisburg-Essen und Inhaber des Lehrstuhls Transportsysteme und -logistik. Ab 2014 Vorstandsvorsitzender des Zentrums für Logistik und Verkehr als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Duisburg-Essen.



**Mathias Bös** Seit dem Abschluss des Studiums des Maschinenbaus an der TU Dortmund im Jahr 1997 zunächst Projektingenieur bei der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH; später Leiter für Simulationsprojekte in den Bereichen Logistik, Produktion und Flughafen. Seit 2001 Geschäftsführer der SDZ GmbH. Fachausschussmitglied im Verein Deutscher Ingenieure für Digitale Fabrik und Logistiksysteme und -management. Mitglied in der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) und im Innovationsbeirat des LOG-IT-Club.



Bernd Noche, Carsten Stange und Mathias Bös

Die Simulation von Behälterumläufen ist eigentlich nicht vergleichbar mit der klassischen Materialflusssimulation. Sie hat Merkmale, die sie eher als Geschäftsprozesssimulation klassifiziert. Allerdings hat sie eben auch Bezug zu Produktionsprozessen und der Simulation von Lieferketten. Im Beitrag wird ein Entscheidungsunterstützungssystem vorgestellt, das mit Hilfe der Simulationstechnik Aussagen zu Behälterbeständen liefert. Ausgangspunkt ist die Nachbildung der Prozessabläufe eines Behälterumlaufes, der zwischen verschiedenen Produktionswerken etabliert ist. Mit Hilfe eines Lastgenerators wird für die Simulation der Teileverbrauch auf der Basis einer Programmplanung generiert. Die Beschreibung der zu analysierenden Szenarien erfolgt über diese Datengenerierung, die durch ergänzende Steuerungsinformationen vervollständigt wird. Stochastische Einflüsse kommen durch den schwankenden Verbrauch in den Produktionswerken und durch Unsicherheiten der Transportketten in die Modelle. Im Beitrag wird die Vorgehensweise zur Nutzung des Instrumentariums aufgezeigt und es werden einzelne Statistiken, die für die Analyse von Behälterumläufen besonders interessant sind, vorgestellt. Abgeschlossen wird der Beitrag mit einer beispielhaften Vorgehensweise zur Ermittlung realistischer Behälterbestände.

---

B. Noche (✉)  
Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Deutschland  
E-Mail: [bernd.noeche@uni-due.de](mailto:bernd.noeche@uni-due.de)

C. Stange · M. Bös  
SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH, Dortmund, Deutschland

## 12.1 Einleitung

Der Wettbewerbsdruck zwingt die Unternehmen, ihre Abläufe ständig zu hinterfragen und Rationalisierungspotenziale zu identifizieren. Zwar hat die Anlagennutzung und -optimierung sehr häufig Priorität, da dort oft hohe Investitionen getätigt werden, aber auch Nebenprozesse treten mehr und mehr ins Blickfeld. Eines dieser in vielen Produktionssystemen eher untergeordneten Themen ist das Behältermanagement. Jeder Automobilhersteller hat mittlerweile seine eigenen, standardisierten Behälter. Diese sind sowohl auf die Produktions- und Montageprozesse als auch auf die Transportprozesse ausgerichtet. Die Lieferanten werden verpflichtet, ihre Teile in diesen Behältern zu liefern. Behälter, Gestelle, Ladungsträger in der Automobilindustrie, aber nicht nur da, zirkulieren daher zwischen den Zulieferern und den Produktionsstandorten. Im Folgenden wird der Begriff Behälter als übergeordneter Begriff sowohl für Behälter als auch Gestelle, Vorrichtungen, Ladungsträger, Schränke, Hülsen, Kartonagen, Paletten usw. verwendet.

Automobilhersteller beschaffen große Mengen dieser Behälter, die in der Regel durch Behältermieten finanziert werden, die Lieferanten für die Nutzung dieser Behälter bezahlen müssen. Aus diesem Grund haben alle Beteiligten ein Interesse daran, möglichst geringe Behälteranzahlen vorzuhalten. Auf der anderen Seite besteht bei allen Beteiligten die Sorge, dass es zu Produktionsstillständen kommt. Bedingt durch dynamische, unvorhersehbare Effekte kann es zu höheren Teilebedarfen kommen, als von den Automobilherstellern prognostiziert. Die Automobilhersteller sichern sich gegen Lieferengpässe durch flexible Abrufvereinbarungen und Pönalen bei Produktionsstillständen gegenüber den Lieferanten ab. Die Lieferanten erhöhen deswegen vereinbarte Teilebestände, wofür sie zusätzliche Behälter benötigen. Darüber hinaus bevorraten sie häufig auch mehr Leerbehälter als aktuell benötigt, um für alle Eventualitäten gewappnet zu sein. Je nach Sicherheitsbedürfnis der einzelnen Lieferanten werden so mehr Behälter disponiert als eigentlich nötig. Dies führt, bedingt durch die Überlagerung der Behälterbedarfe aller Lieferanten, zu Engpässen bei den Behältern, so dass durch das höhere Sicherheitsbedürfnis aller Beteiligten am Ende die Produktionsversorgung doch gefährdet wird. Aus diesem Grund stellt sich für die Automobilhersteller die Frage, wie viele Behälter eine Liefer- und Versorgungskette faktisch benötigt, um alle Sicherheitsbedürfnisse abzudecken.

Viele Diskussionen beziehen sich zudem auf den sogenannten Schwund. Das bedeutet, Behälter verschwinden einfach aus dem Kreislauf und werden nicht mehr oder erst nach längerer Zeit wieder aufgefunden. Über die Gründe lässt sich nur spekulieren, vermutet wird aber, dass häufig eine gewisse Nachlässigkeit im Umgang mit den Behältern dazu führt, dass sie nicht sorgfältig gelagert und verwaltet werden. Bei Paletten können sich Unregelmäßigkeiten durch Diebstahl ergeben. Kleinere Behälter finden sich gelegentlich in Haushalten von Mitarbeitern. Es soll auch schon Fälle gegeben haben, in denen Unternehmen ihre Kunststoffbehälter mit Löchern versehen haben, damit sie nicht zum Auffangen von Flüssigkeiten verwendet werden können. Neben dem Verschleiß der Behälter

führen diese Umstände dazu, dass jährlich viel Geld für neue Behälter ausgegeben werden muss. Ein weiterer Grund für die hohen Ausgaben ist der steigende Wert der Behälter. So werden mehr und mehr Behälter mit Deckel eingesetzt und selbst einfache Behälter sind aus hochwertigem Material gefertigt und sollen die Teile, die sie enthalten, schützen. Bei Vorrichtungen und Gestellen ist die Kostensituation oft noch viel kritischer, wenn beispielsweise ein Stück schon mehrere Tausend Euro kostet.

Das Management der Behälter ist daher eine eigenständige Aufgabe; niemand möchte eine Produktion unterbrechen, nur weil keine Behälter vorhanden sind. Andererseits müssen zum Aufbau eines Behältermanagements einige Voraussetzungen geschaffen werden. Behälter müssen gegebenenfalls identifiziert und eventuell nach Güteklassen eingeteilt werden. Es müssen Abrechnungssysteme geschaffen werden, damit der Wert der Behälter über eine Gutschrift verrechnet werden kann. Teilweise müssen die Kreisläufe der Behälter überwacht werden, beispielsweise wenn Behälterbestände sowohl gewerblich als auch beim Endverbraucher Verwendung finden, um Unsauberkeiten bei der Abrechnung der Mehrwertsteuer zu vermeiden.

Der Bedarf an Behältern orientiert sich an Prognosen, die aus Produktionsprogrammen abgeleitet werden können. Dabei wird auf Stammdaten zugegriffen, in denen hinterlegt ist, wie viele Teile ein Behälter aufnehmen kann. Gewisse Abweichungen ergeben sich bei Änderungen, wenn beispielsweise Verpackungsvorschriften neu formuliert werden oder wenn die maximale Anzahl der Teile pro Behälter nur durch geschickte Nutzung der Teileformen erreicht werden kann, was unter Umständen nicht immer allen Mitarbeitern gelingt. Durch die Variation der Losgrößen kann es vorkommen, dass Behälter nur teilweise gefüllt sind. Dies kann sich zu nicht unerheblichen Fehlbeständen bei der Teileverwaltung auswirken, da beim Wareneingang dadurch leicht Fehlbuchungen entstehen können.

---

## 12.2 Stand der Technik

Im Rahmen der Simulation des Behältermanagements kommen verschiedene Aspekte zusammen, die diese Simulationsmodelle besonders charakterisieren. Im Hinblick auf die Abbildungsgenauigkeit werden, verglichen mit der Materialflusssimulation, eher aggregierte Daten von zusammengefassten Prozessen benötigt. Obwohl eine ereignisdiskrete Modellierung erfolgt, hat der Prozessablauf Merkmale von eher kontinuierlichen Systemen, wie man sie beispielsweise beim System-Dynamics-Ansatz findet.

Der Bezug zur Geschäftsprozesssimulation ergibt sich zunächst aus der Vorgehensweise zur Strukturierung der Modelle. Der Begriff Geschäftsprozessmodellierung ist allerdings nicht allgemein anerkannt definiert. So verwendet Binner (2011) den Begriff Betriebsprozesse, um eine Abgrenzung gegenüber reinen Geschäftsprozessen, beispielsweise in Verwaltungen, zu erreichen. Frühe Arbeiten der Modellierung von Geschäftsprozessen finden sich in Verbindung mit der Verwendung der ereignisdiskreten Simulationstechnik (Hlupic und Robinson 1998)

und gehen auf Arbeiten zurück (Love und Barton 1996), die ein ganzheitliches Modell der Geschäftsabläufe eines Produktionsunternehmens adressieren. Die Geschäftsprozesssimulation wird auch Gegenstand der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 10 (Mutzke et al. 2010) sein, unter Berücksichtigung der Vorgehensweisen in Blatt 1 (VDI 2014).

Weitere Analogien in der Anwendung ergeben sich bei der Simulation von Kanban-Systemen (Barbey 2010 sowie Onyeochoa und Khoury 2013), die in einem erweiterten Sinne ebenfalls zur Planung von Behälterumläufen eingesetzt werden und dabei auch die entsprechenden push- und pull-Strategien abbilden.

Unter dem Begriff WIP (Work In Progress) werden ebenfalls vergleichbare Simulationsstudien durchgeführt (Zhou und Rose 2010 sowie Pramanik 2006), wenngleich sich diese Studien nur indirekt und in Sonderfällen auf die Behälterumläufe beziehen.

Ein Entscheidungsunterstützungssystem, das sich explizit auf die Planung von Behälterumläufen bezieht, konnte innerhalb der durchgeführten Literaturrecherche nicht identifiziert werden. In den folgenden Kapiteln wird nun ein Entscheidungsunterstützungssystem für die Planung von Behälterumläufen vorgestellt. Dazu ist es notwendig, auf der Ebene der Systemanalyse die relevanten Prozesse zu identifizieren und Daten zu erfassen.

---

## 12.3 Ablauf einer Behälterumlaufplanung

Die Planung der Behälterbestände erfolgt in mehreren Schritten (vgl. Abb. 12.1). Das Ablaufmodell besteht aus drei wesentlichen Akteuren: Dem Lieferanten, dem Transporteur und dem Automobilhersteller (OEM). Der Beginn der Betrachtung erfolgt beim Lieferanten. Bei dem Lieferanten und dem OEM werden die Prozesse detaillierter aufgeschlüsselt als beim Transporteur.

Beim Lieferanten erfolgt die Anlieferung einer Sendung von Leerbehältern z. B. via LKW. Die Leerbehälter werden in einem Leerbehälterpuffer zwischengelagert. Die Produktion des Lieferanten erfolgt gemäß Programmplan, dazu werden die entsprechenden Leerbehälter aus dem Puffer entnommen. Nach der Produktion werden volle Behälter in einem weiteren Puffer für Fertigware gesammelt, bis definierte Transportmengen (Transportlosgrößen) bereit stehen oder diese aufgrund von Abrufen benötigt werden.

Anschließend erfolgt ein Transport, üblicherweise per LKW. Aber auch Verladungen direkt über die Bahn oder intermodale Transporte sind möglich. Die Befüllung von Containern ist ebenfalls denkbar – für den Seeverkehr, aber auch für Bahn- und LKW-Transporte. Nach der Ankunft beim OEM werden die Behälter in ein entsprechendes Vollgutlager (z. B. ein Konsignationslager) gebracht. Von dort aus werden die vollen Behälter einzelnen Produktionsorten zugewiesen (disponiert und im innerbetrieblichen Materialfluss transportiert). In der Produktion verbleiben die Behälter entsprechend der Pufferstrategien und ihrer Reichweite gemäß Produktionsprogramm. Sobald sie leer sind, werden sie in einem Leerbehälter-Puffer zwischengelagert. Dabei erfolgt eine Qualitätskontrolle für eine eventuelle Reparatur oder eine Reinigung.

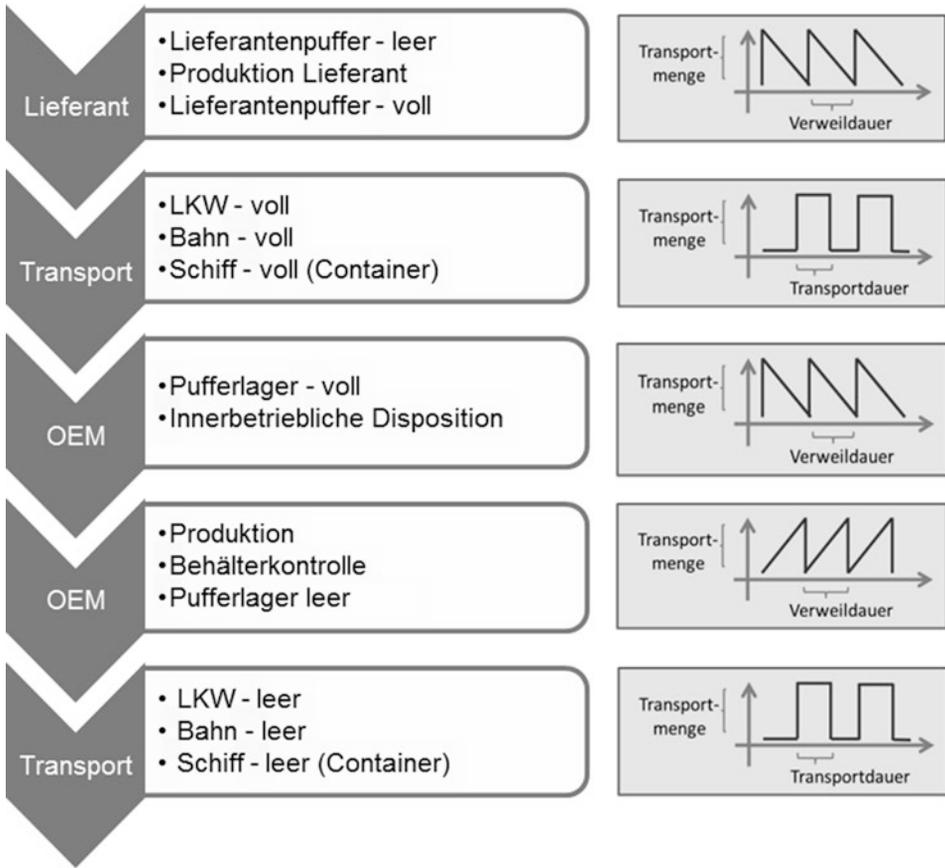


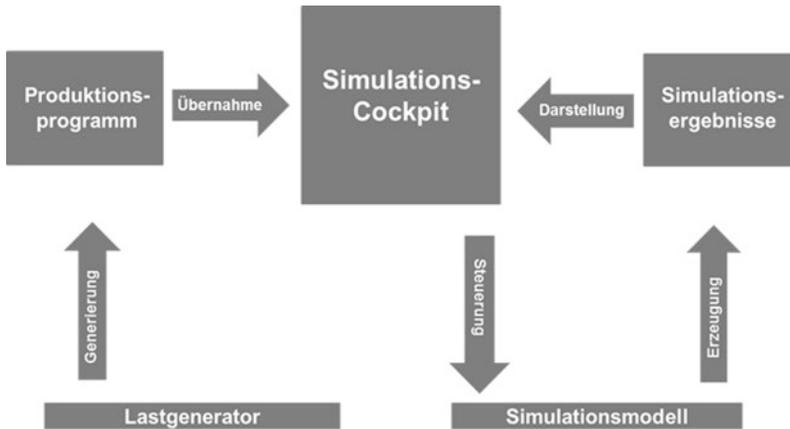
Abb. 12.1 Prozessablauf des Behältermanagements (eigene Darstellung)

Sobald eine entsprechende Transportmenge an leeren Behältern bereit steht, erfolgt der Transport des Leerguts zu den Lieferanten und der Umlaufzyklus beginnt von neuem.

### 12.4 Aufbau eines Planungsinstrumentes für das Behältermanagement

Ein erster Schritt des Behältermanagements ist es, eine Übersicht über den benötigten Bedarf zu gewinnen. Deshalb wurde in Verbindung mit Anwendungsbereichen aus der Automobilindustrie eine Simulationsumgebung zur Untersuchung und Bestimmung der Behälteranzahlen entwickelt.

Das Entscheidungsunterstützungssystem setzt sich aus drei zentralen Komponenten zusammen (vgl. Abb. 12.2):



**Abb. 12.2** Zentrale Komponenten des Entscheidungsunterstützungssystems

- **Lastgenerator**  
Der Lastgenerator dient zur Generierung unterschiedlicher Produktionsprogramme. Diese Programme können nachfolgend im Simulationsmodell zur Definition der jeweiligen Systemlast benutzt werden.
- **Simulationscockpit**  
Das Simulationscockpit dient als Schnittstelle zum Anwender. Dieser kann hier die Simulationsparameter angeben, das Simulationsmodell starten und beenden und sich die Simulationsergebnisse anzeigen lassen.
- **Simulationsmodell**  
Das Simulationsmodell bildet die eigentliche Anwendungsfunktionalität, d. h. den Behälterumlauf, ab. Hier werden die eigentlichen Simulationsergebnisse generiert.

Nachfolgend werden die Funktionalitäten und das Zusammenwirken dieser Komponenten detaillierter beschrieben.

### 12.4.1 Der Lastgenerator

Ausgangspunkt für den Aufbau des Lastgenerators ist die Überlegung, dass das zu fertigende Produktionsprogramm des OEM Teile benötigt und diese Teile wiederum in Behältern beispielsweise an die Montagebänder geliefert werden.

Üblicherweise sind bei den Stammdaten der Teile die zu verwendenden Behältertypen und die Anzahl der Teile, die pro Behälter transportiert werden, vermerkt.

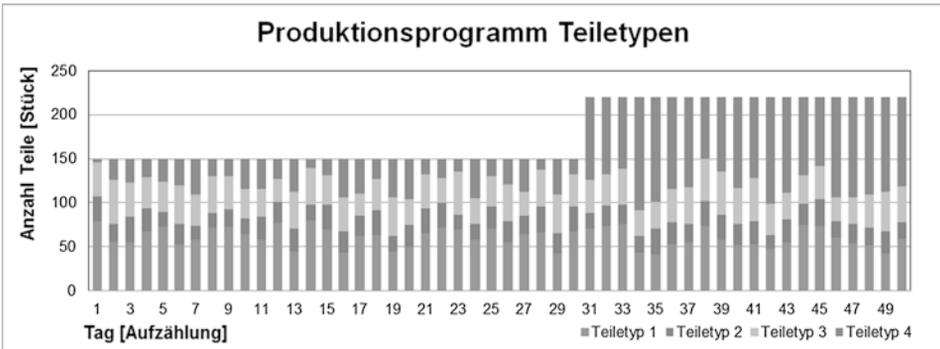
Aus der Kenntnis der zu fertigenden Produktionsprogramme kann durch die Stammdaten schließlich auf die Anzahl der Behälter pro Teil zurückgeschlossen werden, die sich notwendigerweise im Umlauf befinden. Der Datensatz besteht aus einer Liste von Attributen pro Teilenummer (vgl. Abb. 12.3). Hier wird jedem Teil ein Behältertyp zugeordnet

Nummer	Fertigungsebene	Stück pro Fahrzeug	Behältername	Länge	Breite	Höhe	Behälterinhalt	Gruppe	Behälterkategorie	Planungsrelevant	Behälterbewegungen pro Tag (Mittelwert)	Behälterbewegungen pro Stunde (Mittelwert)	Reichweite Behälter bei Min. Produktion-Takt [Min]	Kategorie Behälterreichweite	Zusammengefasste Bereiche	Prozesstyp	Einzelbereiche
14	1	16	Light-KLT auf Euro-Pool-Flachpalette	300	200	130	200	FI	KT	1	52,00	3,25	18,75	≤30	FI	indirekt	FINISH
22	3	1		2400	1370	1410	13	TUER	ST	1	50,00	3,13	19,50	≤30	TÜ	direkt	Tür
24	3	1	ZB Re. Tür vorn	2400	1370	1410	13	TUER	ST	1	50,00	3,13	19,50	≤30	TÜ	direkt	Tür
26	3	1	ZB Li. Tür hinten	2400	1370	1410	13	TUER	ST	1	50,00	3,13	19,50	≤30	TÜ	direkt	Tür
28	3	1	ZB Re. Tür vorn	2400	1370	1410	13	TUER	ST	1	50,00	3,13	19,50	≤30	TÜ	direkt	Tür
34	2	1	ZB Heckklappe	2400	1700	1760	13	HK	ST	1	50,00	3,13	19,50	≤30	FK	direkt	Klappe
42	5	1	Li. Seitenrahmen	4000	1200	1510	9	SRA	ST	1	72,22	4,51	13,50	≤30	KG	direkt	KG-SR
88	5	1	Re. Seitenrahmen	4000	1200	1510	9	SRA	ST	1	72,22	4,51	13,50	≤30	KG	direkt	KG-SR
207	8	1	Längsträger	2000	800	1000	15	LT	ST	1	43,33	2,71	22,50	≤30	BG	indirekt	BG-1

**Abb. 12.3** Auszug aus einer Stammdatenliste für die Zuordnung von Teilen zu Behältern

und die Anzahl der Teile festlegt, die ein Behälter aufnehmen kann. Obwohl diese Daten für alle Teile vorliegen (müssten), hat es sich allerdings in der Praxis als sinnvoll erwiesen, mit Behältergruppen zu planen. Dazu werden die am meisten genutzten Behältertypen als Repräsentanten aller Behältertypen verwendet und selten genutzte Behältertypen durch diese substituiert. Deshalb, und weil oft die entsprechenden Daten nicht vollständig und konsistent vorliegen, verfügt der Lastgenerator über weitere, manuelle Eingabemöglichkeiten, um die notwendige Datenqualität sicherzustellen. Auch der Teileverbrauch passt nicht exakt zu den Produktionsprogrammen, weil im operativen Realbetrieb beispielsweise Teile verloren gehen oder qualitätsbedingt (Ausschuss) nicht genutzt werden können; deshalb müssen Streuungen im Teileverbrauch berücksichtigt werden. Diese Streuungen ergeben sich auch dadurch, dass die Programmplanung operativ nicht immer so wie geplant realisiert werden kann, weil beispielsweise Fahrzeuge durch Lackprobleme gesperrt sind oder weil Produktionsrestriktionen beachtet werden müssen, die auf einer Grobplanungsebene nicht bekannt sind.

Eine Besonderheit ergibt sich durch die Anwendung der Simulationstechnik. Da beim Ablauf der Simulationsmodelle üblicherweise mit einem „leeren“ Produktionssystem gestartet wird, muss ein Vorlauf eingeplant werden, der später bei der Auswertung der Ergebnisse nicht berücksichtigt wird. Damit wird sichergestellt, dass die Ergebnisse nicht dadurch verfälscht



**Abb. 12.4** Prognostizierter Teileverbrauch als Ergebnis des Lastgenerators

werden, dass zu Beginn der Simulation alle Behälter voll sind. Ansonsten müssten Vorkehrungen getroffen werden, die einen zufälligen Anfangsbestand erzeugen. Um eine sinnvolle Initialisierung zu erreichen, muss beispielsweise bei der Programmplanung ein erster Produktionsauftrag angesetzt werden, der sich nicht unbedingt in der Realität wiederfindet.

Das Ergebnis der Eingaben und Berechnungen des Lastgenerators wird über der Zeit ermittelt und grafisch dargestellt (vgl. Abb. 12.4). Der Verbrauch der einzelnen Teiletypen schwankt je nach Tag und Auftragslage. Der Tagesverbrauch liegt für die Tage 1 bis 30 bei jeweils 150 Teilen, ab Tag 31 bei ca. 220 Teilen pro Tag. Der Anstieg des Teileverbrauchs ab Tag 31 könnte z. B. auf eine Zusatzschicht hindeuten, die aufgrund einer gestiegenen Nachfrage erforderlich wird. Die Verbrauchszahlen werden innerhalb des Lastgenerators auf eine Stundenleistung umgerechnet, da das Simulationsmodell stundengenau arbeitet.

### 12.4.2 Das Simulationscockpit

Das im Überblick erwähnte Simulationscockpit (kurz: Cockpit) (vgl. Abb. 12.5) ist das zentrale Bedien- und Steuerungselement der Behältersimulation. Es verfügt über angepasste Benutzerdialoge (Bedienmasken), die einem auch mit der Simulation nicht vertrauten Anwender die Nutzung der Simulation ermöglichen. Dazu bietet das Cockpit folgende (beispielhafte) Funktionen:

- Eingabe der Simulationsparameter
- Steuerung der Simulation
- Anzeige der aufbereiteten Simulationsergebnisse
- Statische Berechnung der Gesamtanzahl der Behälter

Im Hinblick auf die Prozessabläufe interessieren die Verweildauern der Behälter in den jeweiligen Puffern (Vollgut, Leergut) und die Dauer der Transporte sowie die Bestände im Umlauf (Disposition, Produktion, Reparatur). Die Parameter der Simulation umfassen

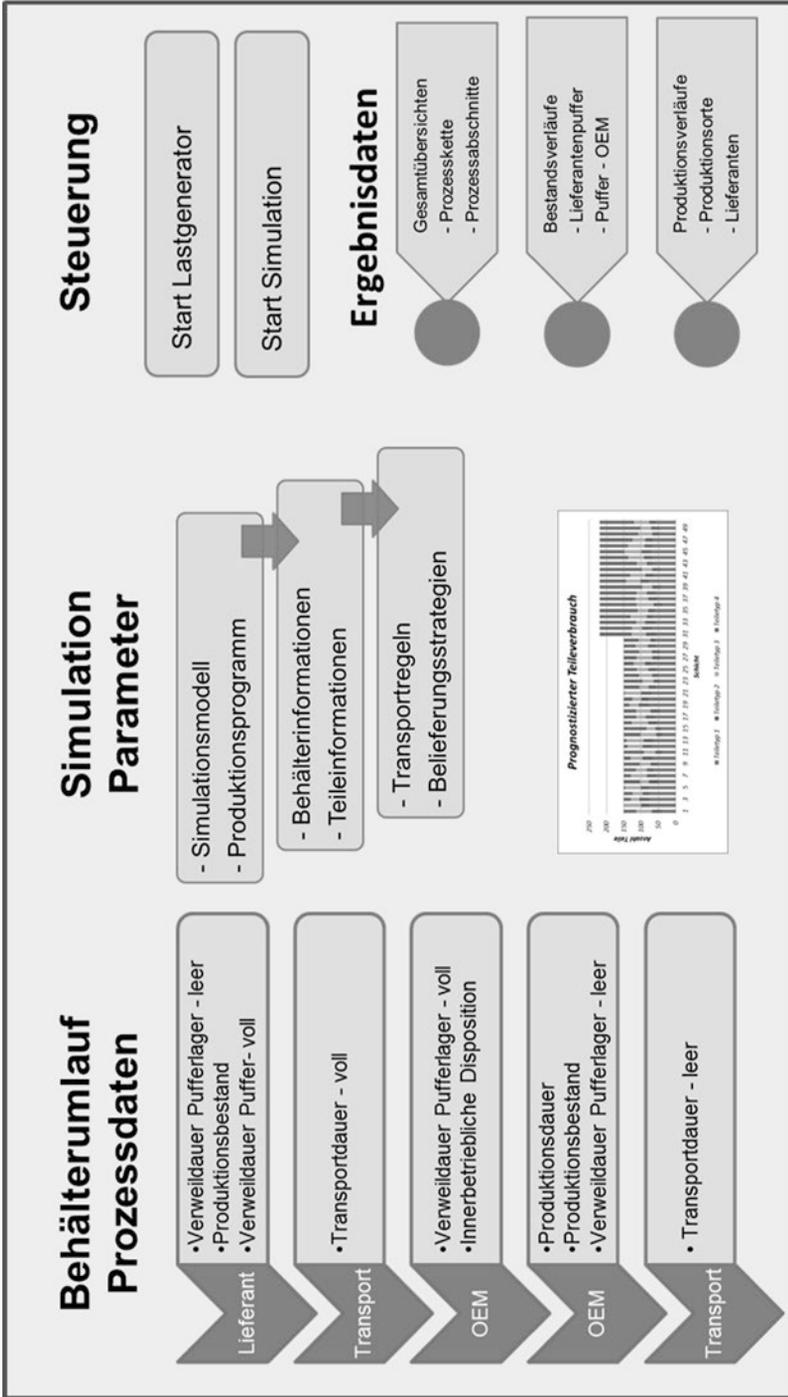


Abb. 12.5 Funktionsumfang des Simulationscockpits für das Behältermanagement

zunächst die Auswahl des Simulationsmodells und des zu untersuchenden Produktionsprogrammes. Weitere Informationen, die ergänzt werden müssen, werden aus Berechnungen abgeleitet, die im Cockpit hinterlegt sind, wie z. B. die Bestimmung der Gesamtanzahl der Behälter.

Die Transportregeln betreffen die Gebindeanzahl, die pro Transporteinheit bewegt werden soll. Für die Belieferungsstrategien ergeben sich je nach Belieferungskonzept unterschiedliche Behälterumläufe. Verglichen werden hier mehrstufige Belieferungen, Just-in-Time und Just-in-Sequence. Jede dieser Strategien kann zu unterschiedlichen Behälterbedarfen führen. So werden beispielsweise bei einer Just-in-Sequence-Belieferung weniger Anbruchbehälter benötigt, da verschiedene Teile auf einem Gestell untergebracht werden und nicht wie bei anderen Belieferungsformen jedes einzelne Teil seinen eigenen Behälter erhält.

### 12.4.3 Ergebnisdienste

Aus den durchgeführten Simulationsläufen werden standardisierte Ergebnisstatistiken erzeugt. Die folgenden Abbildungen (siehe Abb. 12.6 bis 12.9) geben einen Eindruck der verschiedenen Auswertungsmöglichkeiten.

Die Diagramme zeigen die Behältersituation beim Lieferanten und stellen ein instabiles Behältermanagement dar. Im Diagramm „Belegung Behälter über der Zeit“ (vgl. Abb. 12.6) wird die Anzahl der vollen und leeren Behälter beim Lieferanten über eine Simulationsdauer von 20 Tagen dargestellt. Es wird erkennbar, dass der Lieferant permanent leere Behälter erhält (ansteigender Abschnitt eines Sägezahns in der Farbe hell) und Behälter füllt (ansteigender Abschnitt eines Sägezahns in der Farbe dunkel). Sobald eine Transportmenge bereit steht, wird sie abtransportiert (steile Flanken der dunklen Sägezahnkurve). An der stetig fallenden Höhe der hellen Sägezahnkurve ist zu erkennen, dass der Zulauf an leeren Behältern zu gering ist; dies führt zwangsläufig dazu, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt keine leeren Behälter mehr zur Verfügung stehen. Das Diagramm „Ist-Behälterumlauf über der Zeit“ (vgl. Abb. 12.7) zeigt den Behälterumlauf

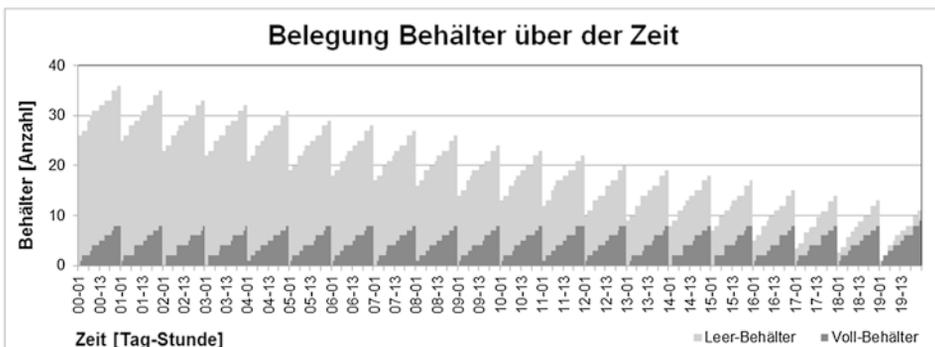


Abb. 12.6 Behälterbestand beim Lieferanten

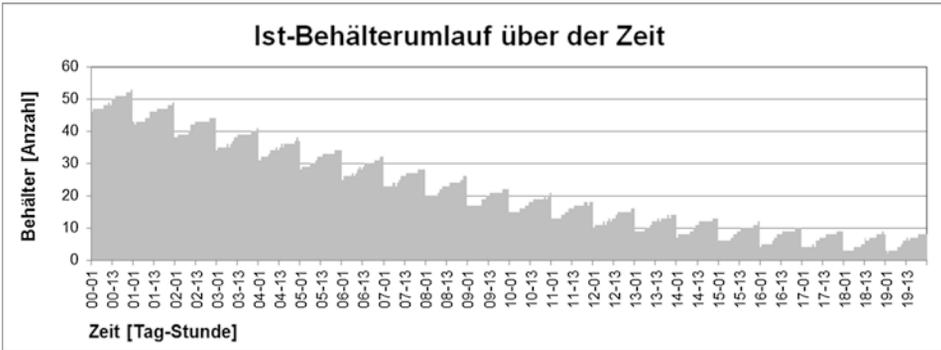


Abb. 12.7 Behälterumlauf beim Lieferanten

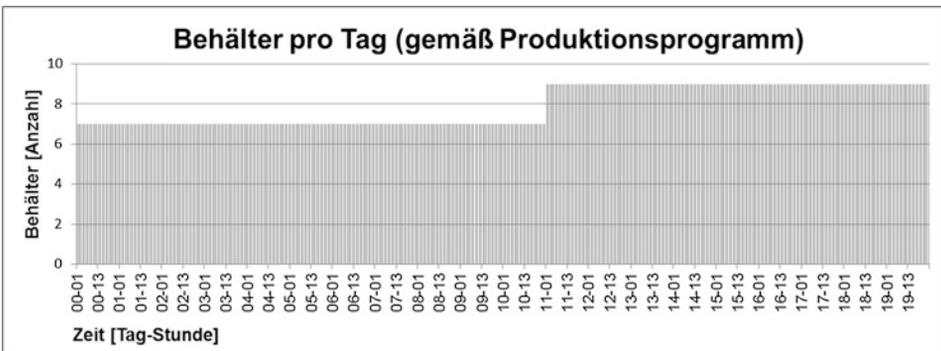
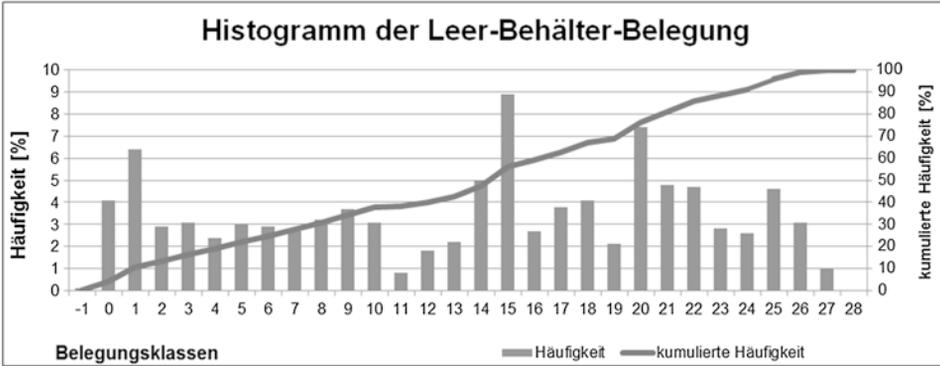


Abb. 12.8 Visualisierung des geplanten Produktionsprogramms

beim Lieferanten. Es ist zu erkennen, dass über die gesamte Simulationszeit insgesamt mehr Behälter abfließen als zufließen, auch wenn die Behälteranzahl in kleineren Perioden immer wieder ansteigt.

In dem Diagramm „Behälter pro Tag über der Zeit (gemäß Produktionsprogramm)“ (vgl. Abb. 12.8) wird lediglich das geplante Produktionsprogramm visualisiert. Es gilt überall in der Transportkette und dient als Referenz für die Kurven im Ergebnisblatt sowie als Hilfestellung zur Erklärung von Effekten. In der Abbildung wird dargestellt, dass ab Tag 11 der Behälterbedarf von 7 auf 9 Stück steigt. Im „Histogramm der Leer-Behälter-Belegung“ (vgl. Abb. 12.9) wird visualisiert, wie häufig jeweils eine bestimmte Behälterzahl vorhanden war. Erkennbar ist, dass in diesem Beispiel in ca. 4 % der Fälle kein Behälter beim Lieferanten vorhanden war (Belegungsklasse „0“ im Histogramm). Das Vorhandensein der Belegungsklasse „-1“ weist auf eine Besonderheit der Simulationsabbildung hin. Zunächst weist er aus, dass ein negativer Behälterbestand vorgelegen hat. In der Realität kann dieser Fall nicht eintreten, da ab einem Bestand von 0 Behältern die Produktion unterbrochen würde.



**Abb. 12.9** Häufigkeitsverteilung der Behälteranzahl beim Lieferanten

Die Simulation arbeitet aber abweichend davon weiter, es wird beim Fehlen von Behältern bewusst nicht unterbrochen, um das Normalverhalten des Systems (wenn Behälter vorhanden wären) weiter analysieren und die nachfolgende Entwicklung des Fehlbedarfs der Behälter ausweisen zu können, so dass es auch zu negativen Behälterbeständen kommen kann.

## 12.5 Ein Anwendungsbeispiel

Im Zusammenhang mit der Montage von Innenraumkomponenten von Fahrzeugen soll der Behälterumlauf geplant werden. Es handelt sich um Just-in-Time-Komponenten, wobei im Produktionsprogramm etwa zehn verschiedene Teile geplant werden. Die Anzahl der Behälter wird aufgrund überschlägiger Berechnungen auf 100 gesetzt.

Mit den eingegebenen Daten werden mehrere Simulationsläufe gestartet. Die Ergebnisse der Simulationsläufe sind in den folgenden Diagrammen (siehe Abb. 12.10 bis 12.13) dargestellt.

Der erste Simulationslauf wird mit den berechneten Werten des Umlaufbestandes durchgeführt. Eine Überprüfung der Simulationsergebnisse liefert erwartungsgemäß einen regelmäßigen Verlauf der Sägezahnkurven, da in dem Modell zunächst keinerlei Stochastik aktiviert ist (vgl. Abb. 12.10). Die Analyse lässt vermuten, dass der Umlaufbestand zu hoch ist. Deshalb wird ein weiterer Simulationslauf angestoßen, in dem die Behälterzahl des Umlaufbestandes reduziert wird. Das Ergebnis in Abb. 12.11 zeigt, dass der Bestandsverlauf mit der neuen Behälterzahl prinzipiell keinen Produktionsabbruch auslöst. In einem weiteren Simulationslauf werden nun die Schwankungen der Parameter berücksichtigt. Das Ergebnis in Abb. 12.12 zeigt extreme Verhältnisse mit mehreren Produktionsabbrüchen und teilweise sehr langen Ausfällen. Dargestellt wird auch die Unterdeckung mit Leerbehältern, die in der Größenordnung von etwa 20 Stück liegt. In weiteren Simulationsläufen wird die Umlaufbehälterzahl iterativ ermittelt, so dass keine Produktionsabbrüche mehr vorkommen. Die Gesamtbehälterzahl liegt nun sogar höher als zu Beginn der Experimente (ohne stochastische Schwankungen) (vgl. Abb. 12.13).

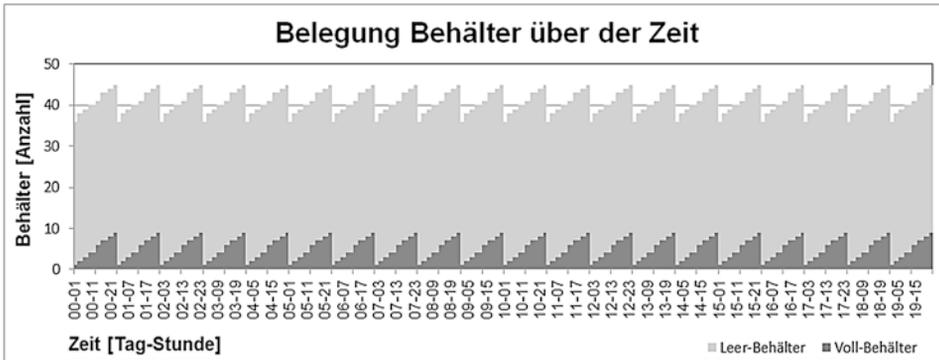


Abb. 12.10 Pufferbelegung mit hohem Leerbehälterbestand ohne Schwankungen

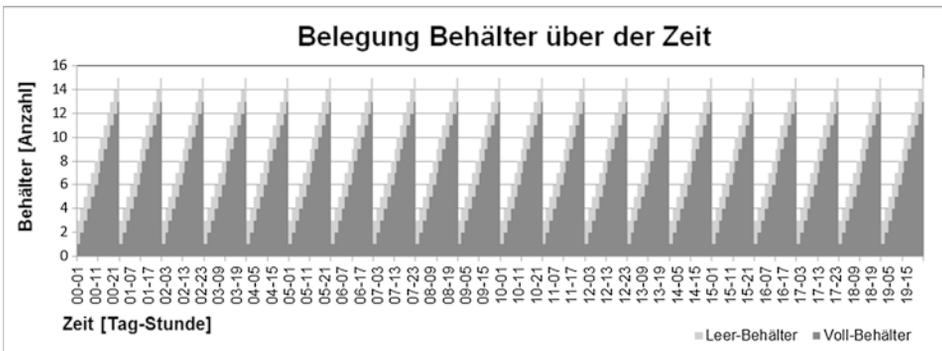


Abb. 12.11 Pufferbelegung mit angepasstem Leerbehälterbestand ohne Schwankungen

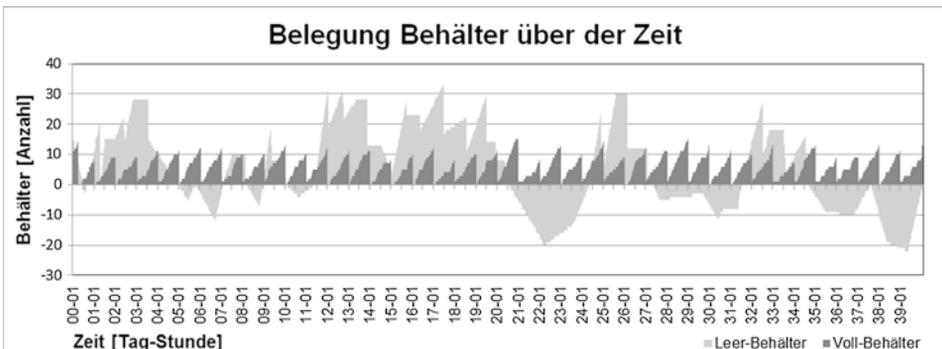
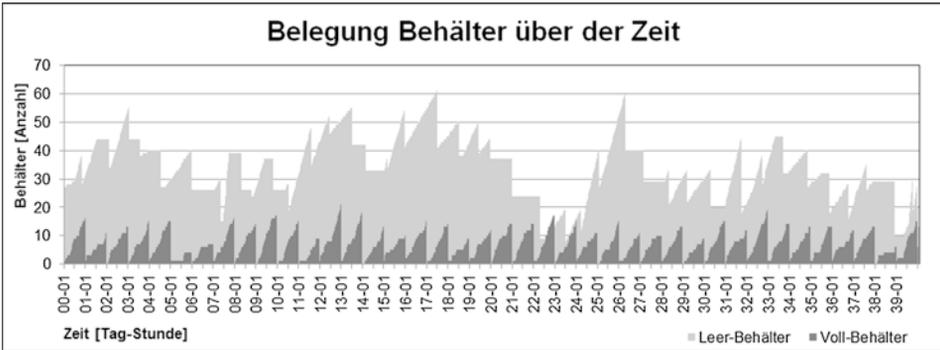


Abb. 12.12 Pufferbelegung mit angepassten Leerbehälterbestand mit Schwankungen



**Abb. 12.13** Pufferbelegung mit optimiertem Leerbehälterbestand mit Schwankungen

## 12.6 Zusammenfassung und Fazit

Die Nutzung der Simulationstechnik bei der Optimierung von Behälterumläufen ist ein interessantes Anwendungsgebiet, da es Elemente der Geschäftsprozesssimulation mit der ereignisdiskreten Materialflusssimulation verbindet. Besonderheiten sind insbesondere die Abbildungsgenauigkeit, die Prozesse mit ihren Durchlaufzeiten zusammenfasst, und der Modellierungsumfang, der sich oft über die Werksgrenzen hinaus zwischen Lieferanten und Automobilwerk abspielt und der die Transporte inkludiert. Betrachtet werden Prozesse und ihre Ablaufregeln. Diese Anwendung der Simulation ist jedoch nicht auf die Automobilindustrie beschränkt. Auch im Lebensmitteleinzelhandel werden auf diese Weise Palettenumläufe zwischen Lieferanten und den einzelnen Filialen analysiert, um Kostenpotenziale zu identifizieren.

Das vorgestellte Entscheidungsunterstützungsinstrument ist weit mehr als ein reines Simulationsmodell. Es strukturiert den Prozess der Behälterumlaufplanung so, dass Daten leicht bereitgestellt sowie die wesentlichen Steuerstrategien im System vorimplementiert und per Auswahlmenü genutzt werden können.

Durch die standardisierte Ergebnisdarstellung lassen sich die Modelle leicht prüfen und Effekte zielgerichtet analysieren und erklären. Die Ergebnisse müssen allerdings mit Vorsicht interpretiert werden. So werden beispielsweise in den Statistiken auch negative Bestände ausgewiesen. Dies ist hilfreich, weil dadurch abgeleitet werden kann, wie viele Behälter tatsächlich fehlen. Andererseits führen fehlende Behälter in der Realität zu einem Produktionsabbruch und damit natürlich zu weniger Transporten. Letztendlich wird ja in diesen Fällen die Programmplanung nicht erfüllt.

Rückschlüsse auf die Transporte und die Platzbedarfe in den Werken lassen sich nur bedingt ziehen. Wenn beispielsweise die Transporte noch mit weiteren Behältern kombiniert werden können, weil Routenfahrten das Aufsammeln weiterer Güter ermöglichen oder wenn besondere Stapelfaktoren berücksichtigt werden könnten, beispielsweise beim Trans-

port der Leerbehälter, können Fehlinterpretationen erfolgen, da die Gesamtheit aller gleichzeitig anfallenden Transporte berücksichtigt werden muss.

---

## Literatur

- Barbey HP (2010) Auslegung von Kanbansteuerungen bei starken Produktionsschwankungen mit Hilfe diskreter Simulation. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 221–228
- Binner HF (2011) Handbuch der prozessorientierten Arbeitsorganisation, 4. Aufl. Carl Hanser, München
- Hlupic V, Robinson S (1998) Business process modelling and analysis using discrete event simulation. In: Medeiros DJ, Watson EF, Carson JS, Manivannan MS (Hrsg) Proceedings of the 1998 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 1363–1370
- Love D, Barton J (1996) Evaluation of design decisions through CIM and simulation. Integr Manuf Syst 7:3–11
- Mutzke H, Rabe M, Wiener K (2010) Geschäftsprozessmodellierung und Simulation. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 551–558
- Onyeochoa EC, Khoury J (2013) A comparison of Kanban-like strategies in a multi-product manufacturing system under erratic demand. In: Pasupathy R, Kim S-H, Tolk A, Hill R, Kuhl ME (Hrsg) Proceedings of the 2013 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 2730–2741
- Pramanik N (2006) Process flow simulation to reduce WIP built-up and to maximize throughput in a multi-part multi-operation process – a case study. In: Proceedings of the 2006 IJME – INTERTECH conference, ENT 102-010, Industrial Diamond Assoc. of America. [http://ijme.us/cd\\_06/PDF/ENT%20102-010.pdf](http://ijme.us/cd_06/PDF/ENT%20102-010.pdf). Zugegriffen am 17.10.2016
- VDI (2014) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Beuth, Berlin
- Zhou Z, Rose O (2010) A WIP balance study from viewpoint of tool group in a Wafer Fab. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 341–348



**Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche** Nach dem Studium der Technischen Kybernetik an der Universität Stuttgart wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Förder- und Lagerwesen der Universität Dortmund von 1982–1983 und am Fraunhofer-Institut für Transporttechnik und Warendistribution, dem heutigen Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund, von 1983–1987. Im Jahr 1989 Promotion an der Universität Dortmund. Seit 1987 Geschäftsführer der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH in Dortmund und seit 2000 Professor an der Universität Duisburg-Essen und Inhaber des Lehrstuhls Transportsysteme und -logistik. Ab 2014 Vorstandsvorsitzender des Zentrums für Logistik und Verkehr als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Duisburg-Essen.



**Carsten Stange** Abschluss des Informatik-Studiums an der Universität Dortmund im Jahr 1997. Seit 1997 als Mitarbeiter bei der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH in Dortmund beschäftigt. Bis 2008 als Projektmanager im Bereich der Simulationsprojekte tätig mit den Schwerpunkten Simulation und Optimierung von Materialflusssystemen und Bewertung von Auftragssteuerungssystemen in der Automobilindustrie. Unterstützende Tätigkeiten in den Bereichen Softwareentwicklung und Training. Seit 2008 Leiter des Geschäftsfeldes Simulation innerhalb der SDZ GmbH.



**Mathias Bös** Seit dem Abschluss des Studiums des Maschinenbaus an der TU Dortmund im Jahr 1997 zunächst Projektingenieur bei der SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH; später Leiter für Simulationsprojekte in den Bereichen Logistik, Produktion und Flughafen. Seit 2001 Geschäftsführer der SDZ GmbH. Fachausschussmitglied im Verein Deutscher Ingenieure für Digitale Fabrik und Logistiksysteme und -management. Mitglied in der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) und im Innovationsbeirat des LOG-IT-Club.



Thorsten Sprock und Frank Hilmer

## 13.1 Einleitung und Problemstellung

Die Planung von logistischen Prozessen wird durch gestiegene Anforderungen und erhöhte Teilevielfalt immer komplexer. Das früher übliche manuelle Planen mit Werkzeugen wie Microsoft Excel bietet nicht mehr die Möglichkeit, diese Komplexität zu beherrschen. Um dieser Problematik Herr zu werden, wird die Ablaufsimulation eingesetzt.

Eine Übersicht der in der Automobilindustrie üblichen Belieferungsformen gibt z. B. die VDA-Empfehlung 5010 (VDA 2008). Der vorliegende Beitrag betrachtet nur den letzten Teil der Belieferungskette, nämlich die Materialbereitstellung am Einbaupunkt. Zunächst soll hier auf die speziellen Anforderungen und Probleme bei der Materialbereitstellung eingegangen werden. Anschließend wird gezeigt, wie die Ablaufsimulation den Planungsprozess unterstützt, und zur Verdeutlichung der Vorgehensweise ein Praxisbeispiel aus dem Karosseriebau dargestellt.

## 13.2 Unterschiede der Bereitstellungsarten

Die Bereitstellung des Materials kann in unterschiedlichen Arten erfolgen. Es wird zwischen der sequenzierten und der sortenreinen Bereitstellung unterschieden. Diese bei-

---

T. Sprock (✉)  
Volkswagen Aktiengesellschaft, Emden, Deutschland  
E-Mail: [thorsten.sprock@volkswagen.de](mailto:thorsten.sprock@volkswagen.de)

F. Hilmer  
SimPlan AG, Hanau, Deutschland

den Bereitstellungsarten werden im Folgenden beschrieben. Eine systematische Einführung in die innerbetriebliche Logistik in der Automobilindustrie kann z. B. Klug (2010), S. 149–252, entnommen werden.

### 13.2.1 Sequenzierte Bereitstellung

Die sequenzierte Belieferung wird eingesetzt, wenn eine sortenreine Bereitstellung aus Platzgründen (hohe Variantenzahl) oder prozesstechnischen Gründen nicht möglich ist. Sie setzt voraus, dass die genaue Auftragssequenz rechtzeitig bekannt ist, um die Behälter kommissionieren zu können. Das Verfahren wird daher meist nur in der Montage eingesetzt.

Es gibt folgende Möglichkeiten:

- JIS (Just in Sequence)-Bereitstellung (Sequenzierung):  
Der Behälter enthält unterschiedliche Varianten einer Teilefamilie (z. B. Stoßfänger hinten) in der Reihenfolge, in der die Aufträge am Verbauort eintreffen.
- Warenkorb-Bereitstellung:  
Der Behälter enthält alle Teile, die in einen bestimmten Auftrag an einem Verbauort (oder einer Gruppe von Verbauorten) eingebaut werden müssen.

Die Sequenzierung oder Warenkorbbildung erfolgt dann entweder bereits beim Lieferanten, der die Behälter an einen Übergabepuffer nahe der Produktion liefert, oder in produktionsnahen, internen Kommissionierzonen.

Aus logistischer Sicht hat die sequenzierte Bereitstellung den Vorteil, dass jeder Behälter eines bestimmten JIS- oder Warenkorb-Umfanges immer die Teile für eine feste Anzahl von Aufträgen enthält. Dadurch ergibt sich ein fester, mit der Produktion synchroner Bereitstellungszyklus, der sich gut planen lässt.

Die Bereitstellung erfolgt hier vorzugsweise mit Routenzügen oder automatischen, fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Problematisch wird hier die Verzahnung verschiedener Lieferzyklen, wenn auf einer Tour unterschiedliche Umfänge kombiniert werden sollen. Planungsziel ist es dann, die Routen so zusammenzustellen, dass die Transportkapazität immer voll genutzt werden kann. Die Lieferzyklen sollten deshalb jeweils Vielfache eines gemeinsamen Basiszyklus sein, wie ein einfaches Beispiel verdeutlichen soll: Umfang A enthält 12 Aufträge pro Behälter, die Umfänge B und C enthalten jeweils 24 Aufträge pro Behälter. Es wird immer nach jeweils 12 Produktionstakten ein Transport gestartet, der einen Behälter A und abwechselnd einen Behälter B oder C enthält.

### 13.2.2 Sortenreine Bereitstellung

Im Gegensatz zur sequenzierten Bereitstellung enthält der Behälter bei der sortenreinen Bereitstellung nur eine Teileart (Sachnummer). Da hier der Aufwand für die auftragsbezogene Kommissionierung entfällt, ist die sortenreine Bereitstellung die bevorzugte Standardmethode,

wenn genügend Platz am Einbaupunkt vorhanden ist. Dabei wird bei den Behältern zwischen Klein- und Großladungsträgern (KLT und GLT) unterschieden. Die Stückzahl innerhalb der Behälter hängt vom Volumen der enthaltenen Teile ab.

KLT können von einem Mitarbeiter getragen werden. Der Transport erfolgt hier meist per Routenzug, da aufgrund der Behältergröße viele Behälter auf einer Transportroute gebündelt werden können. Am Verbauort werden die KLT meist in einem Regal bereitgestellt.

GLT können per Stapler oder Routenzug transportiert werden. Da die Behälter nicht vom Mitarbeiter getragen werden können, müssen sich die Behälter beim Routenzugtransport entweder auf rollbaren Gestellen befinden oder Trailer (Transportanhänger) und Bereitstellplatz müssen mit Rollenbahnen ausgestattet sein, die ein Überschieben des Behälters erlauben. Dennoch wird meist die Bereitstellung per Routenzug bevorzugt, da so Transporte gebündelt werden können und außerdem die Unfallgefahr bei der Behälterhandhabung am Bereitstellort geringer ist. In Sonderfällen kann die Bereitstellung auch über eine Fördertechnik erfolgen, diese Variante soll hier aber nicht näher betrachtet werden.

Bestellungen für neue Behälter werden bestandsgesteuert am Bereitstellort ausgelöst (z. B. wenn ein Behälter leer wird, sogenanntes Pull-Prinzip) und meist elektronisch übermittelt. Übliche Bestellverfahren sind:

- N-Behälter-Prinzip (mit  $N > 1$ ):  
Am Bereitstellort befinden sich  $N$  Bereitstellplätze für eine Sachnummer. Immer wenn ein Behälter leer wird, wird ein neuer Behälter bestellt. Zum Zeitpunkt der Bestellung sind damit noch  $N - 1$  Behälter an der Linie verfügbar. Die Wiederbeschaffungszeit darf also maximal so groß sein wie die Zeit, in der diese  $N - 1$  Behälterinhalte verbraucht werden. Bei GLT wird üblicherweise mit einem 2-Behälter-Prinzip gearbeitet, bei KLT ist  $N$  auch oft größer 2.
- 1-Behälter-Prinzip:  
Dieses Prinzip wird nur verwendet, wenn der Platz nicht für mehrere Behälter ausreicht. Ein neuer Behälter wird bestellt, wenn der Bestand im Behälter eine bestimmte Bestellgrenze erreicht. Die Wiederbeschaffungszeit darf maximal so groß sein wie die Zeit, in der die Restmenge verbraucht wird.

Da sich die Behälterinhalte bei sortenreiner Bereitstellung stark unterscheiden und die einzelnen Verbauorte nicht immer gleichzeitig (durch Entkopplungen und Störungen) und gleichmäßig (aufgrund von unterschiedlichen Verbrauraten oder varianten- oder ausstattungsabhängigen Teilen) Teile verbrauchen, entstehen die Bestellungen in beliebigen Konstellationen. So kann es im zeitlichen Verlauf zu ausgeprägten Spitzen der Auftragslast kommen. Wenn die Transportressourcen dann nicht ausreichen, kommt es zu einer verzögerten Bereitstellung der Behälter, was Versorgungsabrisse in der Produktion zur Folge haben kann. Die Herausforderung der Planung besteht darin, einen guten Kompromiss zwischen Versorgungssicherheit einerseits und Investitions- und Betriebskostenminimierung andererseits zu finden. Diese Aufgabe ist aufgrund des stochastisch schwankenden Auftragsvolumens kaum mit statischen Planungswerkzeugen zu lösen.

### 13.3 Einsatz der Ablaufsimulation in der Planung

Der planungsbegleitende Einsatz der Ablaufsimulation ist generell immer sinnvoll, wenn zeitlich unregelmäßig variierende Größen die zu untersuchenden Prozesse beeinflussen. Im Bereich der Materialbereitstellung sind dies z. B.

- Auftragsvolumen (Behälter-Bestellungen) und Auftragseigenschaften (z. B. Behälterinhalt)
- Auftragssequenz (bei varianten- oder ausstattungsabhängigen Teilen)
- Störungen der Produktionslinie
- Störungen der logistischen Ressourcen
- Wartezeiten an Kreuzungen
- Wartezeiten hinter langsameren oder stehenden Fahrzeugen
- Wartezeiten, weil das Fahrtziel belegt ist
- Batteriewechsel bei Fahrzeugen während der Produktionszeit

Bei der sequenzierten Bereitstellung spielen die ersten beiden Größen keine Rolle, weil der Behälter die Teile bereits in Auftragssequenz enthält. Die Bereitstellung erfolgt daher in einem festen Zyklus synchron zur Produktion. Die Störungen der Produktionslinie sind nur von Bedeutung, wenn mehrere Linien mit Entkopplungspuffern dazwischen versorgt werden, da bei einer Linie ohne Entkopplung im Fall einer Störung immer die gesamte Linie zum Stillstand kommt. Bei der sortenreinen Bereitstellung dagegen ist das Auftragsvolumen meist von großer Bedeutung, denn die verschiedenen Behälterinhalte und Einbauhäufigkeiten können zu stark schwankenden Auftragseingängen führen.

Typische Fragestellungen, die mit der Ablaufsimulation untersucht werden können, sind:

- Treten Versorgungsabbrisse an der Linie auf (Häufigkeit, Dauer)?
- Wie viele Transportressourcen (Fahrzeuge, Mitarbeiter) werden benötigt und wie sind diese ausgelastet?
- Wo treten ggf. Wartezeiten für Fahrzeuge auf, die die Bereitstellung verzögern?
- Wie verläuft der Lagerbestand über die Zeit, wie viel Lagerplatz wird benötigt und wie lange liegen Teile im Lager?
- Wie lang sind die Wiederbeschaffungszeiten von der Behälterbestellung bis zur Bereitstellung des bestellten Behälters?
- Wie stark sind Wege und Kreuzungen ausgelastet?

Außerdem eignet sich die Simulation sehr gut, um die geplante Steuerung des Versorgungsprozesses zu prüfen und ggf. zu verbessern. Dies ist vor allem beim Einsatz von Routenzügen sinnvoll, da es hier mehr Einflussfaktoren der Steuerung gibt als bei der Bereitstellung per Stapler, z. B.

- feste oder auftragsabhängige Routenführung
- regelmäßige oder bedarfsgesteuerte Fahrzyklen
- Auftragsdisposition (z. B. Priorisierungsverfahren)
- Versorgungsart (z. B. Behälterwechsel am Bedarfsort oder Leergutsammlung und Belieferung auf getrennten Touren)
- Tourzuordnung fest an ein Fahrzeug gebunden oder nach Bedarf
- Kopplung des Zuges (Darf das Zugfahrzeug die Trailergarnitur nach Tourende wechseln?)

Die folgenden Unterkapitel zeigen einige wichtige Punkte auf, die bei der Modellierung beachtet werden müssen.

### 13.3.1 Detaillierungsgrad

Für die Beantwortung der oben beschriebenen Fragestellungen müssen einzelne, unabhängige Handhabungsschritte (z. B. Behältertausch am Bedarfsort, Aufnehmen eines Behälters im Supermarkt) nicht im Detail modelliert werden. Hier genügt jeweils die Annahme einer pauschalen Handhabungszeit (ggf. mit zufälligen Schwankungen), die im Vorfeld durch eine statische Zeitanalyse oder Messungen ermittelt wird. Dagegen werden die Fahrzeugbewegungen zwischen den Handhabungsstationen (z. B. vom Lager zum Bereitstellort) durch Fahrzeugobjekte modelliert, die sich auf einem Wegenetz bewegen. So können Wegeauslastungen bestimmt und Wartezeiten (z. B. an Kreuzungen) ermittelt werden.

Auch der Prozessablauf (z. B. Generierung der Bestellungen, Disposition der Fahraufträge) muss realitätsnah modelliert werden, um Aussagen zu Auslastungen und Wiederbeschaffungszeiten treffen zu können.

### 13.3.2 Benötigte Eingangsdaten

Eine Ablaufsimulation mit dem beschriebenen Detaillierungsgrad benötigt eine Vielzahl von Eingangsdaten, die in der folgenden Aufzählung kurz zusammengefasst sind.

- Produktionsprogramm: Taktzeit, Arbeitszeitmodell, Auftragsvarianten
- Materialflusstabelle: Logistikkdaten für jede Sachnummer und jeden Transportschritt. Die im Einzelnen benötigten Daten hängen vom abgebildeten Prozess ab, z. B.
  - Bedarfsdaten (z. B. relevante Auftragsvarianten, Einbauraten, Einbauwahrscheinlichkeiten)
  - Transportbehältertypen (Größe, Gewicht, ...)
  - Transportressourcen
  - Start- und Zielpunkte
  - Behälterinhalte

- Fahrzeugdaten: Abmessungen, Fahrgeschwindigkeiten, Ladekapazitäten, Batteriewechselzyklen
- Handhabungszeiten
- Stördaten

### 13.3.3 Abbildung des Teileverbrauchs

Die Bestellung der Behälter wird durch Unterschreiten eines bestimmten Mindestbestandes an der Produktionslinie ausgelöst. Der Teileverbrauch kann auf unterschiedliche Weise modelliert werden:

- Teileverbrauch taktgesteuert:  
Jedes Teil wird in einem festen Takt verbraucht, unabhängig vom Takt der anderen Teile. Diese Variante ist leicht zu realisieren, aber nur sinnvoll, wenn der Teileverbau auch in Realität gleichmäßig erfolgt.
- Auftragssequenz taktgesteuert:  
Einzelne Produktionsbereiche (z. B. eine Anlage mit mehreren Stationen) werden in einem virtuellen Verbrauchspunkt zusammengefasst, an dem eine Auftragssequenz mit fester Taktzeit simuliert wird. Die Teile werden entsprechend der Auftragsvariante, Einbauraten und Einbauwahrscheinlichkeit (ausstattungsabhängige Teile) in diese Aufträge eingebaut. Dies ist die in der Regel verwendete Modellierungsvariante.
- Kopplung mit einem Modell der Produktionslinie:  
Die Produktionslinie wird mit allen Verbauorten (ggf. in vereinfachter Form) modelliert. Der Teileverbau erfolgt an jedem Verbauort entsprechend des gerade bearbeiteten Auftrags. Diese Variante ist am detailliertesten, erfordert aber den größten Aufwand bei der Modellerstellung. Diese Vorgehensweise ist beispielsweise in der Montage sinnvoll, wenn die Nachbestellung der Behälter vorausschauend anhand des Bedarfs der kommenden Auftragssequenz gesteuert wird.

### 13.3.4 Hallenlayout

Der Materialfluss sollte im Hallen- oder Fabriklayout maßstabsgetreu animiert werden. Dies ermöglicht es zum einen, dass die Strecken des Wegenetzes einfach übertragen werden können, zum anderen hilft es bei der Orientierung im Modell und erhöht die Wiedererkennung des Modells beim Kunden. Dazu wird das Wegenetz mit dem Layout im Hintergrund modelliert. Die Handhabungsstationen befinden sich neben den Wegen. In der Animation sollte der Zustand der Stationen (z. B. „Gestört“, „Wartet auf Lieferung“ oder „Versorgungsabbruch“) erkennbar sein. Es muss berücksichtigt werden, ob ein Fahrzeug, das an einer Handhabungsstation steht, die Straße blockiert oder ob andere Fahrzeuge ungehindert passieren können. An Kreuzungen müssen ggf. Vorfahrtsregelungen modelliert werden.

### 13.3.5 Abbildung der Transporte

Die Bestellungen werden im Modell an eine Steuerung gemeldet, die diese zeitlich priorisiert, an freie Ressourcen vergibt und schließlich die Abwicklung der Bestellung steuert. Dabei gibt es unterschiedliche Transportarten (z. B. Stapler, Routenzug), bei denen wiederum unterschiedliche Varianten im Ablauf (z. B. Routenzüge mit festen Zügen oder mit Wechselgarnituren) möglich sind. Außerdem sind oft projektspezifische Besonderheiten zu berücksichtigen. Daher liegt der größte Aufwand bei der Modellerstellung meist in der Programmierung der Transportsteuerung.

### 13.3.6 Ergebnisgrößen

Zur Untersuchung der oben beschriebenen Fragestellungen sollte das Modell folgende Ergebnisgrößen zur Verfügung stellen:

- Ressourcenauslastungen
- während der Simulation aufgetretene Versorgungsabbrisse
- Wiederbeschaffungszeiten
- Bestand an offenen Bestellungen („Auftragswarteschlangen“)
- Kennzahlen der gefahrenen Touren (z. B. gefahrener Weg, Dauer, Anzahl Behälter)
- Transportmengen (mit Soll-/Ist-Vergleich)
- Wegenetzauslastung
- Bestände am Bereitstellort und (falls mit betrachtet) im Lager oder in Puffern

---

## 13.4 Anwendungsbeispiel Karosseriebau

Im Folgenden soll anhand eines Anwendungsbeispiels veranschaulicht werden, wie die bereits beschriebene Theorie umgesetzt wird. Besonderes Augenmerk wird dabei auf den Experimentierprozess gelegt.

### 13.4.1 Einsatzszenario

Die hier betrachtete Problemstellung beschäftigt sich mit der Versorgung einer Karosseriebauhalle. Dort befinden sich Anlagen, die für verschiedene Modelle in variablem Modellmix bei einer durchschnittlichen Ausbringung von 60 jph (jobs per hour) ausgelegt sind. Die Bereitstellung erfolgt überall sortenrein (keine JIS-Bereitstellung). Nachfolgend sind einige wichtige Prämissen aufgelistet.

### 13.4.1.1 Einsatz von Routenzügen

Die Versorgung der Anlagen soll aus Kosten- und Sicherheitsgründen über Routenzüge und nur in Ausnahmefällen mit Gabelstaplern erfolgen. Ein Routenzug besteht aus einer Zugmaschine und jeweils zwei Hängern. Um einen schnellen Wechsel im Behälterbahnhof zu ermöglichen, gibt es mehr Hängerpaare als Zugmaschinen, so dass die Hänger im Bahnhof bereits beladen werden können während die Zugmaschine noch mit der Wechselgarnitur unterwegs ist. Das Beladen der Routenzüge aus dem Lager erfolgt durch Gabelstapler. Im Anlagenbereich hingegen werden die Behälter manuell in die Anlage geschoben.

Für die Anlieferung des Materials gibt es je nach Bedarf unterschiedliche Behälter mit verschiedenen Größen. Aufgrund der auf den Hängern für den Behälterwechsel installierten Rollenbahnen können nicht alle Behältertypen auf dem gleichen Hängertyp transportiert werden. Daher gibt es vier verschiedene Hängertypen. Ein Zug besteht immer aus zwei Hängern des gleichen Typs.

Da sich bei einigen Umfängen durch kleine Behälterinhalte kurze Wiederbeschaffungszeiten ergeben, können nicht alle Bedarfsorte eines Hängertyps von einer Route angefahren werden. Es wurde daher die Aufteilung in zwei Routen pro Hängertyp (jeweils linke bzw. rechte Seite der Halle) vorgeschlagen. Diese Aufteilung diente als Grundlage für die Experimentierphase.

Außerdem sollte das sogenannte Mitarbeiterpooling eingesetzt werden, bei dem die Mitarbeiter nicht fest einer Route zugeordnet sind. Die Zugmaschinenfahrer bilden einen Pool, der alle Routen bedienen kann, die im gleichen Bahnhofsbereich starten. Nachdem ein Fahrer eine Tour beendet hat, übernimmt er anschließend die nächste anliegende Tour. So soll eine bessere Gesamtauslastung der Fahrer gewährleistet werden.

### 13.4.1.2 Bestellverfahren

Standardmäßig soll ein 2-Behälterprinzip eingesetzt werden. Wenn ein Behälter aufgebraucht ist, bestellt der Mitarbeiter den nächsten. Während der Wiederbeschaffungszeit des bestellten Behälters wird die Anlage aus dem zweiten Behälter versorgt. Mit der Bestellung bei entleertem Behälter ist sichergestellt, dass bei Anlieferung immer ein leerer Behälter bereitsteht. In Ausnahmefällen (wenn an der Anlage nur Platz für einen Behälter ist oder der Inhalt eines Behälters nicht ausreicht, um die Lieferzeit zu überbrücken) muss vor dem Verbrauch des Inhaltes eines Behälters bestellt werden.

## 13.4.2 Zielstellung

Für eine erfolgreiche Simulationsstudie ist es erforderlich, konkrete Ziele zu definieren, die betrachtet werden sollen. Nachfolgend sind einige Ziele definiert, ihre Priorität ist dabei absteigend.

### 13.4.2.1 Prozessbelieferung sicherstellen

Das wichtigste Ziel der Simulationsstudie ist die Prozessabsicherung. Jedes untersuchte Szenario muss die Belieferung der Produktion ohne Abrisse aufgrund von Materialmangel

sicherstellen. Wird bei einem Experiment ein Abriss aufgrund Null-Bestand festgestellt, so muss dieses noch einmal überarbeitet werden (z. B. Erhöhung der Fahrzeuganzahl, Änderung der Routen).

### **13.4.2.2 Möglichst gute Routenbelegung und Auslastung der Routenzüge**

Die Routenzüge (und auch alle anderen Fahrzeuge) sollen möglichst hoch ausgelastet werden. Da die Routenzüge auf festen Routen fahren, kann eine Optimierung der Auslastung nur über eine möglichst geschickte Wahl der Routen erfolgen. Ausgehend von den Routenvorgaben der Logistikplanung sollten die Routen experimentell optimiert werden, so dass einerseits alle Zugmaschinen hoch ausgelastet sind und die Anhänger möglichst nicht leer fahren, andererseits aber immer eine sichere Versorgung gewährleistet ist.

### **13.4.2.3 Ermittlung des Einflusses von Störungen**

Wie bei allen technischen Anlagen ereignen sich auch in der hier betrachteten Fertigung gelegentlich Störungen, die den Produktionsprozess beeinflussen. Bei der Belieferungssimulation werden diese Störungen im ersten Schritt nicht betrachtet, da eine störungsfreie Produktion von der Logistik die maximale Leistung erfordert; dies ist also bezüglich Durchsatz und Wiederbeschaffungszeit der ungünstigste Fall. Störungen der Produktion können aber auf die Logistik auch negative Einflüsse haben, wenn die von einer Route belieferten Stationen voneinander entkoppelt sind, d. h., eine Station Teile verbraucht, während eine andere gestört ist. Wenn vor dem Aufbrauchen eines Behälters bestellt wird, kann durch eine Störung eine bereits versendete Lieferung eventuell nicht abgegeben werden. Wenn dann der Routenzug bis zum Aufbrauchen des Behälters wartet, kann der Bestand an den weiteren Stationen der Route abreißen. Wenn er dagegen nicht wartet, sind geeignete Notstrategien erforderlich (z. B. Umpacken der Teile oder Abgabe auf Pufferplatz und späterer manueller Austausch). Ein Ziel der Simulation ist es, die Häufigkeit dieser Situation zu ermitteln und durch geeignete Wahl des Bestellzeitpunkts möglichst zu vermeiden.

## **13.4.3 Modellerstellung**

Zur Erstellung des Simulationsmodells wurde das Simulationswerkzeug Plant Simulation in Verbindung mit dem VDA Automotive Bausteinkasten genutzt. Dieser Bausteinkasten stellt eine Bibliothek mit speziell auf die Belieferungssimulation in der Automobilindustrie angepassten Bausteinen zur Verfügung.

Das Modell ist hierarchisch strukturiert. Die oberste Ebene enthält alle übergeordneten Steuerungselemente und die einzelnen Hallen. In der grafischen Darstellung ist das Werklayout zur Orientierung als Hintergrund eingebunden. In den Hallen (2. Ebene) sind die einzelnen Straßen, Anlagen und Bereitstellorte modelliert. Auch hier ist jeweils das Layout als Hintergrund eingebunden.

Im Folgenden wird auf die Eingangsdaten und die individuellen Programmierungen eingegangen.

### 13.4.3.1 Eingangquellen für Parametrierung

Um die Parametrisierung des Modells möglichst schnell und unabhängig vom Simulationswerkzeug verändern zu können, ist eine Excel-Tabelle für die wichtigsten Eigenschaften erstellt worden. Darin enthalten sind z. B. die Fahrzeuge (Typ, Anzahl Fahrer, Geschwindigkeiten und Abmaße) und Anhänger, parametrisierbare Zeiten, Fahrbereiche und zugehörige Anlagen bzw. Zugtypen und die Definition der Zugtypen (Zugmaschine mit Hängern).

Zusätzlich wird die Materialflusstabelle der Logistikplanung als Informationsquelle genutzt. Hier sind alle Teilenummern mit den dazugehörigen logistischen Daten enthalten: Quelle der Teile, Bedarfsort (Anlage, Straße, Stellplatz), Belieferungsprozess, Behältertyp, Behältermaße, Behälterinhalt.

Für die Namen der Bedarfsorte wird in diesem Fall eine spezielle Codierung verwendet, die eine automatische Zuordnung der Bedarfsortdaten der Materialflusstabelle zu den entsprechenden Objekten im Simulationsmodell ermöglicht.

### 13.4.3.2 Individuelle Programmierung

Alle bisher beschriebenen Werkzeuge und Daten sind in dieser Form noch nicht zum Experimentieren geeignet. Wie bereits im Abschn. 13.3.5 angedeutet, ergibt erst die individuelle Programmierung den sinnvollen Einsatz der Simulation. Grundlage der Modellierung war der VDA Automotive Bausteinkasten, insbesondere das Logistikmodul. Folgende Umfänge mussten individuell für das Projekt programmiert werden:

- Modellierung des Layouts mit den erforderlichen Bedarfsorten und Auftragsquellen
- Daten einlesen und aufprägen in die zuvor modellierte Datenstruktur
- Entwicklung der erforderlichen Routensteuerungen, Bestellverfahren und Handlungsstrategien
- Spezielle Datenerfassungen für die Auswertung und den Vergleich verschiedener Varianten

### 13.4.3.3 Modellverifikation und -validierung

Bevor mit dem Experimentieren begonnen werden kann, ist zunächst zu prüfen, ob das Modell im Rahmen der gewählten Detaillierung korrekte Ergebnisse liefert (Modellverifikation) und ob die gelieferten Ausgangsdaten geeignet sind, die Fragestellungen zu beantworten (Modellvalidierung).

Für die Modellverifikation wurden folgende Techniken angewandt:

- Durch Beobachtung der Animation wurde geprüft, ob die Routen wie vorgesehen gefahren und von den richtigen Hängertypen bedient werden. Außerdem können in der Animation manchmal Fehler der Steuerung aufgedeckt werden, z. B. wenn Fahrzeuge auf Aufträge, gleichzeitig jedoch viele Stationen auf eine Lieferung warten.
- Die gemessenen mittleren Transportraten (Anzahl transportierter Behälter pro Zeiteinheit) wurden mit den theoretisch berechneten Werten abgeglichen.
- Die pro Tour gefahrenen Strecken und die Tourdauer wurden mit theoretischen Abschätzungen verglichen.

- Die Konsistenz verschiedener Auswertungen wurde geprüft (z. B. Anzahl gefahrener Touren, Anzahl pro Tour transportierter Behälter und mittlere Transportrate).

Die Modellvalidierung zeigte, dass noch zusätzliche Auswertungen erforderlich waren (z. B. ein detailliertes Tour-Logbuch), um das Verhalten der dispositiven Steuerungen genau analysieren zu können. Diese Auswertungen wurden ergänzt. Auch während der Experimentierphase traten noch neue Fragestellungen auf, die weitere Anpassungen der Auswertungen erforderlich machten.

### 13.4.4 Experimentierprozess

Nach der Modellierung und Modellvalidierung kann mit der Experimentierphase begonnen werden. Der Experimentierprozess folgt den in Abschn. 13.4.2 beschriebenen Zielen:

1. Durchsatz sicherstellen
2. Versorgungsabbrisse vermeiden
3. Verhalten bei Anlagenstörungen aufzeigen

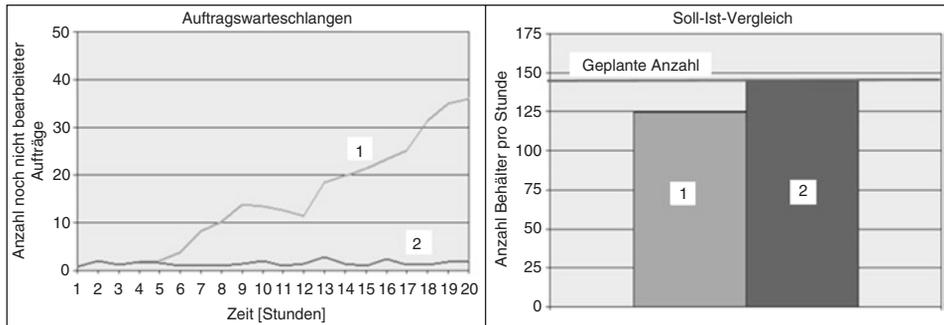
#### 13.4.4.1 Durchsatz sicherstellen

In diesem Schritt werden im Modell an den Bedarfsorten negative Bestände erlaubt, d. h., auch wenn eigentlich keine Teile mehr vorhanden sind (Bestand bei 0), läuft im Modell die Produktion weiter und der Bestand fällt in den negativen Bereich. So kann geprüft werden, ob das System überhaupt den geforderten Durchsatz erreicht. Die Wiederbeschaffungszeiten spielen hier keine Rolle, da bei verspäteter Lieferung trotzdem weiter produziert und bestellt wird.

In den Experimenten wurde schrittweise ermittelt, wie viele Fahrzeuge benötigt werden, um alle Bestellungen abwickeln zu können. Daraus kann auch die Anzahl der benötigten Mitarbeiter abgeleitet werden. Die Ergebnisse bilden den Ausgangspunkt für die folgenden Schritte.

Zur Beurteilung der Ergebnisse werden hauptsächlich die folgenden Auswertungen verwendet:

- Soll-/Ist-Durchsatzvergleich:  
Die im Experiment erreichten Transportraten werden getrennt nach Fahrbereichen bzw. Routen mit den berechneten Transportraten verglichen.
- Auftragswarteschlangen:  
Der Zeitverlauf des Auftragsbestandes (Anzahl bestellter, aber noch nicht begonnener Transporte) wird getrennt nach Fahrbereichen bzw. Routen betrachtet. Wenn der Bestand stetig steigt, ist der Bereich überlastet.
- Zustandsdiagramm der Fahrzeuge:  
Die Höhe des Warteanteils in der prozentualen Verteilung der Fahrzeugzustände (gemittelt über alle Fahrzeuge eines Fahrzeugpools) gibt ebenfalls einen Hinweis, ob die Anzahl der Fahrzeuge reduziert werden kann oder erhöht werden muss.



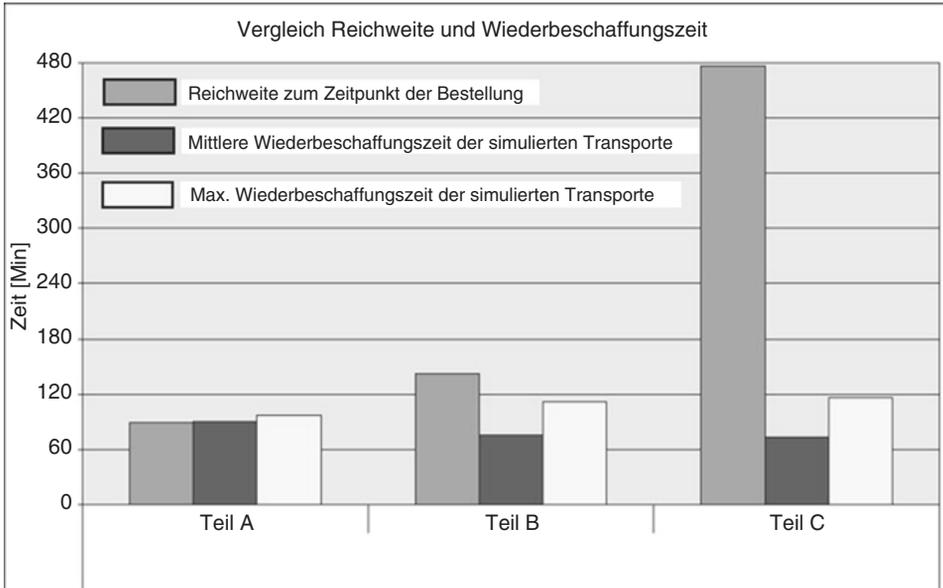
**Abb. 13.1** Experimentvergleich: In Experiment 2 wurden mehr Stapler für die Routenzugbeladung eingesetzt als in 1

Die Abb. 13.1 zeigt als Beispiel die ersten beiden Auswertungen für den Staplerpool, der für die Beladung der Routenzüge zuständig ist. Im ersten Experiment wird der Soll-Durchsatz nicht erreicht, der Auftragsbestand wächst stetig an. Im zweiten Experiment wurde die Anzahl der eingesetzten Stapler erhöht: Der Soll-Durchsatz wird erreicht, und der Auftragsbestand ist durchgehend auf niedrigem Niveau.

#### 13.4.4.2 Versorgungsabbrisse vermeiden

Nachdem das Modell im ersten Schritt so parametrisiert wurde, dass die geforderten Transportraten erreicht werden, soll im zweiten Schritt geprüft werden, ob die bestellten Behälter auch rechtzeitig angeliefert werden, d. h. bevor es zu einem Versorgungsabbriss kommt. Daher werden jetzt negative Bestände nicht mehr zugelassen. Wenn an der Produktionslinie Teile zum Verbau fehlen, wird dies statistisch als Engpass erfasst. Dabei wird ausgewertet, wie lange die Engpasssituation dauert, wie häufig Engpässe auftreten und wie viele Aufträge aufgrund der Engpässe nicht gefertigt werden konnten.

Zur Analyse der Engpässe ist es oft hilfreich, die Reichweite des Restbestandes zum Zeitpunkt der Bestellung („Restreichweite“) mit der im Modell gemessenen Wiederbeschaffungszeit zu vergleichen. Abb. 13.2 zeigt ein Beispiel für drei Sachnummern an einem ausgewählten Bedarfsort. Bei Teil A ist die Restreichweite geringer als die maximal gemessene Wiederbeschaffungszeit. Allerdings liegt die Restreichweite mit ca. 90 Minuten innerhalb des geplanten Bereichs, hier ist also eine Verkürzung der Transportzeit anzustreben. Bei Teil B und C ist die Restreichweite deutlich größer als die maximal gemessene Wiederbeschaffungszeit, hier ist die Versorgung also sicher.



**Abb. 13.2** Vergleich der Reichweite zum Zeitpunkt der Bestellung mit der gemessenen Wiederbeschaffungszeit

Im betrachteten Projekt kamen folgende Maßnahmen zur Vermeidung von Versorgungsabbrissen in Betracht:

- Aufteilen der Route, sodass weit entfernte Bedarfsorte schneller erreicht werden.
- Kritische Bedarfsorte an den Anfang der Route legen.
- Nur die Bedarfsorte anfahren, an die auch Behälter geliefert werden müssen (bei gleicher Anzahl Fahrer ergibt sich dadurch mehr Transportkapazität, da Touren schneller abgearbeitet sind).
- Mehr Zeitreserve für die Beladung einplanen. Diese Variante hat allerdings den Nachteil, dass weniger Aufträge als Dispositionsmasse bei der Tourbildung zur Verfügung stehen, weil die Zeitspanne zwischen Bestellung und Start der Beladung kleiner wird. Somit sinkt die Auslastung der Züge, was wiederum einen höheren Mitarbeiterbedarf zur Folge hat.
- Anzahl der Mitarbeiter bei der Beladung erhöhen.

Wenn dagegen die Restreichweite eines Teils so kurz ist, dass auch bei optimaler Transportdurchführung keine sichere Versorgung zu gewährleisten ist, müssen Maßnahmen zur Verlängerung der Restreichweite ergriffen werden. Mögliche Maßnahmen sind:

- Einen Behälter-Stellplatz am Bedarfsort hinzufügen.
- Den Behälterinhalt vergrößern.
- Früher bestellen, d. h. beim 2-Behälter-Prinzip: Bestellen, bevor der erste Behälter leer ist.

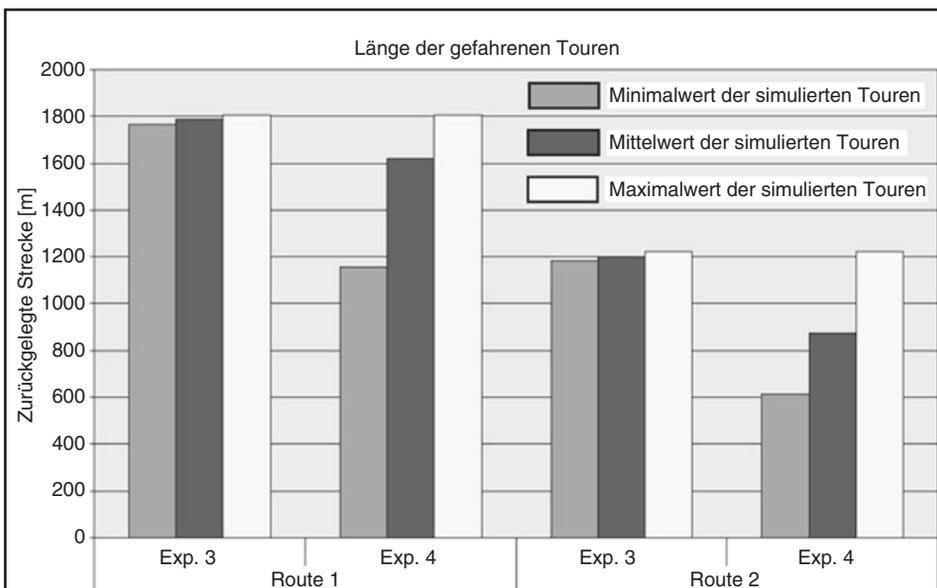
Bei dieser Variante kann es vorkommen, dass der Routenzug den neuen Behälter bereits liefert, bevor der alte (erste) Behälter leer ist. Dieses Risiko ist besonders groß, wenn an der Anlage nach Bestellung eine Störung auftritt (siehe auch Schritt 3 im nächsten Abschnitt).

Wenn alle bisher beschriebenen Maßnahmen keinen Erfolg haben, kann noch der Einsatz von Staplern für die besonders kritischen Umfänge erwogen werden, da hier aufgrund des einstufigen und direkten Transports meist deutlich kürzere Wiederbeschaffungszeiten zu realisieren sind als bei Routenzügen.

Im betrachteten Beispiel konnten die Engpässe durch die Kombination der oben beschriebenen Maßnahmen beseitigt werden. In den Experimenten wurden noch folgende Auswertungen zur Beurteilung der Wirksamkeit der getesteten Maßnahmen verwendet:

- Zustandsdiagramme der Fahrzeugpools
- Auswertung der Tourdauern
- Auswertung der pro Tour gefahrenen Strecke
- Auswertung der Ladekapazitätsauslastung der Hänger
- Durchlaufzeiten der Bestellungen durch die verschiedenen Abwicklungsschritte (Tourbildung, Beladung, Routentransport)

Die Abb. 13.3 zeigt als Beispiel die Länge der pro Tour gefahrenen Strecke (jeweils Minimalwert, Mittelwert und Maximalwert aller Touren): in Experiment 3 wurden immer alle



**Abb. 13.3** Verkürzung der mittleren Fahrstrecke durch Abbruch der Route nach Abgabe des letzten Behälters

Stationen der Route angefahren, in Experiment 4 wurde nach Abgabe des letzten Behälters direkt zum Bahnhof zurückgefahren. Dadurch sinkt die durchschnittliche Fahrstrecke deutlich, und die Streckenlängen variieren stärker.

#### **13.4.4.3 Verhalten bei Anlagenstörungen**

Da es im betrachteten Beispiel bei einigen kritischen Umfängen erforderlich war, bereits vor der Entnahme des letzten Teils aus dem Behälter zu bestellen, wurde auch das Verhalten des Systems bei Betrachtung von Anlagenstörungen untersucht. Wenn der Routenzug einen Behälter abgeben wollte, obwohl der alte Behälter noch nicht leer war, wurde angenommen, dass der Fahrer die restlichen Teile in den neuen Behälter umpackt. Es sollte untersucht werden, wie oft dieser Fall eintritt und ob durch den zusätzlichen Zeitbedarf an anderer Stelle Engpässe verursacht werden.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass nur selten umgepackt werden muss und dies nicht die Versorgungssicherheit gefährdet.

---

### **13.5 Fazit**

Die durchgeführte Simulationsstudie zeigte, dass es möglich ist, mit der angedachten Planung die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Die ursprünglich geplanten Routen und damit das eingesetzte Personal konnten optimiert bzw. reduziert werden, sodass die geplanten Investitionskosten geringer ausfielen. Durch die verbesserte Routenführung verringerte sich die Wegstrecke der Routenzüge. Dies führt zu geringeren Wegeauslastungen und reduziert zudem noch Abnutzung und Energieverbrauch der Fahrzeuge. Zusammenfassend lässt sich daher feststellen, dass die Planung bereits vor Inbetriebnahme mittels der Simulation optimiert wurde und innovative Ideen ohne Risiko für die Produktion getestet werden konnten.

Wie an diesem Beispiel zu sehen ist, unterstützt die Ablaufsimulation im Bereich Logistik dabei, die komplexen und nicht mehr deterministischen Zusammenhänge zu erfassen und die Prozesse zu optimieren. Durch die beliebig eintreffenden Aufträge lassen sich mittels statischer Verfahren keine Züge zusammenstellen und keine festen Fahrtrouten erstellen. Ohne die Hilfe von Simulationsmodellen müssten die Logistikprozesse stark überdimensioniert werden.

Die Akzeptanz und Durchdringung der Belieferungssimulation in der Planung ist nach unserer Erfahrung in den letzten Jahren stark angestiegen. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass verstärkt Routenzüge anstatt Stapler eingesetzt werden, was die Komplexität der Planung deutlich erhöht.

---

### **Literatur**

- Klug F (2010) Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Springer, Berlin/Heidelberg  
VDA (2008) VDA-Empfehlung 5010: Standardbelieferungsformen der Logistik in der Automobilindustrie. Verband der Automobilindustrie, Frankfurt am Main



**Thorsten Sprock** Studium der Elektrotechnik an der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven (FHOOW) in Emden als duales Studium in Kooperation mit der Volkswagen AG am Standort Emden. Vertiefung im Studium in der Automatisierungstechnik und im Bereich der Ablaufsimulation. Seit 2009 zuständig für das Themenfeld Ablaufsimulation im Volkswagen Werk Emden mit Projektdefinition, Modellierung und Experimenten im Bereich Fertigung und Logistik.



**Dr. Frank Hilmer** Studium der Physik an der TU Braunschweig und der Universität Marburg, anschließend wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich Physik in Marburg. Dort 1996 Promotion auf dem Themengebiet der Simulation thermischer Solaranlagen. 1996–1998 Mitarbeiter in der Entwicklungsabteilung bei Wagner & Co Solartechnik. Seit 1998 Berater und Projektleiter bei der SimPlan AG, aktuell dort verantwortlich für die Wartung und Weiterentwicklung des Automotive Bausteinkastens des Verbands der Automobilindustrie (VDA).



# Einsatz der Ablaufsimulation in der Planung des Zentralen Ersatzteillagers der Porsche AG in Sachsenheim

# 14

Ulf Peters und Dirk Wortmann

## 14.1 Mit dem Unvorhersehbaren rechnen

Die Planung und Auslegung von Distributionszentren ist oftmals Gegenstand wissenschaftlicher Forschung wie die Beispiele Gu et al. (2010), Rouwenhorst et al. (2000) sowie Roodbergen und Vis (2009) zeigen. Um den Herausforderungen der Planung gerecht zu werden, spielt die diskrete ereignisorientierte Simulation (DES) eine Schlüsselrolle insbesondere zur Überprüfung und schrittweisen Optimierung von Planungskonzepten. Neben analytischen und heuristischen Methoden benennen Ashayeri und Gelders (1985) die DES als eine der drei Schlüsselmethoden zur Auslegung von Lagersystemen. Die systematische Analyse von Verfahren zur Planung von Lagersystemen von Baker und Canessa (2009) hebt die DES als wichtiges Werkzeug hervor. Dass die DES eine der weit verbreiteten und akzeptierten Methoden für die Auslegung von unterschiedlichen Materialflusssystemen ist, zeigt auch eine Umfrage von Smith (2003).

Für Porsche liegt daher aus mehreren Gründen nahe, die Simulation zur Evaluierung und Optimierung des Planungskonzepts zu verwenden. Neben der Prüfung der Machbarkeit eines Schleppzugeinsatzes statt fest installierter Fördertechnik muss auch dem schwankenden Auftragsvolumen Rechnung getragen werden. Wie man Abb. 14.1 entnehmen kann, schwankt die Anzahl der Auftragspositionen pro Tag stark. Diese Schwankungen resultieren im Wesentlichen aus dem unvorhersehbaren Teilebedarf. Diese Unvorhersehbarkeit und die erforderlichen kurzen Lieferzeiten erschweren den Planern die

---

U. Peters  
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Stuttgart, Deutschland

D. Wortmann (✉)  
SimPlan AG, Hanau, Deutschland  
E-Mail: [dirk.wortmann@simplan.de](mailto:dirk.wortmann@simplan.de)

<b>Das Porsche Ersatzteilzentrum im Überblick</b>	
Fläche:	170.000 m <sup>2</sup>
Anzahl Lagerplätze	Großteile: 30.000
	Mittelteile: 100.000
	Kleinteile: 300.000
Teilespektrum:	ca. 135.000
Anzahl Auftragspositionen pro Jahr:	ca. 4 Mio.
Anzahl Auftragspositionen pro Tag:	8.500 bis 23.000
Wareneingangsposten pro Jahr:	ca. 130.000
Mittlere Anzahl Lkw pro Tag:	160
Anzahl Mitarbeiter:	460
Investitionsvolumen:	> 100 Mio. Euro

**Abb. 14.1** Kennzahlen des Porsche Ersatzteilzentrums

Auslegung des neuen Zentralen Ersatzteillagers der Porsche AG, insbesondere da dieses Lager Porsche-Zentren sowie dezentrale Teilelager weltweit beliefern soll. Die zunehmenden Verkaufszahlen und wachsende Modellvielfalt erhöhen die Komplexität zusätzlich. Damit geht nicht nur ein Anstieg der Umschlagsmenge, sondern auch die Erweiterung des Teilespektrums einher.

Um dieses Verhalten in einem Simulationsmodell möglichst wirklichkeitsgetreu nachzubilden, werden für das Modell reale Auftragsdaten verwendet. Die Idee ist hierbei, die Ist-Daten des letzten Jahres auf das zukünftig erwartete Volumen zu extrapolieren. Dazu werden drei Kennzahlen definiert, und zwar der erwartete Zuwachs an Auftragspositionen, an Teilemenge sowie an Teilenummern in Prozent gegenüber den letzten vorliegenden Ist-Daten. Daraufhin werden die Auftragsdaten von drei kritischen Monaten des Vorjahres ausgewählt. Diese Daten werden auf Basis der Zuwachsraten extrapoliert. Der eigens dafür implementierte Auftragsdatengenerator führt die Extrapolation in zwei Schritten durch: Zunächst werden Auftragspositionen zufällig ausgewählt, kopiert und mit einer neuen Auftrags- und Positionsnummer versehen. Die zufällige Auswahl führt zu einer unregelmäßigen Zunahme des Tagesvolumens. Das entspricht nach Einschätzung der Planer der Realität. Im zweiten Schritt werden die neuen Auftragspositionen in Bezug auf Teilenummer und Menge systematisch verändert. Wie viele Auftragspositionen tatsächlich neue Teilenummern und geänderte Mengen bekommen oder nur eins von beiden, orientiert sich am Delta zur Prognose. Da keine genauen Prognosen darüber vorliegen, wie sich die Erweiterung des Teilespektrums auf die verschiedenen Teiletypen (Groß-, Mittel- und Kleinteile) auswirkt, wird dies zufällig ermittelt. Dazu werden die Teilestammdaten unter Beibehaltung der prozentualen Teiletypverteilung um eine bestimmte Anzahl an neuen Teilen erweitert. Muss also eine neue Teilenummer einer Auftragsposition zugewiesen werden, wird per Zufallsgenerator ein neues Teil aus den Stammdaten ausgewählt.

Mit Hilfe dieses Verfahrens werden verschiedene Szenarien zur Abbildung unterschiedlicher Prognosen erzeugt. Die Länge des betrachteten Zeitraums stellt sicher, dass das Verhalten der Anlage unter stark abweichenden Tagesvolumen und Auftragsstrukturen untersucht werden kann.

## 14.2 Das Konzept absichern

Dass sich Porsche in einer so frühen Phase, also bereits in der Konzeptfindung, für die Durchführung einer Simulation entscheidet, ist einerseits geprägt vom Wissen über die Abhängigkeit der Anlagenleistung von den zukünftigen Auftragsstrukturen. Andererseits soll im Unterschied zum alten Ersatzteillager ein Routenzugkonzept zum Einsatz kommen. Dieses Konzept bietet diverse Vorteile, ist aber aufgrund der erwarteten hohen Anlagendynamik mit klassischen planerischen Mitteln nicht verlässlich auszulegen. Eine Simulation kann deshalb die Planer in der Festlegung der Routen als auch in der Ermittlung der erforderlichen Anzahl an Fahrzeugen und Anhängern unterstützen. Zeigt die Simulation, dass dieses Konzept den Anforderungen nicht gerecht werden kann, so bleibt die Möglichkeit, auf eine Fördertechniklösung zu wechseln.

Abb. 14.2 zeigt das Prinzip des geplanten Routenzugkonzepts. Die Schleppzüge sollen den Transport der einzulagernden Teile aus dem Wareneingang in die vorgesehenen Lagerbereiche sowie der kommissionierten Teile zum Warenausgang übernehmen. Zusätzlich müssen Verpackungsmaterial und Ladungsträger transportiert werden.

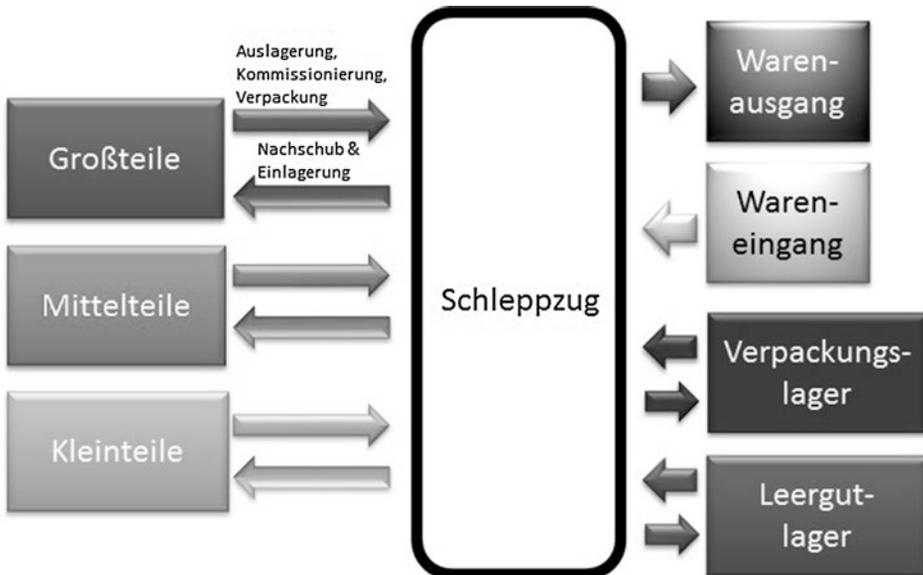


Abb. 14.2 Prinzipielles Prozesskonzept



**Abb. 14.3** Ermittlung Ladeeinheiten

Dieses zunächst trivial aussehende Konzept entpuppt sich bei genauerem Hinsehen als komplexer Ablauf. Die Komplexität resultiert zum einen aus dem konkreten Lagerlayout. Zu den Lagerbereichen für die langsam drehenden Mittel- und Großteile muss eine große Entfernung überwunden werden. Im Wareneingangs- und im Versandbereich hingegen steht nur ein begrenzter Platz für das Be- und Entladen von Schlepplzügen zu Verfügung. Zum anderen müssen für jede Stufe im Prozess die zu bewegenden Kolli bzw. Ladeeinheiten ermittelt werden. Am Beispiel des Warenausgangs soll das Problem verdeutlicht werden:

Abb. 14.3 zeigt den Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Einheiten zwischen der Kommissionierung und dem Versand. Eine Auftragsposition mit beispielsweise acht Stück vom Typ Großteile entspricht acht sogenannten Greif-Kolli. Im Falle der Großteile entspricht ein Greif-Kollo einem Versand-Kollo. Jeweils vier Versand-Kolli ergeben eine Transporteinheit. Für Großteile gilt zudem, dass eine Transporteinheit auch einem Routenzuganhänger entspricht. Daraus ergeben sich demzufolge zwei Anhänger. Je nach Teile- und Auftragsyp sind Faktoren zwischen den einzelnen Einheiten definiert.

Diese Faktoren werden im Rahmen der Simulationsstudie mehrfach angepasst. Es lässt sich leicht ableiten, welcher signifikanten Einfluss sie auf das Simulationsergebnis haben, denn der eigentliche Bedarf an Anhängern entscheidet letztlich über die Umsetzbarkeit des Schlepplzugkonzepts. Trotzdem ist es erforderlich, diese Faktoren zumindest auf Teiletyp-Ebene zu vereinheitlichen. Ein Runterbrechen auf die einzelne Teilenummer ist allerdings aus folgenden Gründen nicht sinnvoll:

- Einzelne Teile werden beim Zusammenpacken in eine Transporteinheit ineinander verschachtelt, so dass das Quadermaß des Einzelteils nicht für die Volumenberechnung genutzt werden kann.
- Für die neuen Teile liegen noch keine Maße vor.
- Möglicherweise kann der Packer das Volumen eines Anhängers nicht optimal ausnutzen.

Demzufolge ist es erforderlich, eine geeignete Annahme für jeden Teiletyp zu treffen. Die Kleinteile bilden hier aufgrund der so stark abweichenden Abmaße der Teile untereinander eine Ausnahme. Die Anzahl der Greif-Kolli (Kleinladungsträger – KLT) werden in der Simulation über eine Volumenberechnung ermittelt. Dabei wird ein 80 %iger Nutzungsgrad eines KLT zugrunde gelegt.

### 14.3 Die Vielfalt der Routen

Da die Kommissionierung als Transportquelle dient, reicht eine grobe Abbildung. Das heißt, die Transportquelle erzeugt in der korrekten zeitlichen Verteilung, am richtigen Ort und in der richtigen Menge Transportgüter. Eine intelligente Auftragsstartstrategie stellt

sicher, dass Expressaufträge erst zum spätestmöglichen Zeitpunkt eingelastet werden. Werden die Aufträge zu früh gestartet, belasten sie die Bereitstellfläche im Versand unnötig. Kommen sie zu spät, können sie eventuell erst am Folgetag das Ersatzteilzentrum verlassen. Hierzu muss die sogenannte Warenausgangssollzeit eingehalten werden. Diese Zeit liegt eine Stunde vor der Lkw-Abfahrtszeit. In der Simulation ist also eine Strategie zu ermitteln, die bei minimaler Aufenthaltszeit im Versand eine 100 %ige Lieferbereitschaft gewährleistet. Dazu wird ein Zeitparameter eingeführt, der ein Delta zur Warenausgangssollzeit und somit den Startzeitpunkt für die Expressaufträge definiert.

Im Unterschied zu Expressaufträgen können Volumenaufträge flexibel über den Tag eingelastet werden. Volumenaufträge sind üblicherweise Nachschubaufträge in dezentrale Ersatzteillager. Diese Aufträge sollen deshalb zur Sicherstellung einer guten Auslastung der Anlage als sogenannte „Lückenfüller“ in schwachen Lastphasen ausreichend Transportaufkommen für die Schleppzüge generieren. Hier liegt demnach die eigentliche Herausforderung für die Auftragsstartstrategie, die für die einzelnen Lagerbereiche und Routen die Arbeitslast auf einem möglichst konstanten Niveau halten soll. Dazu wird ein Schwellwert für die Ziellast über die Anzahl in Bearbeitung befindlicher Auftragspositionen festgelegt. Solange die Anzahl gestarteter Auftragspositionen unter diesem Schwellwert liegt, werden kontinuierlich weitere Auftragspositionen gestartet.

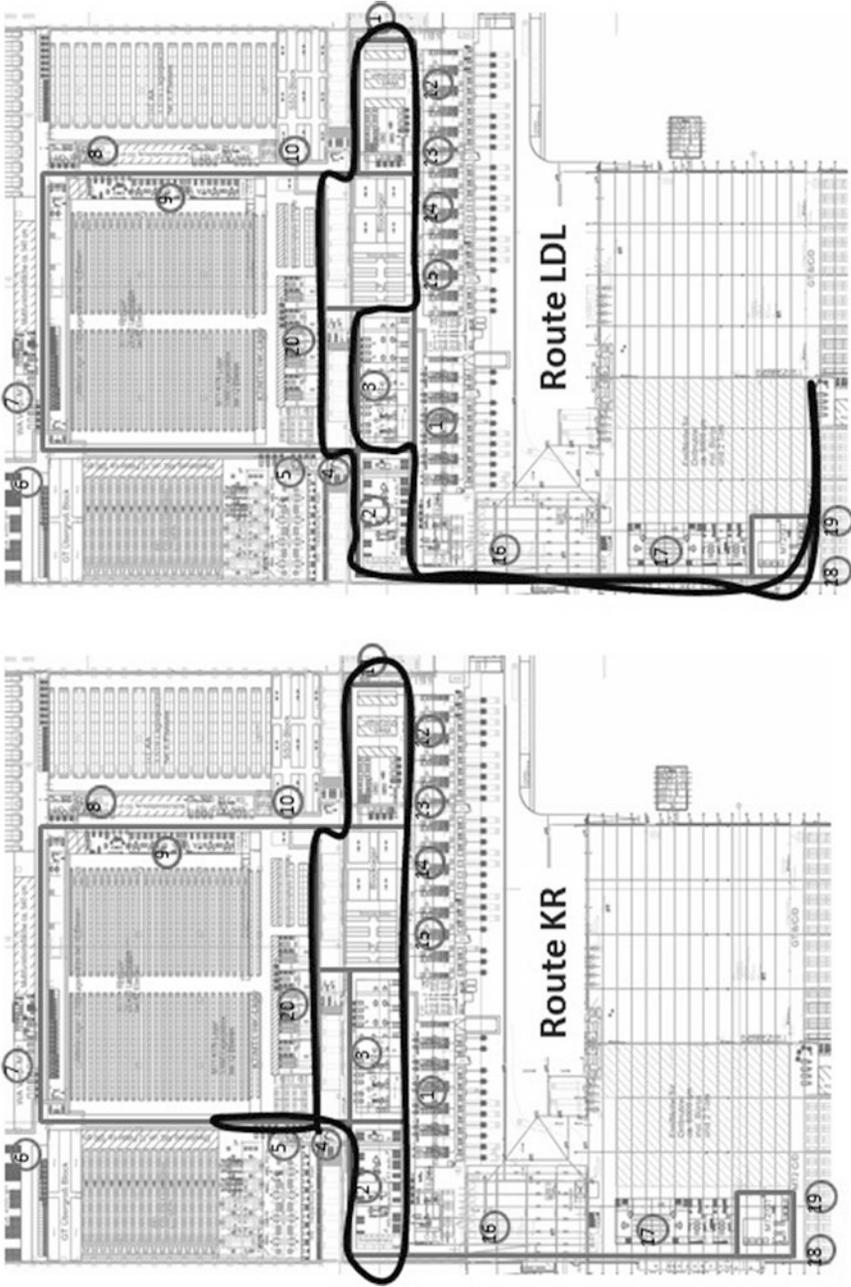
Die in Personalanzahl und Zeitbedarf pro Auftragsposition parametrierbare Kommissionierung erzeugt die Greif-Kolli. Ein Teil der Aufträge wird mit einer sogenannten Ursprungslandkennzeichnung (UKZ) versehen. In der Simulation wird hierfür eine prozentuale Verteilung hinterlegt. Die entsprechenden Auftragspositionen werden zufällig ausgewählt. Danach werden die Aufträge verpackt und in Transporteinheiten für den Schleppzug bereitgestellt.

Die Experimente zeigen, dass aufgrund der Schwankungen der Auftragslast sowie der zufälligen Verteilung der UKZ der planerisch ermittelte Personalbedarf nach oben korrigiert werden muss.

Des Weiteren ist die Festlegung der Routen ohne die Überprüfung im Simulationsmodell nicht verlässlich machbar. Der erste pragmatische Ansatz ist eine Aufteilung nach Lagerbereichen und erwartetem Transportaufkommen. Das heißt, für jeden Haltepunkt bzw. Bahnhof werden die erwarteten Transporteinheiten pro Stunde ermittelt. Die anzu-fahrenden Bahnhöfe werden dann so kombiniert, dass höchstens 80 % der maximalen Transportkapazität pro Route sowie eine möglichst schlüssige und effiziente Routenführung erreichbar sind. Die Simulation soll zeigen, ob die Schwankungen aufgefangen werden können.

Abb. 14.4 zeigt zwei Beispiele für Routen. Zudem sind das Lagerlayout, die Bahnhöfe (jeder Kreis repräsentiert einen Bahnhof) sowie die verfügbaren Fahrwege (grau markierte Wege) dargestellt. „KR“ steht für Kleinteilroute und „LDL“ für Logistikdienstleister.

Mit den ersten Simulationsergebnissen zeigt sich jedoch, dass sich erhebliche Bestände in den Bahnhöfen aufbauen. Zudem kann die Warenausgangssollzeit nur unzureichend eingehalten werden. Die Realisierung dieses zunächst vernünftig erscheinenden Konzepts hätte eine lange Zeit des Experimentierens und diverse Prozessänderungen erfordert, bis die für die Abwicklung von Spitzenlasten erforderliche Systemleistung erreicht worden wäre.



**Abb. 14.4** Beispiel für zwei Routen

Im Simulationsmodell werden daraufhin über mehrere Optimierungsschritte hin mehr als 30 Experimente durchgeführt. Im ersten Teil der Optimierung sind die Reduzierung der Bestände an den Bahnhöfen und eine bessere Balancierung der Transportlasten zwischen den Routen, möglichst ohne die Effizienz in der Routenführung aufzugeben, Betrachtungsgegenstände. Danach steht die Einhaltung der Warenausgangssollzeit im Fokus. Einige wichtige Erkenntnisse sind:

- Die Kombination von verschiedenen Transportströmen ist nicht sinnvoll. Deshalb werden die Routen nach Wareneingangs-, Warenausgangs- und Leergut-Routen unterschieden.
- Ein zusätzlicher Fahrweg ist vorzusehen, um Wareneingang und Warenausgang besser zu entkoppeln.
- Der fallweise Einsatz einer Spitzenlastroute wirkt sich sehr positiv aus.
- Für die Schleppzüge muss im Bereich des Warenausgangs mehr Fläche bereitgestellt werden, um eine möglichst parallele Entladung mehrerer Züge realisieren zu können und eine gegenseitige Blockierung zu unterbinden.
- Auftragspositionen aus Lagerbereichen mit geringerer Routenfrequenz sind früher zu starten, um eine Verspätung zu vermeiden.

Abb. 14.5, 14.6 und 14.7 zeigen die typischen Kennzahlen, die zur Beurteilung eines Simulationsergebnisses verwendet werden.

Wie in Abb. 14.7 zu erkennen ist, wird bei der Beurteilung der Verspätung zwischen Express- und Volumenaufträgen unterschieden. Während eine Verspätung von Volumenaufträgen in geringem Umfang akzeptabel ist, sollen Expressaufträge das Ersatzteilzentrum pünktlich

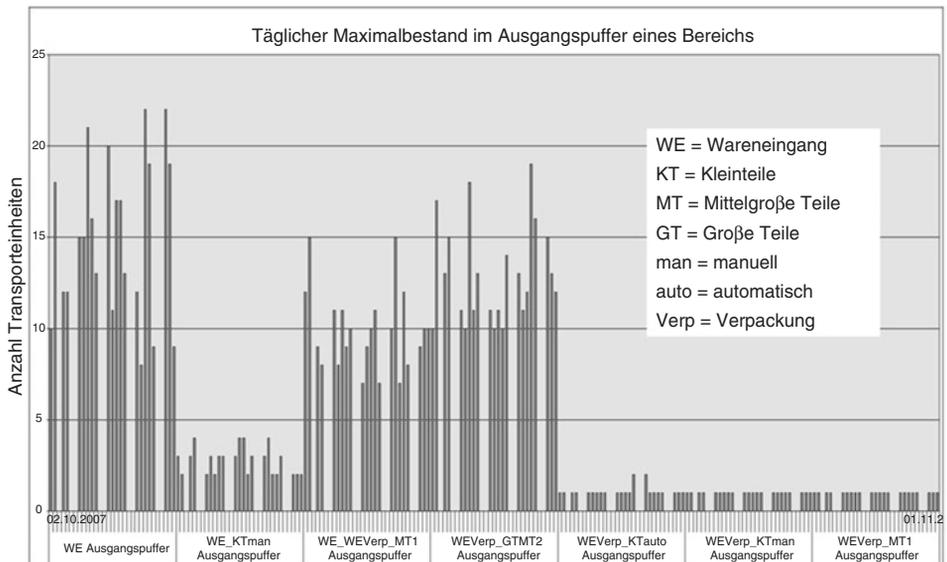


Abb. 14.5 Bestand an einem Transportbahnhof am Beispiel Wareneingang

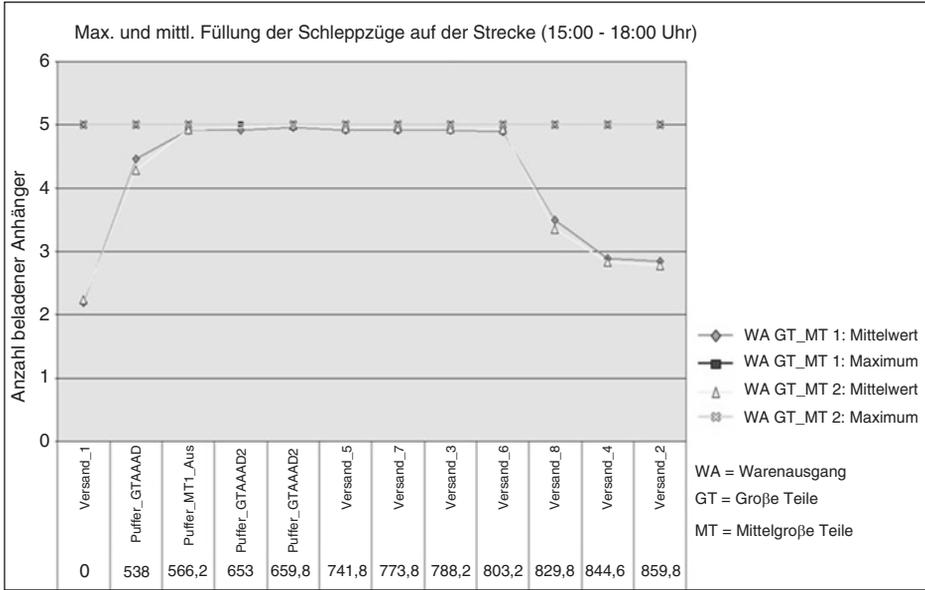


Abb. 14.6 Auslastung Schleppzug

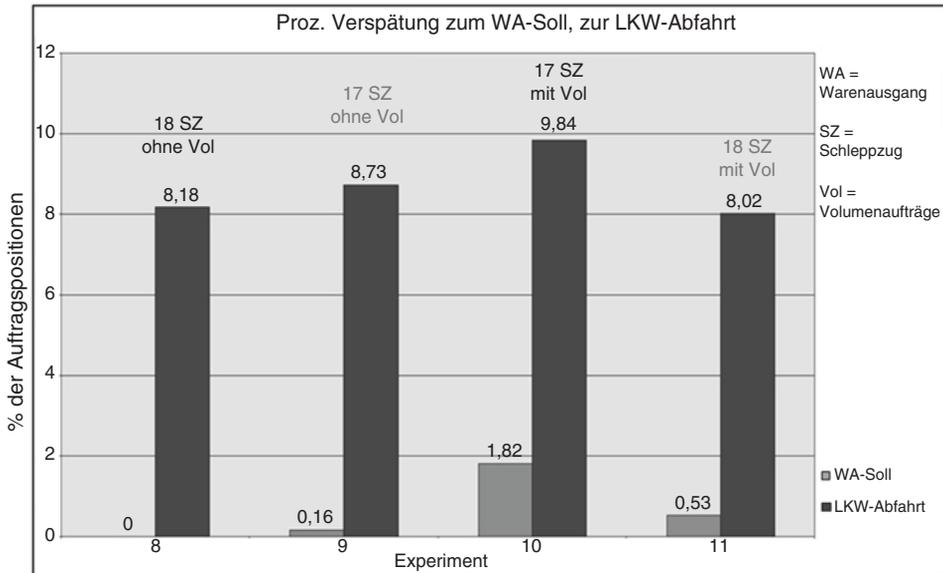


Abb. 14.7 Anteil der verspäteten Auftragspositionen

verlassen. Zugunsten eines geringeren Bestands im Warenausgang wird jedoch eine Überschreitung der Warenausgangssollzeit toleriert, wenn trotzdem die Lkw-Abfahrtszeiten eingehalten werden können.

Mit 18 Schleppzügen auf 12 Routen wird schließlich eine 100 %ige Liefertreue der Expressaufträge gegenüber der Lkw-Abfahrtszeit erreicht. Mit zwei Schleppzügen mehr liegt die Verspätung der Volumenaufträge bei nur noch 0,7 %. Mit diesem Ergebnis können der erste Schritt der Simulation erfolgreich abgeschlossen und ein wirtschaftliches Schleppzugkonzept bestätigt werden.

---

## 14.4 Die Unterschiede in der Kleinteiligkeit

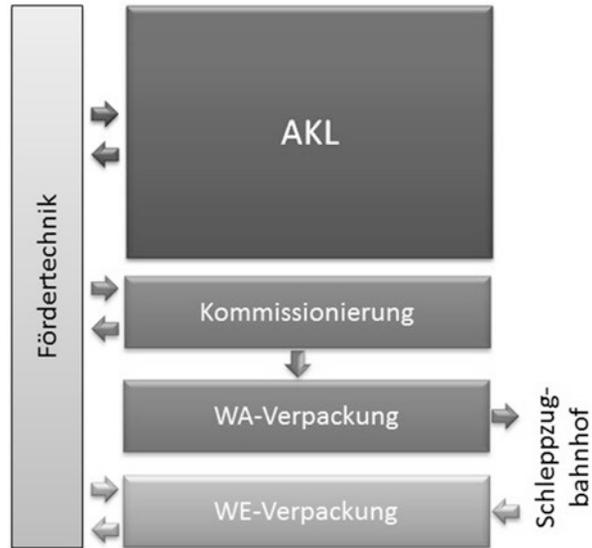
Für die Kommissionierung der Kleinteile ist der Einsatz eines automatischen Kleinteilelagers (AKL) geplant. Während die erforderliche Lagerkapazität rechnerisch ermittelt werden kann, soll das vorhandene Simulationsmodell verwendet und detailliert werden, um die Anforderungen an die Lagerleistung und Kommissionierung zu bestimmen. Diese Ergebnisse sind die Grundlage für die Ausschreibung. Sobald die Angebote und Konzepte der potenziellen Lieferanten vorliegen, wird die Simulation an die infrage kommenden Konzepte angepasst, um so eine direkte technische Vergleichbarkeit zu erreichen.

Ein Planungsunternehmen entwickelt für Porsche ein erstes Konzept, das als Grundlage für die Simulation dient. Auf Basis erster Hochrechnungen wird die Anzahl der erforderlichen Gassen ermittelt, um die notwendige Ein- und Auslagerleistung sicherzustellen. Diese Hochrechnungen ergeben, dass das AKL horizontal ausgerichtet sein musste, um die notwendige Gassenanzahl im gegebenen Baufenster unterzubringen. Wie Abb. 14.8 zeigt, muss die Kommissionierung hingegen südlich zum AKL angeordnet werden. Folge dieses Layouts ist eine lange Fördertechnikbindung der Kommissionierung und des Wareneingangs.

Die detaillierte Kleinteilekommissionierung direkt in das Gesamtmodell zu integrieren, ist von Anfang an keine betrachtete Option. In der Routenzugsimulation wird bereits über verschiedene Experimente nachgewiesen, dass Schwankungen im Transportaufkommen der Kleinteile bewältigt werden können. Es wird deshalb ein separates Modell aufgebaut, in das die generierten Auftragsdaten nach Kleinteilen gefiltert übernommen werden. Im Unterschied zur ersten Simulation ist diesmal die Ankunftszeit der Kleinteile im Schleppzugbahnhof das entscheidende Kriterium.

Die Auftragsstartstrategie stellt sicher, dass die Zeitvorgabe für alle Auftragspositionen eingehalten wird und dabei die Kommissionierplätze gleichmäßig ausgelastet werden. Um zu ermitteln, welche Positionen eines Auftrags an den gleichen Kommissionierplatz geschickt werden müssen, wird in die Simulation eine vereinfachte Berechnung der benötigten Versandkartons für einen Auftrag integriert. Alle Teile, die dem gleichen Versandkarton zugewiesen sind, müssen demzufolge auch am gleichen Kommissionierplatz bearbeitet werden. Die verschiedenen Versandkartons eines Auftrags können jedoch auch an verschiedenen Plätzen bearbeitet werden. Ob die Verteilung der Versandkartons eines Auftrags auf

**Abb. 14.8** Konzeptlayout  
geplante  
Kleinteilekommissionierung



verschiedene Plätze sinnvoll ist, ist ein Untersuchungsziel der Simulation. Insbesondere wenn Teile derselben Sachnummer auf mehrere Versandkartons verteilt werden, kann das zur Folge haben, dass die Lagerbehälter innerhalb der Kommissionierung weitergereicht werden müssen. Alternativ können, wenn im Bestand vorhanden, mehrere Lagerbehälter derselben Sachnummer ausgelagert werden. Die negativen Auswirkungen auf den Bestand (mehrere Anbruchbehälter) und nachfolgend auf die Lagerleistung sollen mit der Simulation aufgezeigt werden.

Als ein vorher unterschätztes Problem erweist sich in den Experimenten die erforderliche Größe des Sequenzpuffers am Kommissionierplatz. Aufgrund der langen Fördertechnikanbindung müssen parallel sehr viele Aufträge gestartet werden, da anders keine kontinuierliche Versorgung der Kommissionierplätze möglich ist. Die kontinuierliche Auslastung ist aber entscheidend für die Erreichung des geforderten Durchsatzes. Die Größe des Lagers und die unterschiedliche Zeit, die z. B. ein Behälter aus der nördlichsten Gasse gegenüber den Behältern aus der südlichsten Gasse bis zur Kommissionierung benötigt, führt dazu, dass die am Kommissionierplatz ankommenden Behälter gepuffert werden müssen. Es können jeweils nur die Teile dem Kommissionierplatz zugeführt werden, die für die aktuell bearbeiteten Versandkartons benötigt werden. Alle anderen Teile müssen im Sequenzpuffer warten. Um die Anforderungen an die Größe des Sequenzpuffers nicht zu erhöhen, wird eine Weitergabe von Behältern zwischen den Plätzen nicht zugelassen. Stattdessen werden alle Versandkartons eines Auftrags mit sich überschneidenden Teilenummern an einem Kommissionierplatz bearbeitet.

Trotz aller Optimierungsbemühungen ist das Ergebnis der Simulation, dass in diesem Konzept ein Sequenzpuffer von mindestens 80 Plätzen pro Kommissionierplatz erforderlich ist, um den Durchsatz und die Zeitvorgaben einzuhalten. Diese Ergebnisse finden Eingang in die Ausschreibung.

Die eingereichten Angebote mit interessanten Konzepten werden einer Prüfung durch die Simulation unterzogen. Weichen die Konzepte nur marginal von der Ursprungsplanung ab, so können die Ergebnisse innerhalb weniger Tage erzeugt werden. In vielen Fällen ist die Fördertechnik an den jeweiligen Layoutvorschlag anzupassen. Doch in einem Punkt sind sich alle Lieferanten einig – die Sequenzpuffer können in dem geforderten Umfang nur schwer umgesetzt werden. Das hat einerseits preisliche, andererseits aber auch technische Gründe. Eine einfache Pufferlösung hat den Nachteil einer zu geringen Ein-/Auslagerleistung. Eine performante und große Lösung treibt den Preis in die Höhe.

Daher werden verschiedene Alternativen wie beispielsweise das Zusammenlegen von Sequenzpuffern mehrerer Kommissionierplätze vorgelegt. Allerdings wird in der Simulation schnell nachgewiesen, dass, mit einer Ausnahme, keine der vorgeschlagenen Lösungen wirklich tragfähig ist. Die Ausnahme bildet das Konzept der Firma Witron. Die Witron-Ingenieure stellen das Gesamtkonzept in Frage und legen ein grundsätzlich geändertes Layout auf den Tisch, in dem das AKL um 90 Grad gedreht ist, so dass die Auslagerung direkt in Richtung der Kommissionierung erfolgen kann. Um aufgrund der geringeren Gassenanzahl trotzdem die erforderliche Lagerleistung bereitzustellen, werden schnellere Regalbediengeräte eingesetzt. Damit entfällt der große Sequenzpuffer als Engpass und Preistreiber. Zwar muss nach wie vor ein Sequenzpuffer installiert werden. Die Simulation zeigt jedoch, dass er kleiner sein kann und das Konzept sogar noch Leistungsreserven aufweist.

Für Porsche sind die vorliegenden Simulationsergebnisse eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die Auswahl des Lieferanten, die Systemauslegung und für die Definition der Steuerungsstrategien. Damit kann die Simulation einen wichtigen Beitrag dazu leisten, dass die Kunden in der Regel innerhalb von 24 Stunden ihre Ersatzteile erhalten.

---

## Literatur

- Ashayeri J, Gelders LF (1985) Warehouse design and optimization. *Eur J Oper Res* 21:285–294
- Baker P, Canessa M (2009) Warehouse design: a structured approach. *Eur J Oper Res* 193:425–436
- Gu J, Goetschalckx M, McGinnis LF (2010) Research on warehouse design and performance evaluation: a comprehensive review. *Eur J Oper Res* 203:539–549
- Roodbergen KJ, Vis IFA (2009) A survey on literature on automated storage and retrieval systems. *Eur J Oper Res* 194:343–362
- Rouwenhorst B, Reuter B, Stockrahm V, van Houtum GJ, Mantel RJ, Zijm WHM (2000) Warehouse design and control: framework and literature review. *Eur J Oper Res* 122:515–533
- Smith JS (2003) Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *J Manuf Syst* 22:157–161



**Ulf Peters** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens mit der technischen Fachrichtung Maschinenbau an der TU Darmstadt (1993–1999). Langjährige Projekterfahrung in der Automobilindustrie mit Schwerpunkt Produktion/Logistik als Senior-Berater bei der intra-Unternehmensberatung GmbH sowie als Projektleiter Logistik bei der Robert Bosch GmbH. Seit 2007 bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG zunächst als Projektleiter Logistik im Rahmen des Aufbaus des neuen Standorts Sachsenheim und seit 2013 als Leiter Lagerorganisation.



**Dirk Wortmann** Nach seinem Abschluss als Fachinformatiker Entwicklung von Simulationssoftware sowie Durchführung von Simulationsstudien in einem Frankfurter Ingenieurbüro. Seit 1991 selbstständig und seit Gründung der Firma SimPlan im Jahr 1992 bis 2013 Mitglied der Geschäftsleitung/des Vorstandes. Seit 2010 Managing Director der SimPlan Tochtergesellschaft in Shanghai/China sowie Verantwortlicher für das Asien-Geschäft der SimPlan AG.



# Herausforderungen bei der Dimensionierung eines zentralen Entkopplungsmoduls in der Variantenfließfertigung und Darstellung eines selbstregulierenden Kreislaufsystems für Transportmittel

Mareike Müller und Ulrich Burges

## 15.1 Problemstellung

In der Automobilindustrie ermöglichen flexible Fertigungslinien dem steigenden Kundenwunsch nach individuell konfigurierbaren Fahrzeugen nachzukommen. Durch die Anwendung der Auftragsfertigung (Built-to-Order-Strategie) und frühzeitiger Festlegung der Fertigungsreihenfolge nach dem Perlenkettenprinzip kann dem Kunden bereits bei Bestellung ein Liefertermin zugesagt werden (Gunasekaran und Ngai 2005; Kelkar et al. 2014; Meißner et al. 2008; Weyer 2002).

Eine feste Fertigungsfolge nach dem Perlenkettenprinzip ab der Auflage des Auftrags im Karosseriebau bis zur Übergabe an die Fahrzeugmontage ermöglicht die Umsetzung von bedarfs- und reihenfolgesynchronen Anlieferungsstrategien. Grundlagen hierfür sind eine stabile Produktion und ein einheitlicher Materialfluss in den Gewerken. Beides gewährleistet, dass das benötigte Material immer zur rechten Zeit zur Verfügung steht. Daraus ergeben sich geringe Werkstückdurchlaufzeiten und niedrige Lagerbestände (Kuhn 1997). Die Bereitstellung der lackierten Karosserie wird dabei de facto wie ein reihenfolgesynchrones Teil (Just in Sequence) behandelt.

Die Ausrichtung der internen sowie externen Logistik- und Lieferantenprozesse auf die geplante Fertigungsreihenfolge erfordert eine hohe Prozessstabilität. Aufgrund stochastischer Prozesszeiten, verursacht durch Maschinenausfall, Nacharbeit, Fahrzeugsperrung (Qualität, Logistik, Fehlteile) und ausgelagerten Fertigungsprozessen, kommt es zu

---

M. Müller  
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Stuttgart, Deutschland

U. Burges (✉)  
SimPlan AG, Hanau, Deutschland  
E-Mail: [ulrich.burges@simplan.de](mailto:ulrich.burges@simplan.de)

Blockierungen im Prozessfluss. Dies mindert die Prozessstabilität und führt zu einer Reduzierung der Ausbringungsmenge (Meißner 2009). Eine Einheit ist blockiert, falls ein fertig bearbeiteter Auftrag die Station nicht verlassen kann, weil der nachfolgende Puffer belegt ist. Von Ausbremsen wird gesprochen, wenn eine Station nicht arbeiten kann, weil keine Aufträge im vorgelagerten Puffer vorhanden sind. Durch die gezielte Allokation eines zentralen Entkopplungsmoduls lassen sich diese Effekte zumindest zwischen den Gewerken reduzieren (Manitz 2004). Folglich besteht also ein Zielkonflikt zwischen erhöhten Bestandskosten durch zusätzliche Puffer und erreichbarer Ausbringungsmenge (Volumenstabilität).

Aufgabe des Entkopplungsmoduls ist neben der Wiederherstellung der geplanten Sequenz in der Fahrzeugmontage (Reihenfolgestabilität) und der Gewährleistung der Volumenstabilität im Prozessfluss der Ausgleich der asynchronen Schichtmodelle in den Gewerken (Glättung).

Zur Abbildung dieser Problemstellung wird eine Simulation des Produktionsverbundes (Karosseriebau, Lackiererei, Montage) durchgeführt, da sich die Anwendung der ereignisdiskreten Simulation im Produktionsumfeld zur Überprüfung von Planungsergebnissen seit Jahren etabliert hat (Spieckermann 2005).

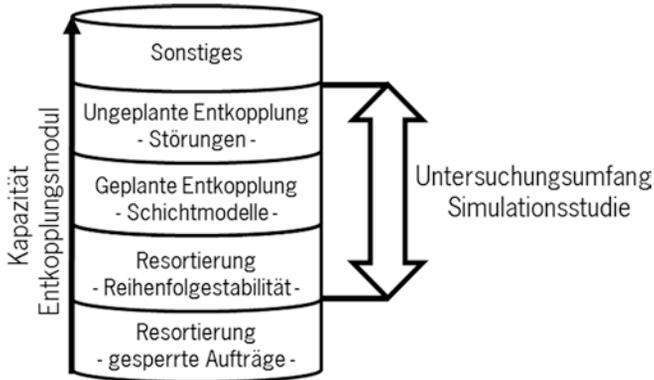
---

## 15.2 Zielsetzung der Simulationsstudie

Initiale Fragestellung und Zielgröße der Simulationsstudie ist die Dimensionierung eines zentralen Entkopplungsmoduls. Deduktiv lässt sich der Wirkungszusammenhang zwischen Eingangs- und Zielgröße nicht ermitteln, da sich die Effekte auf die Zielgröße nicht auf den Einfluss einzelner Eingangsgrößen zurückführen lassen. Rein analytische Modelle sind aufgrund der Komplexität des Realsystems nicht hinreichend. Für reale Beobachtungen müsste ein Entkopplungsmodul gebaut werden; dies ist zu teuer, zeitaufwendig und die Erweiterung der Infrastruktur ist im laufenden Betrieb nicht abbildbar. Die Ablaufsimulation ist eine geeignete Methode, um den tatsächlichen Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Zielgrößen aufzuzeigen und kritische Einflussfaktoren zu identifizieren. Eine Herausforderung ist dabei das Treffen von passenden Modellierungsannahmen und die Reduktion der Komplexität auf ein geeignetes Niveau. Die Abstraktionstiefe spielt hierbei eine wichtige Rolle. So hat in der Simulation die Funktionalität der einzelnen Rollenbahnen und Umsetzer der verbindenden Förderstrecken einen kritischen Einfluss auf das Simulationsergebnis; sie werden deshalb detailliert abgebildet. Bei den Gewerken Karosseriebau, Lackiererei und Montage sind hingegen nur die Verwirbelungsprofile und Ausbringungsdaten relevant, sie werden im Modell als Blackbox modelliert.

Bevor die inhaltlichen Details des Modells definiert werden, muss die initiale Fragestellung in ein durch eine Simulationsstudie erreichbares Erkenntnisziel überführt werden.

In dem betrachteten Fallbeispiel wird zur Umsetzung einer Fertigungskapazitätserhöhung die Dimensionierung der Entkopplungspuffer zwischen den Gewerken Karosseriebau und Lackiererei sowie Lackiererei und Montage neu geplant. Die wichtigsten Prämissen sind dabei die Aspekte Prozessstabilität und Stabilität der Fertigungsreihenfolge. Die Planung der



**Abb. 15.1** Aufteilung der Kapazitäten im Entkopplungsmodul

Fertigungsreihenfolge orientiert sich an vielfältigen Restriktionen der Produktion. Primär wird dazu die Montagesequenz festgelegt, wobei zahlreiche Mengen- und Abstandsrestriktionen zu beachten sind. Ergebnis ist eine montagegerechte Planreihenfolge, die sich in einer gleichmäßigen Verteilung aller Ausstattungsmerkmale ausdrückt.

Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Durchlaufzeiten je Fahrzeugtyp und Fahrzeugausstattung weicht die Fertigungssequenz im Karosseriebau und in der Lackiererei von der Sequenz bei der Fahrzeugmontage ab. Das Entkopplungsmodul stellt sicher, dass die erste Plansequenz in nachfolgende Plansequenzen überführt werden kann; es erfolgt eine Umsortierung bzw. Anpassung der Fertigungsreihenfolgen. Darüber hinaus dient es dazu, die produktionsbedingten Verwirbelungseffekte zu beheben.

Die Simulationsstudie eignet sich dazu, eine möglichst gute Dimensionierung des Entkopplungsmoduls zu ermitteln. Abb. 15.1 stellt den Untersuchungsumfang dar.

Zusätzlich wird das Konzept zur Versorgung der Gewerke mit Transportskids (T-Skids) überprüft und ein Steuerungskonzept für den Leerskidkreislauf entwickelt.

Neben dem Planverlauf werden folgende Szenarien simulativ untersucht:

- unterschiedliche Ausbringungen durch kürzere Taktzeiten,
- unterschiedliche Schichtmodelle in den einzelnen Gewerken,
- reale Störungen,
- Gegenmaßnahmen in den Gewerken.

Die Ergebnisse der Simulation dienen dazu, die aktuellen Planungen zu bestätigen oder diese mit konkreten Änderungsvorschlägen zu verbessern.

Im Einzelnen soll die Simulationsstudie folgende Anforderungen abbilden:

- Im Entkopplungsmodul sind stets so viele Karosserien vorhanden, dass geplante Sequenzabweichungen und Verwirbelungen zwischen Karosseriebau, Lack und Montage bis zu einem definierten Grad durch eine Re-Sequenzierung ausgeglichen werden können.

- Bei der Re-Sequenzierung ist nur das prozessbedingte Vorziehen der gesamten Perlenkette möglich. Ein einzelner Vorgriff in der Plansequenz ist nicht zulässig.
- Der Karosseriebau kann in allen drei Schichten Karosserien an das Entkopplungsmodul abgeben (keine Überfüllung des Speichers mit nicht lackierten Karosserien).
- Die Lackieranlage wird pünktlich mit den richtigen Karosserien beliefert (kein Leerlaufen der nicht lackierten Karosserien im Entkopplungsmodul).
- Die Lackieranlage kann die lackierten Karosserien gemäß Plan an die Montage abgeben (keine Überfüllung des Speichers mit lackierten Karosserien).
- Die Montage wird taktgenau mit den richtigen Karosserien beliefert (kein Leerlaufen der lackierten Karosserien im Speicher).
- Es sind immer ausreichend Transportskids vorhanden, um die Rohkarosserien und lackierten Karosserien vom oder zum Entkopplungsmodul zu transportieren.

Neben diesen Grundprämissen werden zur Definition des Anforderungsprofils der Simulationsstudie folgende Fragen formuliert:

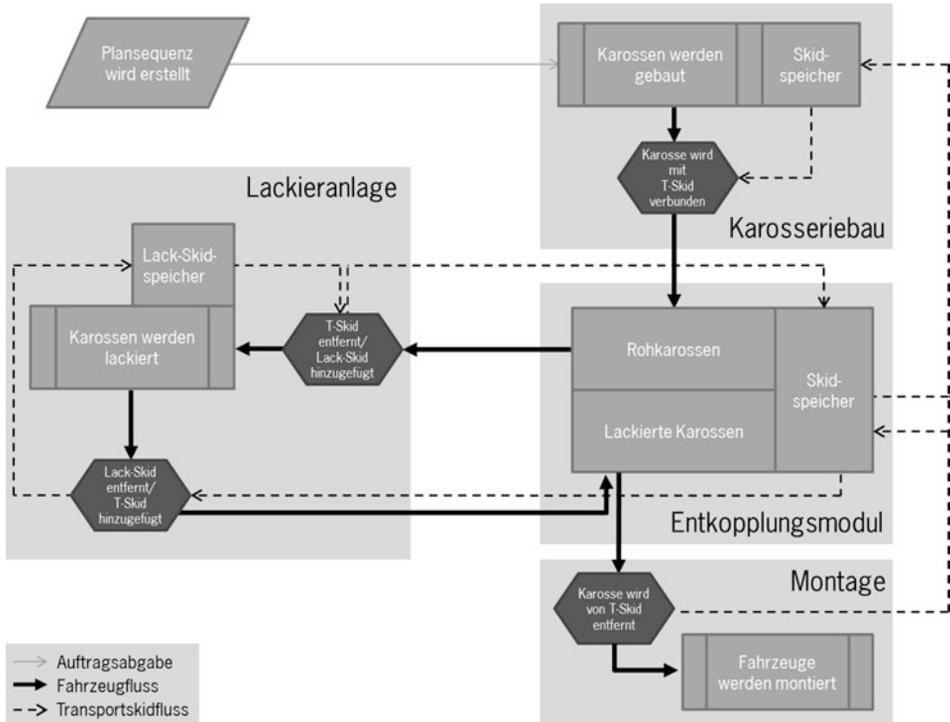
1. Wie groß muss ein Entkopplungsmodul dimensioniert werden, um die drei Gewerke Karosseriebau, Lackiererei und Montage bei einer bestimmten Tagesausbringung so zu entkoppeln, dass durch Re-Sequenzierung eine Reihenfolgestabilität von 98 % gewährleistet wird?
2. Wie ist idealerweise das Verhältnis von lackierten zu nicht lackierten Karosserien?
3. Wie robust reagiert der Prozess im Allgemeinen auf Störungen?
4. Welche Unterschiede gibt es in der Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Kompensation von Störungen bei Veränderung einzelner Parameter?
5. Mit welcher Strategie müssen die jeweiligen Skidpuffer befüllt werden?

---

### 15.3 Realsystem

Das Produktionssystem besteht aus Karosseriebau, Lackiererei und Fahrzeugmontage. Hinzu kommen Sattlerei, Achsmontage und Motorenbau und sämtliche logistischen Abläufe. Diese spielen für den Fahrzeugfluss und den Skidkreislauf allerdings nur eine untergeordnete Rolle.

Die Prozesse und die damit verbundenen Parameter innerhalb der Gewerke unterscheiden sich deutlich. Die einzelnen Gewerke sind über Förderstrecken miteinander verbunden, über die die Karosserien auf Transportskids befördert werden. Vom Karosseriebau transportieren die Transportskids die fertigen Rohkarosserien zum Entkopplungsmodul. In der Lackiererei werden Transportskids frei, wenn Rohkarosserien in die Vorbehandlung fahren. Zur Einsteuerung in die Vorbehandlung werden Lack-Skids benötigt. Nach dem Lackierprozess werden die lackierten Karosserien von einem Lack-Skid auf ein Transportskid umgesetzt. In der Fahrzeugmontage werden die Transportskids abgegeben.



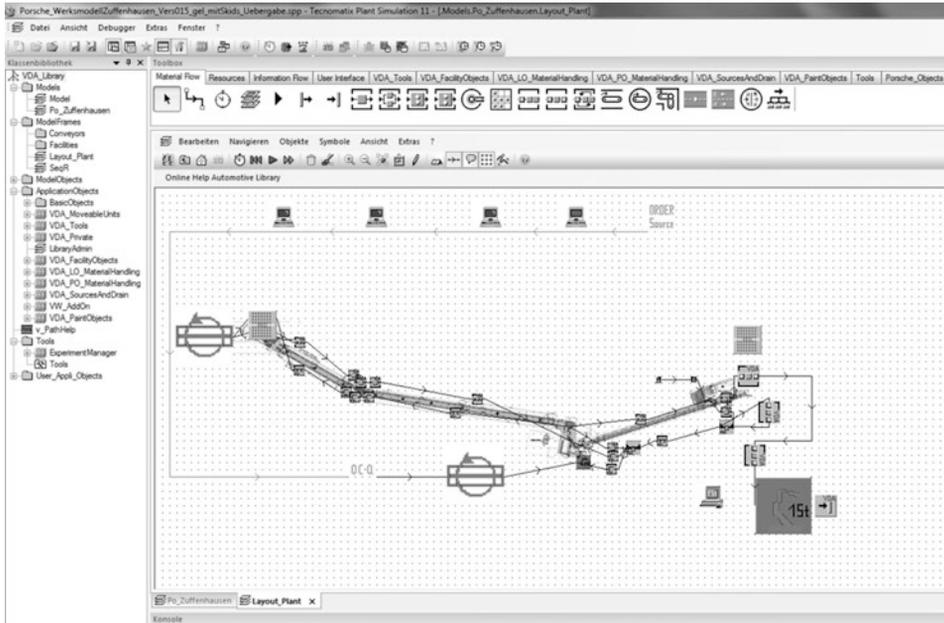
**Abb. 15.2** Ablaufdiagramm des Produktionsflusses

Aufgrund der asynchronen Schichtfahrweise ergibt sich im Tagesverlauf eine Verschiebung der Bedarfe an Transportskids. Leerskids werden an Stellen frei, an denen sie nicht benötigt werden und umgekehrt.

Der Rückfluss der Transportskids und der Versorgungskreislauf sind nicht getrennt, sodass sowohl beladene als auch leere Transportskids über die gleichen Rollenbahnen fahren. Um eine reibungslose Produktion zu gewährleisten, müssen die Quellen (Montage und Einlauf Lackiererei) immer die Möglichkeit haben, Transportskids abzugeben, damit die Senken (Karosseriebau, Auslauf Lackiererei) durchgängig mit Transportskids versorgt sind. Des Weiteren sind die Flüsse Karosserie und Leerskid zwischen den Gewerken so zu steuern, dass sie sich im Fall einer eintretenden Störung nicht gegenseitig blockieren. Abb. 15.2 skizziert die beschriebenen Prozesse.

## 15.4 Modellaufbau

Das Modell wird mit Hilfe der Simulationssoftware Plant Simulation erstellt. Die Modellierungstiefe der unterschiedlichen Bereiche variiert. Karosseriebau, Lackieranlage und Fahrzeugmontage werden nicht detailliert abgebildet, d. h. einzelne Stationen innerhalb



**Abb. 15.3** Simulationsmodell in Plant Simulation

des Produktionsbereiches werden nicht modelliert, sondern nur das Gewerk als Ganzes. Für die Betrachtung des Fahrzeugflusses ist diese Abbildung ausreichend. Das Entkopplungsmodul und die anbindende Fördertechnik hingegen werden vollständig abgebildet. Dies ermöglicht die Darstellung des realen Produktionsflusses zwischen den Gewerken. Abb. 15.3 zeigt das beschriebene Modell in Plant Simulation.

Wenn möglich, werden für die Modellierung die Bausteine aus dem Automotive Bausteinkasten des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) verwendet. Neben den VDA-Bausteinen werden auch die Standardbausteine aus Plant Simulation und selbsterstellte Bausteine zur Modellierung genutzt. Zur Abbildung des Karosseriebaus und der Lackiererei wird der DeSequencer-Baustein aus dem VDA-Bausteinkasten eingesetzt, der Takt- und Störverhalten, Füllstandsverlauf und die Positionsabweichungen der Karosserien auf Basis historisierter Realdaten nachbildet. Die Verbindungsstrecken zwischen den einzelnen Gewerken bestehen aus einfachen Konnektoren. Die Lagerkapazität der Strecken wird durch den VDA-Baustein Line\_Buffer dargestellt. Das Zusammenführen von Skid und Karosserie erfolgt über den VDA-Baustein Facility\_1St\_Assembly. Im Anschluss an den Karosseriebau wird ebenfalls der VDA-Baustein Facility\_1St\_Assembly genutzt. Innerhalb des Entkopplungsmoduls wird eine Assembly Station aus dem Standardbausteinkasten von Plant Simulation verwendet. Das Modell verfügt über zwei Quellen. Eine erzeugt die Aufträge, die andere generiert zu Beginn der Simulation einmalig eine definierte Menge an Transportskids.

## 15.5 Aufbereitung der Produktionsdaten

Die Datengrundlage bildet das reale Produktionsvolumen eines Zeitraums von vier Monaten. Hierfür werden die geplante Produktionsreihenfolge sowie die tatsächliche Produktionsreihenfolge je Gewerk, die Zeitstempel entlang des Produktionsflusses, der Fahrzeugtyp, die Außenfarbe und spezifische sequenzrelevante Ausstattungsmerkmale verwendet. Im ersten Schritt wird jeder Fahrzeugauftrag hinsichtlich seiner Reihenfolge am Ein- und Auslauf der jeweiligen Gewerke untersucht. Den Positionsabweichungen werden Typen und Ausstattungsmerkmale zugeordnet. So ist für jedes Gewerk ein Verwirbelungsfaktor je Karosserie sowie je Typ- und Merkmalkombination ermittelbar.

Im nächsten Schritt werden die Aufträge mit fehlenden oder falschen Informationen aus der Datengrundlage entfernt. Auf dieser Basis erfolgt eine Skalierung auf die zu simulierenden Stückzahlenszenarien und Tagesausbringungen. Zur Abbildung einer Fertigungskapazitätserhöhung werden die vorhandenen Auftragsdaten dupliziert und entsprechend der geplanten Produktionsquoten angepasst.

Das Simulationsmodell umfasst neben den Schichtzeiten auch den Fabrikkalender, die Pausenlage und die Verteilung der Störtakte.

---

## 15.6 Durchführung der Simulation

Nach einer Verifikation und Validierung des Simulationsmodells werden in mehreren Simulationsläufen je 50 Arbeitstage abgebildet und der Füllstand im Entkopplungsmodul sowie der Karosserien- und Skidfluss auf den Förderstrecken untersucht, interpretiert und dokumentiert. Als zusätzliche Einflussgröße werden in weiteren Simulationsexperimenten in den Gewerken Karosseriebau und Lack unterschiedliche Störgrößen parametrisiert.

Es wird eine Anlaufphase von sieben Tagen angesetzt, um einen eingeschwungenen Betriebszustand herzustellen. Zur Auswertung stehen jeweils 43 Tage zur Verfügung. Jedes Simulationsexperiment besteht aus jeweils fünf Beobachtungen mit unterschiedlichen Kombinationen von Zufallszahlströmen.

---

## 15.7 Ergebnisse

Mit Hilfe des Simulationsmodells soll das erforderliche Resortiervolumen ermittelt und die Funktionsfähigkeit der Steuerungslogik des Transportskidkreislaufs nachgewiesen werden. Für jeden Simulationslauf werden hierfür Durchsatz, Systemfüllstand der Gewerke und des Entkopplungsmoduls sowie die Positionsabweichung der einzelnen Karosserien je Gewerk als Kenngrößen ausgewertet. Zusätzlich werden zur Bewertung der Reihenfolgestabilität bei Montageeinlauf zwei Kennzahlen ausgewertet.

### 15.7.1 Verwendete Kennzahlen zur Messung der Reihenfolgestabilität

Die Messung der Reihenfolgestabilität beim Montageeinlauf erfolgt anhand von zwei ereignisorientierten Kennzahlen. Basis der beiden Kennzahlen ist die Gegenüberstellung der geplanten Sequenz mit der tatsächlich eingesteuerten Fertigungsreihenfolge an definierten Betrachtungspunkten entlang der Prozesskette.

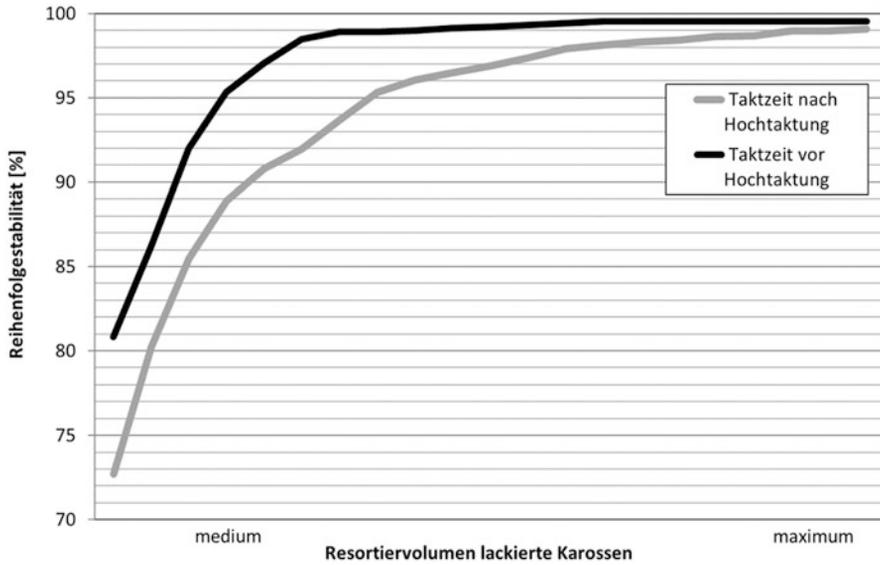
Die Kennzahl Reihenfolgeverletzung (RFV) zählt alle Positionsabweichungen in der Planreihenfolge. Ein Fahrzeug, das nicht an seiner geplanten Reihenfolgeposition aufgebaut werden kann, wird zurückgestellt und als „Nachzügler“ gekennzeichnet. Die Perlenkette verschiebt sich dann um eine Position nach vorne. Das Fahrzeug, das an der Stelle des Nachzüglers eingesteuert wird, erhält das Kennzeichen „Vorläufer“. Ein Nachzügler generiert also automatisch einen Vorläufer. Die Summe aller Nachzügler und Vorläufer dividiert durch die Anzahl aller Perlen im Betrachtungszeitraum ergibt die RFV in Prozent. Je höher diese ausfällt, umso größer ist der operative Zusatzaufwand.

Die Kennzahl Reihenfolgestabilität (RFS) misst in jedem Takt, wie viele Fahrzeuge außerhalb der Reihenfolge sind (Anzahl der Nachzügler). Zieht man die durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge außerhalb der Reihenfolge von der Anzahl aller Perlen im Betrachtungszeitraum ab und dividiert die Differenz durch die Anzahl aller Perlen im Betrachtungszeitraum, ergibt das die RFS in Prozent. Je niedriger diese ausfällt, umso mehr wird die logistische Infrastruktur belastet.

### 15.7.2 Dimensionierung des Entkopplungsmoduls

Zum Erreichen der geforderten 98 % Reihenfolgestabilität in der Fahrzeugmontage wird das erforderliche Resortiervolumen ermittelt. Dieses ist idealerweise in Form von lackierten Karosserien vorzuhalten. Eine Resortierung von Rohkarosserien bringt aufgrund von überlagernden Verwirbelungseffekten keinen Mehrwert.

Abb. 15.4 zeigt den konkaven Verlauf des benötigten Resortiervolumens zur Wiederherstellung der geplanten Sequenz. Sie gibt an, wie viele Fahrzeuge nicht an der geplanten Position in die Fahrzeugmontage einlaufen. Mit abnehmendem Resortiervolumen fällt die Reihenfolgestabilität überproportional. Anhand dieser Auswertung wird der Mindestfüllstand für die Sicherstellung einer zu 98 % reihenfolgestabilen Produktion ermittelt. Droht das Absinken auf einen zu geringen Bestand, müssen Sondermaßnahmen je Gewerk definiert und eingeleitet werden. Abb. 15.4 zeigt auch die Auswirkung unterschiedlicher Stückzahlenszenarien auf die Reihenfolgestabilität. In der Abbildung werden zwei verschiedene Szenarien abgebildet; die graue Kurve zeigt die Auswirkung einer Taktverkürzung (entspricht einer Hochtaktung) in der Fahrzeugmontage. Bei einer Stückzahlsteigerung basierend auf einer Taktverkürzung steigt das erforderliche Resortiervolumen zur Wiederherstellung der geplanten Sequenz an. Dabei verhält sich der Bedarf an Resortiervolumen nicht proportional zu der Ausbringungsmenge.



**Abb. 15.4** Reihenfolgestabilität als Funktion des Resortiervolumens lackierte Karosserien

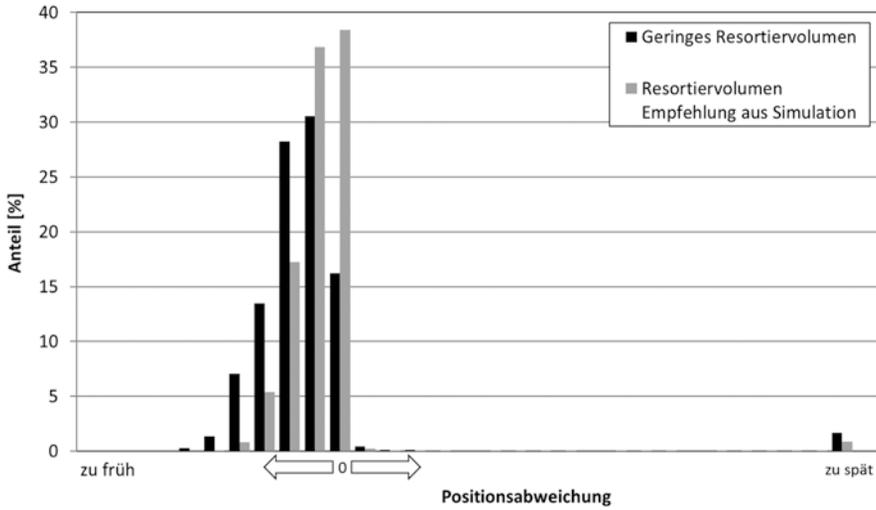
Eine Aussage über die Positionsabweichung kann in Abb. 15.5 abgelesen werden. Diese beschreibt die Abweichung der geplanten zu der tatsächlich eingesteuerten Sequenz. Eine positive Abweichung entsteht, wenn Fahrzeuge vor ihrer geplanten Position (zu früh) eingesteuert werden. Fahrzeuge, die zu spät eingesteuert werden, erzeugen eine negative Abweichung.

Bei einem hohen Resortiervolumen werden 40 % der Fahrzeuge zum geplanten Zeitpunkt eingesteuert. Wenn ein Fahrzeug zu seinem geplanten Termin nicht in die Montage eingesteuert werden kann, verschiebt sich die komplette Perlenkette um eine Position nach vorne. Die zu früh eingesteuerten Fahrzeuge resultieren also aus dem Vorziehen der Perlenkette aufgrund von einigen wenigen Fahrzeugen mit einer hohen negativen Positionsabweichung (Verspätung).

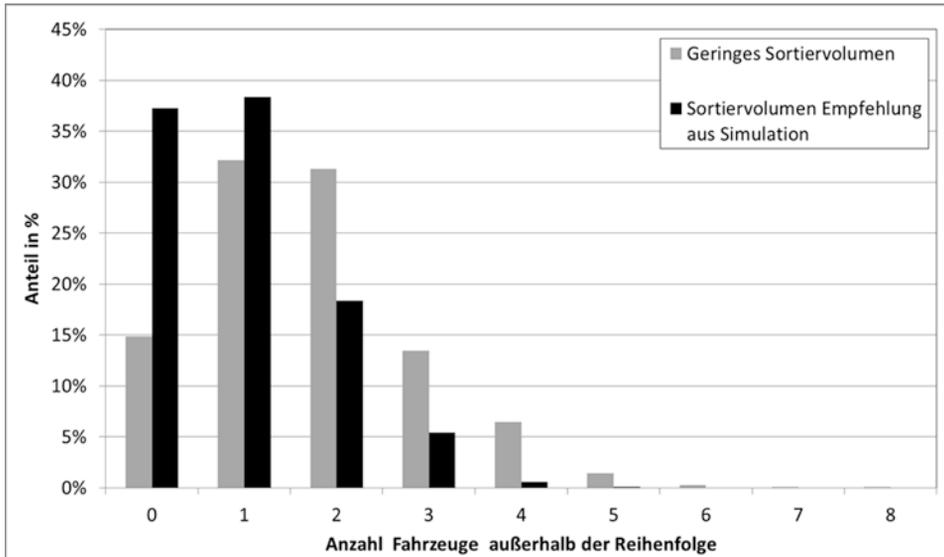
Die durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge außerhalb der Reihenfolge in Abhängigkeit zum verfügbaren Resortiervolumen ist in Abb. 15.6 abgebildet. Bei dem ermittelten Wert werden in über 94 % der Produktionszeit maximal zwei Fahrzeuge in der Montagesequenz übersprungen.

Die Schwankungsbreite (bedingt durch die Verfügbarkeit) der Gewerke innerhalb der Minimal- und Maximalausbringungen kann durch den Einsatz eines neuen Entkopplungsmoduls erstmalig voll genutzt werden, sodass sich die Gewerke nach Störungen oftmals selbst regulieren. Bei kleineren Störfällen sind keine zusätzlichen Sondermaßnahmen erforderlich. Abb. 15.7 stellt den Füllstand im Entkopplungsmodul im Wochenverlauf dar.

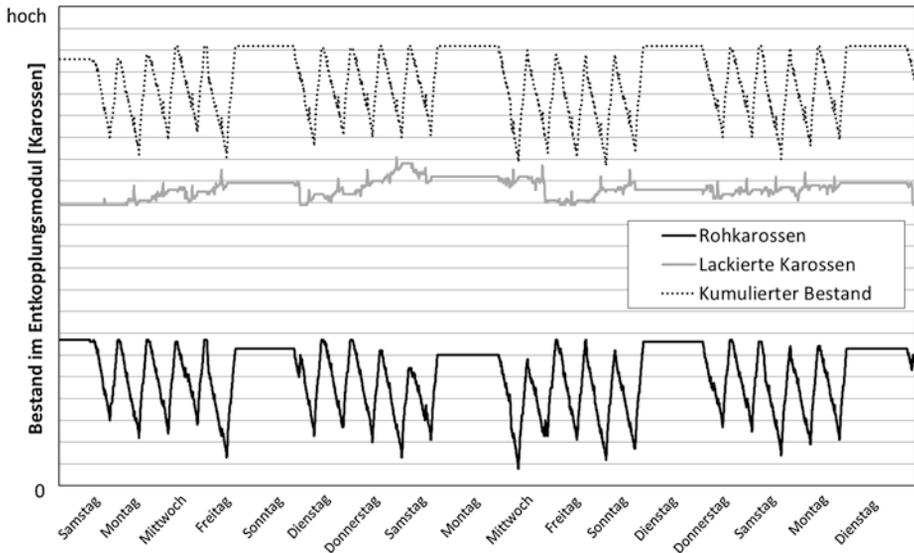
Es wird ein Entkopplungsvolumen ermittelt, bei dem Störungen von bis zu 60 Minuten ohne Sondermaßnahmen und Einfluss auf die Reihenfolgestabilität kompensiert werden.



**Abb. 15.5** Anteil der Positionsabweichungen bei Einlauf in die Montage in Abhängigkeit zum Resortivolumen



**Abb. 15.6** Anzahl Fahrzeuge außerhalb der Sequenz in Abhängigkeit zum Resortivolumen



**Abb. 15.7** Übersicht des Füllstandes im Entkopplungsmodul im Wochenverlauf

Die Gewerke können weiterhin Karosserien aufnehmen und abgeben. Dabei zeigt sich auch der Nutzen eines zentralen Entkopplungsmoduls mit wahlfreien Lagerungsoptionen für Rohkarosserien und lackierten Karosserien. Je nach Störszenario füllt sich der zur Verfügung stehende Bestand im Entkopplungsmodul mit lackierten Karosserien, Rohkarosserien oder Transportskids.

Zusätzlich wird ein negatives Szenario, und zwar ein Schichtausfall im Karosseriebau und in der Lackiererei, simuliert und aufgezeigt, dass dies mit Sondermaßnahmen (zum Beispiel einer Zusatzschicht in einem spezifischen Gewerk) ausgeglichen werden kann.

Zur Verifizierung der Ergebnisse werden diese durch eine statistische Rechnung und durch die Erfahrung aus dem operativen Betrieb bestätigt.

Mit Hilfe dieser Ergebnisse lassen sich die Konfiguration des Produktionssystems und die Betriebsparameter der daran ausgerichteten Zulieferströme festlegen. Die Reihenfolgestabilität dient als Indikator für die Belastung der logistischen Infrastruktur. Je niedriger die Kennzahl ausfällt, desto weiter weicht die intern und extern kommunizierte Planreihenfolge von der tatsächlichen Fertigungsfolge ab und desto mehr Flächenvorhalt ist zum Abpuffern des temporär nicht benötigten Sequenzmaterials notwendig.

Jedes Fahrzeug, das nicht in seiner geplanten Sequenzfolge in die Montage eingesteuert werden kann, generiert einen operativen Zusatzaufwand. Auf Basis der Planreihenfolge kommissionierte oder angelieferte Sequenzumfänge müssen aus- und bei der tatsächlichen Einsteuerung wieder einsortiert werden.

### 15.7.3 Steuerungslogik der Transportmittel

Die reibungslose Versorgung der Gewerke mit Transportskids erfolgt über eine im Simulationsprojekt entwickelte flexibel anpassbare Füllstandsüberwachung auf Basis von Triggerpunkten. Der minimale Füllstand definiert den Triggerpunkt, an dem ein Transportskid aus einer vorgegebenen Quelle angefordert wird. Der maximale Füllstand definiert den Triggerpunkt, an dem ein Transportskid an eine definierte Senke abgegeben wird. Um die Anzahl der Leerfahrten zu minimieren, wird in den jeweiligen Puffern ein optimaler Füllstand (Planfüllstand) definiert:

- Ein Skidspeicher nimmt als Senke nur dann Skids aus einer abgebenden Quelle auf, wenn der Planfüllstand unterschritten ist.
- Ein Skidspeicher als Quelle gibt nur dann Skids an eine anfordernde Senke ab, wenn der Planfüllstand überschritten ist.

Die Ergebnisse der Simulationsläufe zeigen, dass ein selbstregulierender Transportskid-kreislauf mit definierten Minimal-, Maximal- und Planfüllständen auch bei Störungen einzelner Gewerke funktioniert.

Des Weiteren kann die optimale Anzahl an Transportskids im Modell ermittelt werden. Im Zusammenspiel mit der füllstandsregulierten Transportsteuerung lässt sich vermeiden, dass die Förderstrecken blockiert werden, wenn die Gesamtzahl der Skids zu hoch ist oder bei zu geringer Anzahl Skids Wartezeiten entstehen.

---

## 15.8 Fazit und Ausblick

Mittels objektorientierter Modellierung kann der komplexe Prozess in der reihenfolgestabilen Variantenfließfertigung zielführend abgebildet werden. Zur Reduktion der Komplexität werden bei der Modellierung unterschiedliche Abstraktionsniveaus gewählt. Durch den Einsatz der VDA-Bibliothek sowie Original Equipment Manufacturer (OEM) spezifischer Bausteine ist dies auch sehr effizient möglich. Der Erfolg der Simulationsstudie zeigt sich darin, dass durch die gewonnenen Erkenntnisse begründete Entscheidungen über die Dimensionierung des Entkopplungsmoduls und der Transportsteuerung getroffen werden können. Nach Abschluss der Konzept- und Planungsphase sind das Entkopplungsmodul mit der ermittelten Kapazität gebaut und die Steuerungsstrategien implementiert worden. Die gewonnenen Erfahrungen im täglichen Betrieb spiegeln die mit der Simulationsstudie prognostizierten Vorhersagen wider.

Daher soll in Zukunft das Simulationsmodell nicht nur in der Planungsphase, sondern auch im operativen Betrieb genutzt werden. Die Einbindung in den Fachbereichen erfordert zunächst den Aufbau von Know-how in den Bereichen Simulationsmethodik, Programmierung und statistische Methoden (Hotz 2007).

Die Prozessverantwortlichen sind dann in der Lage, Veränderungen an den Modellparametern (Modellmix, Taktzeit, Schichtzeiten, Abstandsrestriktionen, Steuerungsstrategien) kontinuierlich zu untersuchen und zu bewerten. Dadurch lassen sich Erkenntnisse über die Robustheit der abgebildeten Prozesse gewinnen. Der Anwender generiert folglich ein Prozessverständnis, das bei komplexen Fragestellungen die Planungssicherheit gewährleistet und zur objektiven Entscheidungsfindung grundlegende Daten liefert.

Ein weiterer Vorteil der operativen Einbindung ist die Visualisierungs- und Auswertungsfunktion in der Simulationssoftware. Die für den Simulationslauf entwickelten Prozessabbildungen eignen sich als Visualisierung des Produktionsflusses. Die generierten Daten bilden die Grundlage für aussagekräftige Auswertungen. Die Visualisierung komplexer Prozesszusammenhänge und Abhängigkeiten kann als überzeugendes Kommunikationsmittel für Entscheidungsgremien zur Verfügung gestellt werden.

Die angewendete objektorientierte Methode der Modellbildung und Simulation ist eine Schlüsseltechnologie für die Analyse von komplexen Prozessen im Produktionsverbund. Zur ganzheitlichen digitalen Abbildung der Fabrik ist es empfehlenswert, die Zuliefer- und Materialflüsse mit digitalen Planungsmethoden zu integrieren. So können valide Aussagen über die Robustheit des gesamten Prozesses getroffen und Verbesserungspotenziale identifiziert werden.

---

## Literatur

- Gunasekaran A, Ngai E (2005) Build-to-order supply chain management. A literature review and framework for development. *J Oper Manag* 23:423–451
- Hotz I (2007) Simulationsbasierte Frühwarnsysteme zur Unterstützung der operativen Produktionssteuerung und -planung in der Automobilindustrie. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
- Kelkar O, Heger R, Dao D-K (2014) Studie Industrie 4.0 – Eine Standortbestimmung der Automobil- und Fertigungsindustrie. [https://www.mhp.com/fileadmin/www.mhp.com/assets/downloads/studien/MHP-Studie\\_Industrie4.0.pdf](https://www.mhp.com/fileadmin/www.mhp.com/assets/downloads/studien/MHP-Studie_Industrie4.0.pdf). Zugegriffen am 20.03.2017
- Kuhn H (1997) Fließproduktionssysteme – Leistungsbewertung, Konfigurations- und Instandhaltungsplanung. Physica, Berlin
- Manitz M (2004) Leistungsanalyse von Montagesystemen mit stochastischen Bearbeitungszeiten. Kölner Wissenschaftsverlag, Köln
- Meißner S (2009) Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung. Dissertation, Technische Universität München
- Meißner S, Grinninger J, Kammermeier F (2008) Stabilisierung des Auftragsabwicklungsprozesses durch flexible Auftragszuordnung. *ZWF* 103:893–897
- Spieckermann S (2005) Diskrete, ereignisorientierte Simulation in Produktion und Logistik – Herausforderungen und Trends. In: Schulze T, Horton G, Preim B, Schlechtweg S (Hrsg) *Simulation und Visualisierung (SimVis 2005)*. SCS Publishing House, Erlangen, S 3–14
- Weyer M (2002) *Das Produktionssteuerungskonzept Perlenkette und dessen Kennzahlensystem*. Helmesverlag, Karlsruhe



**Mareike Müller** Geb. 1986, studierte Management Science an der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt. Seit März 2011 Planerin im Bereich Fahrzeugsteuerung bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. U. a. Projektleitung im Handlungsfeld Steuerung und IT im Rahmen des Baus eines neuen Entkopplungsmoduls, Ablaufsimulation im Kontext digitaler Planungsmethoden sowie Neuausrichtung Sequenzierung. Seit Mai 2012 externe Doktorandin an der KU Eichstätt-Ingolstadt am Lehrstuhl Supply Chain Management & Operations, mit dem Schwerpunkt reihenfolgestabile Produktion und Pufferallokation in der Variantenfließfertigung.



**Dr. Ulrich Burges** Nach dem Studium der Physik an der RWTH Aachen wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Jülich. In dieser Zeit Promotion auf dem Gebiet der Festkörperforschung. Im Jahr 1998 Einstieg bei der SimPlan AG als Consultant Simulation mit dem Schwerpunkt Automobilindustrie. 2015 Berufung in den Vorstand der SimPlan AG und in diesem verantwortlich für den Bereich IT und das operative Simulationsgeschäft.



---

# Integrierte Simulation von Auftragsabwicklungs- und Supply Chain-Prozessen

# 16

Axel Wagenitz, Katja Klingebiel, Michael Toth, Marco Motta  
und Dirk Weibels

---

## 16.1 Einleitung

Neben der Bewertung und Optimierung der logistischen Prozesse innerhalb der Teileversorgung, der Fahrzeugproduktion und -distribution kann die Simulation auch eingesetzt werden, um die Planung und Steuerung dieser Prozesse übergreifend über den gesamten Planungs- und Auftragsabwicklungsprozess zu verbessern. Der Auftragsabwicklungsprozess beginnt mit der Auftragserteilung durch den Kunden, reicht bis zur Auslieferung des bestellten Fahrzeugs und bietet damit einen Rahmen für eine solche Optimierung, da er die Systemlasten (vgl. Abschn. 16.2) der oben genannten (Teil-)Prozesse steuert und die Erfüllung der Kundenwünsche Ziel jedes Teilprozesses sein muss. Wesentlicher Teil dieser Systemlasten sind voll spezifizierte Aufträge, die einerseits tausenden technischer

---

A. Wagenitz (✉)  
LogProIT GmbH, Dortmund, Deutschland  
E-Mail: [axel.wagenitz@logproit.de](mailto:axel.wagenitz@logproit.de)

K. Klingebiel  
Fachhochschule Dortmund, Dortmund, Deutschland

M. Toth  
Hochschule Bochum, Bochum, Deutschland

M. Motta  
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, Deutschland

D. Weibels  
Volkswagen Aktiengesellschaft, Hannover, Deutschland

Regeln genügen müssen und andererseits in der gewünschten Quote von den Kunden wählbare Ausstattungen beinhalten (z. B. 35 % der Aufträge beinhalten ein großes Navigationssystem).

Die hinreichend genaue und frühzeitige Bestimmung der Systemlasten einzelner Teilprozesse des Auftragsabwicklungsprozesses war aufgrund der komplexen Planungsprozesse und Produkte der Automobilindustrie jedoch lange ein Hindernis auf dem Weg, den Auftragsabwicklungsprozess ganzheitlich (vom Kundenauftrag bis zur Auslieferung) und durchgängig (unter Einbeziehung der Supply Chain und prognosebasierter Systemlasten) in Simulationsmodellen abzubilden und dem Experimentieren zugänglich zu machen. Im Folgenden werden anhand von zwei erfolgreichen Anwendungsbeispielen aus der Automobilindustrie die wesentlichen Herausforderungen benannt und Lösungsverfahren beschrieben.

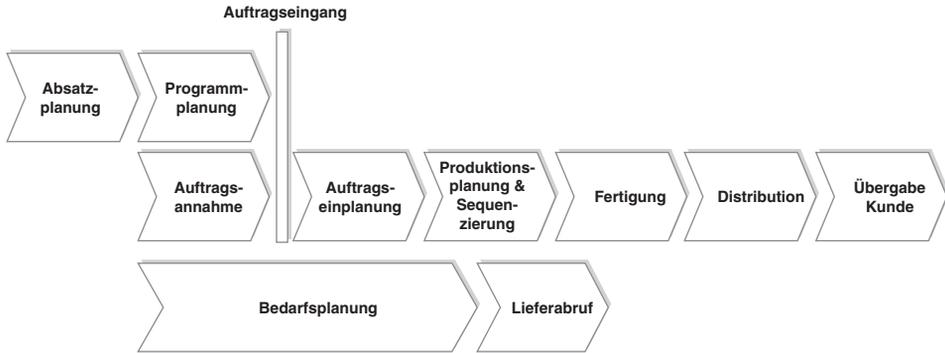
---

## 16.2 Stand der Forschung

Der Auftragsabwicklungsprozess (auch Kundenauftragsprozess oder Order-To-Delivery (OTD)-Prozess) umfasst jene unternehmerischen Teilprozesse, welche der Erfüllung von Kundenaufträgen dienen (Kuhn und Hellingrath 2002, S. 153). In enger Betrachtungsweise besteht der Auftragsabwicklungsprozess der Automobilindustrie aus der Prozesskette von Angebotserstellung über die Kundenfahrzeugbestellung bis zur Auslieferung des Fahrzeugs an den Kunden (Kuhn 1995, S. 37). Als Kernprozesskette jedes Automobilherstellers spiegelt der Auftragsabwicklungsprozess für den Kunden die Leistungserstellung gemessen in Lieferzeit, Liefertreue, Lieferbereitschaft, Lieferqualität und Lieferflexibilität wider (vgl. Baumgarten 1996, S. 7; Wagenitz 2007, S. 7). So muss der OTD-Prozess ausreichend Prozess- und Produktionsflexibilität bieten, um die volatile Nachfrage in angemessenen Lieferzeiten bedienen zu können. Gleichzeitig ist eine definierte Stabilität interner Prozesse zu gewährleisten, um die Planbarkeit und Effizienz der Prozessausführung zu sichern. Der Kundenauftragsentkopplungspunkt (Decoupling Point, Order Penetration Point) (Sharman 1984; Christopher 2000; Klingebiel 2009) unterteilt den Auftragsabwicklungsprozess in prognosebasierte, planbare Push-Prozesse und nachgelagerte flexiblere Pull-Prozesse, die ausschließlich auf Basis von Kundenaufträgen ausgeführt werden (Klug 2010, S. 362 f.).

In der heutigen üblichen erweiterten Sichtweise in der Automobilindustrie umfasst der Auftragsabwicklungsprozess daher nicht nur die Phase des Auftragsmanagements einschließlich Produktion und Distribution, sondern auch und insbesondere die vorgelagerten Prozesse der Vertriebsplanung, Programmplanung sowie des Bedarfs- und Kapazitätsmanagements und berücksichtigt so explizit die Prozessschnittstellen zu Zulieferern und Logistikdienstleistern (LDL); vgl. Abb. 16.1.

Der mittelfristig antizipierte Marktbedarf eines Automobilherstellers resultiert aus den Prognosen und Planungen des Vertriebs (Zernechel 2007, S. 370). Diese mengenbasierte Vertriebsplanung wird von der meist zentralen Planungsabteilung des Herstellers in ein



**Abb. 16.1** Automobilers Auftragsabwicklungsprozess

ebenso mengenbasiertes Produktionsprogramm übersetzt, welches der Kapazitätsplanung, Produktion und Beschaffung, dem Bedarfs- und Kapazitätsmanagement (BKM) sowie der Distribution dient. Hierbei sind Restriktionen durch Zulieferer-, Produktions- und Distributionskapazitäten einzubeziehen (Wagner 2006, S. 35). Die Lücke zwischen Programmplanung (Mengen und Anteile von Varianten und zum Teil sogar Ausstattungsmerkmalen) und dem Kapazitätsbedarf in Produktion und Supply Chain zu überbrücken, ist eine nicht leicht zu lösende, aber notwendige Aufgabe (Stäblein 2008; Zernechel 2007, S. 372; Gebhardt et al. 2003, S. 1 ff), um frühzeitig Restriktionen auszubalancieren und mögliche Engpässe zu identifizieren (siehe auch Abb. 16.2). Die wesentlichen Herausforderungen hierbei liegen in der Unsicherheit und Volatilität der Marktbedarfe einerseits und der großen Variantenvielfalt und damit einhergehenden erschwerten Prognostizierbarkeit einzelner Variantenbedarfe sowie der logistischen Komplexität andererseits. Auch die Betrachtung des zeitlichen Verhaltens der globalen Produktionsnetze, mit zum Teil wochenlangen Vorlaufzeiten, ist komplex und mit Risiken belegt.

Mit dem Eingang der Händler- und Kundenbestellungen erfolgt die Einplanung in das Auftragsbuch. Dieses Ereignis markiert den Beginn der Zusammenführung von mengenbasierter Planung und konkreten Aufträgen. Hierbei werden Aufträge in der Regel nur gegen bekannte, kritische Restriktionen abgesichert, die auch in die Programmplanung einbezogen werden (Klingebl 2009). Diese Beschränkung führt heute besonders bei kundenwählbaren Ausstattungsmerkmalen in vielen Fällen zu späteren Kapazitätsproblemen und damit zu größeren Umplanungen. Im Auftragsbuch selbst können einmal platzierte Aufträge vom Bestellenden, d. h. meistens den Händlern, in gewissen Grenzen und abhängig vom zeitlichen Vorlauf der Anpassung gegenüber dem Produktionsstart noch angepasst werden (Holweg 2008, S. 28). Die so entstehende Änderungsflexibilität variiert von Hersteller zu Hersteller; jede dieser Änderungen führt jedoch zu Unruhe in den Planungs- und Auftragsabwicklungsprozessen, die zu Bedarfsschwankungen im Teilebedarf mit dementsprechender Instabilität in der Teilelogistik führt.

Die integrierte gesamtheitliche Planung des Auftragsabwicklungsprozesses ist gekennzeichnet durch immense Komplexität. Sie erfordert die Betrachtung vieler voneinander

abhängiger Planungsobjekte (Aufträge, Ausstattungsmerkmale des Auftrags, Teile, Standorte, Zuliefererkapazitäten, etc.) sowie dynamischer und stochastischer Prozesse. In der Praxis wird durch Zerlegung des Planungsproblems in Teilprobleme (Dekomposition, d. h. sukzessive Planung periodenweiser, produktweiser, ressourcenweiser Mengen) oder Reduktion der Problemkomplexität durch Bildung von zeitlichen oder mengenmäßigen Aggregationsstufen (Bildung von Produktgruppen, Ressourcengruppen, Marktsegmenten, Zeitperioden wie Wochen, Monate) versucht, die Komplexität zu reduzieren. Aber dennoch bleiben für praxisrelevante Problemgrößen hinsichtlich Auftragsumfang, Anzahl der Restriktionen, etc. die lineare Optimierung oder andere exakte analytische Verfahren zur Bestimmung, beispielsweise des integriert „optimalen“ Produktionsprogramms, unter Einbeziehung aller die Umsetzbarkeit beeinflussenden Parameter, nur sehr eingeschränkt anwendbar (vgl. Sillekens 2008). Die Planung bleibt von Expertenwissen abhängig.

Seit langem hat sich hier ergänzend die Simulationstechnik als ein anerkannter Planungsansatz platziert (Schumacher und Wenzel 2000, S. 5), wird aber heute noch eher selten in der operativen, betriebsbegleitenden Planung eingesetzt. Für die Anwendung der Simulationstechnik muss der Auftragsabwicklungsprozess möglichst ganzheitlich und durchgängig mit seinen dynamischen Prozessen, den zugrunde liegenden Strukturen, den eingesetzten Ressourcen und den Steuerungsregeln in einem experimentierfähigen Modell abgebildet werden. Anhand der Entwicklung dieses Modells entlang der Zeit können Aussagen über Validität von Planungen gemacht und einfache Planungsentscheidungen getroffen werden. Über die Integration einfacher parametrierbarer Entscheidungsregeln können darüber hinaus definierte Planungsprobleme im Simulationsmodell zustandsabhängig gelöst und so unter Einbeziehung des Entscheiders im Ergebnis verbessert werden.

Zur modellbasierten Unterstützung solcher Planungsentscheidungen bilden sog. „Logistische Assistenzsysteme“ einen geeigneten Rahmen, die die Zustandserfassung logistischer Netzwerke, die modellbasierte Zustandsbewertung und die Analyse der Bewertungsergebnisse in einer flexiblen IT-Architektur bündeln (vgl. Klingebiel et al. 2010).

Prototypische Anwendungen zeigen, dass die ereignisdiskrete Ablaufsimulation für Teilbereiche des Auftragsabwicklungsprozesses betriebsbegleitend einsetzbar ist (Klingebiel et al. 2014, S. 734 ff.). Das verwendete Simulationsmodell bildet dazu den relevanten Ausschnitt des Produktionsnetzwerks mit seinen Fertigungs- und Lagerstandorten, Transportrelationen und sonstigen Prozessen strukturell ab. Darüber hinaus werden im Modell die erforderlichen Ressourcen (z. B. Produktions- und Transportkapazitäten) und relevante Steuerungsregeln z. B. der Disposition hinterlegt. Entscheidend für den betriebsbegleitenden Einsatz der Methode der Simulation ist der Entfall der „Einschwingzeit“ des Modells, wie sie beispielsweise beim Einsatz in Simulationsstudien erforderlich ist. Im Rahmen einer Simulationsstudie beginnt die Untersuchung oftmals mit einem „leeren“ System: Es liegen noch keine Aufträge vor bzw. sind noch keine Produkte und Teile im System vorhanden. Erst nach Ablauf der Einschwingzeit ist das Modell hinreichend „gefüllt“, so dass Untersuchungen durchgeführt werden können, deren Erkenntnisse auf die Realität übertragbar sind. Im Gegensatz zum Studieneinsatz muss beim betriebsbegleitenden

den Simulationseinsatz ein Initialzustand des Modells erzeugt werden, der hinreichend genau mit dem momentanen Zustand des realen Systems übereinstimmt. Hierzu wird das Simulationsmodell um Variablen ergänzt, die den Status des modellierten Systems zum aktuellen Zeitpunkt repräsentieren (Auftragslasten, Kapazitäten und deren aktuelles Nutzungsprofil, Bestände, Transporte, Belegung der Fertigungslinien, etc.). Die die Systemlast beschreibenden Daten im Kurzfristbereich bestehen aus den bekannten Aufträgen. Für mittelfristige Planungsszenarien bzw. zur Verlängerung des Simulationszeitraumes können Systemlastdaten zum Beispiel in Form von Vertriebsprognosen und -planungen ab dem Start eines Simulationslaufes in das Modell eingelastet werden. Diese Systemlast beeinflusst maßgeblich die Ereigniserzeugung und die Simulationsergebnisse (VDI 2000, S. 10), d. h. die sich entwickelnden Variablenzustände im Ablauf.

---

### 16.3 Bedarfs- und Kapazitätsmanagement (BKM) bei einem deutschen Automobilhersteller

Eine prototypische Lösung zur Integration der Simulation in die Planungsprozesse des Bedarfs- und Kapazitätsmanagements wurde für einen großen deutschen Automobilhersteller umgesetzt. Zur Simulation der Teilprozesse des Bedarfs- und Kapazitätsmanagements (BKM) ist dabei das Vorliegen vollständig spezifizierter Aufträge erforderlich. Dies liegt darin begründet, dass sich die konkreten Teilebedarfe und auch die konkreten Anforderungen an die Einplanung z. B. in die Montagesequenz erst aus der Kombination der Ausstattungsmerkmale eines Auftrags ergeben. In der Regel liegen diese Aufträge im taktischen Planungshorizont mit einer Reichweite von mehreren Monaten nicht vor und müssen auf Basis von Prognosen generiert werden. Diese Aufträge (sogenannte „Planaufträge“) müssen einerseits bestimmten Regeln genügen und andererseits in ihrer Summe vorgegebenen Volumina und Anteilen von Ausstattungsmerkmalen entsprechen. Die Regeln lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen. Zum einen in vertriebliche Regeln, die festlegen, welche Ausstattungsmerkmale in welchem Markt verfügbar sind und welche hiervon in sogenannten „Paketen“ gebündelt bestellt werden können bzw. müssen. Zum anderen in technische Regeln, die festlegen, ob Ausstattungsmerkmale miteinander kombiniert werden dürfen oder zwingend zusammen in Aufträgen vorkommen müssen.

Der Automobilhersteller nutzt Planaufträge insbesondere operativ, um den Bedarf an Teilen bzw. Komponenten, der in den jeweiligen Produktionswerken voraussichtlich entstehen wird, durch eine Stücklistenauflösung zu prognostizieren.

Die Planaufträge spielen damit potenziell eine Doppelrolle, einerseits als Basis für die Bedarfsberechnung und andererseits als Systemlast für die Ablaufsimulation. Diese Doppelrolle zeigt sich auch in der im Folgenden beschriebenen prototypischen Umsetzung einer IT-Unterstützung für das BKM in Form eines logistischen Assistenzsystems, die die Basis für eine Ablaufsimulation in zukünftigen Ausbaustufen darstellt.

### 16.3.1 Anforderungen an ein BKM-Assistenzsystem

Für ein effizientes Bedarfs- und Kapazitätsmanagement sind drei Fragen von besonderer Bedeutung. Die Antworten auf diese Fragen führen zu zentralen funktionalen Anforderungen an ein Unterstützungswerkzeug.

Die erste Frage ist, welcher Teilebedarf (Sekundärbedarf) in den jeweiligen Werken aus einem Marktversorgungs- und Werke-Aufteilungsszenario (Primärbedarf) resultiert. Auf der Ausgangsbasis prognostizierter Volumina für Fahrzeugvarianten und Anteile (Take Rates) von Ausstattungsmerkmalen ist dazu der Bedarfsverlauf, der für die Produktion und Montage benötigten Teile, werksspezifisch zu bestimmen. Kann dieser prognostizierte Sekundärbedarf nicht erfüllt werden, wird zur Bestimmung von potenziellen Einwirkungsmöglichkeiten auf den Primärbedarf die iterative Beantwortung der zweiten und dritten Frage bedeutsam.

Bei der zweiten Frage geht es darum, welche Fahrzeugtypen und Sonderausstattungen in besonderer Weise den Bedarf für ein Engpassteil treiben. Um diese Frage zu beantworten, ist in den Analysefunktionalitäten eines Softwarewerkzeugs eine Rückverfolgbarkeit essenziell, die von der Teileebene schnell auf die „zugehörigen“ Primärbedarfe schließen lässt.

Eine dritte, simultan zur zweiten zu beantwortende Frage ist, ob die internen oder externen Lieferanten das Teil bzw. die Komponente fristgerecht in der benötigten Menge liefern können. Diese Frage soll im ersten Schritt noch nicht beantwortet werden, jedoch in weiteren Ausbaustufen des hier vorgestellten Ansatzes umsetzbar sein.

Für das BKM ist zusätzlich die aggregierte Bedarfssicht relevant. Um Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Baureihen (z. B. BMW 3er und 5er, Mercedes C- und E-Klasse, VW Golf und Passat, usw.) in Bezug auf den Sekundärbedarf analysieren zu können, sind dazu auch alle Baureihen des jeweiligen Herstellers simultan zu betrachten. Die vollständigen Stücklisteninformationen sind dazu ebenso einzubeziehen.

Eine weitere wichtige nichtfunktionale Anforderung ist eine Antwortzeit von weniger als 15 Minuten für die Bewertung eines Szenarios – nur so lassen sich ausreichend viele Planungsalternativen untersuchen.

### 16.3.2 Umsetzung eines BKM-System-Prototyps

In Zusammenarbeit mit den Partnern Fraunhofer IML und LogProIT GmbH hat der Hersteller an Ansätzen gearbeitet, ein Assistenzsystem für das BKM umzusetzen, welches den oben genannten Anforderungen genügt und als Ergänzung zu den existierenden operativen Systemen schnell und mit vertretbarem Aufwand implementierbar ist. Die Lösung ist ein BKM-Assistenzsystem, welches die Daten der operativen Systeme in ein umfassendes Daten-Modell integriert. Die aktuelle prototypische Implementierung umfasst singuläre Modelle für die Planauftragserzeugung und das BKM, die perspektivisch zu integrieren sind.

Auf Basis der oben genannten Anforderungen wurde das Simulationswerkzeug OTD-NET (vgl. Liebler et al. 2013), welches auf der methodischen Basis ereignisdiskreter Simulation insbesondere für den Einsatz in der Automobilindustrie entworfen wurde, für die Umsetzung des Assistenzsystems ausgewählt. Drei Faktoren waren für die Auswahl besonders bedeutsam:

Erstens die bereits vorhandenen Modellelemente zur hierarchischen Abbildung von Fahrzeugvarianten, Ausstattungsmerkmalen, Baubarkeitsregeln und Stücklisten, die die Informationen aus den Hersteller-IT-Systemen abbilden können. Zweitens die Fähigkeit Planaufträge aus diesen Daten zu erzeugen und diese dann drittens als Systemlast für eine Stücklistenauflösung und letztendlich eine Ablaufsimulation verwenden zu können, die die Bedarfe berechnet und mittels Abgleichs mit den eingegebenen Kapazitäten und Beständen die Lieferfähigkeit eines (für den Simulationspiloten) ausgewählten Anteils des Liefernetzwerkes prognostiziert.

Da die „Roh-Daten“, wie sie operativ in verschiedenen IT-Systemen verwendet werden, auf eine schnelle Verarbeitung ausgelegt sind, ist eine direkte Verwendung zum Aufbau des benötigten Datenmodells nicht ohne Optimierungen möglich: Erste Teil-Modelle wiesen einen Hauptspeicherbedarf von mehr als 48 GB auf, darin enthalten über zehn Millionen Verweise auf Stücklistenregeln und über zwei Millionen Verweise auf Baubarkeitsregeln. Eine deutliche Reduktion der Modellgröße wurde erreicht, indem die Fahrzeugvarianten stark hierarchisiert im Modell abgelegt wurden und dann im Folgeschritt die Baubarkeits- und Stücklistenregeln für die modifizierte Struktur optimiert wurden. Mit diesen Maßnahmen ließ sich der Gesamtmodellumfang auf eine beherrschbare Größe reduzieren. Die hohe Datenqualität der Informationen aus den operativen IT-Systemen des Herstellers erlaubt es dabei, das OTD-NET-BKM-Modell automatisiert aus den Daten dieser Systeme zu aktualisieren.

Das optimierte Datenmodell bildet die Grundlage für die Erzeugung von Planaufträgen, aus denen der Sekundärbedarf durch eine Stücklistenauflösung bestimmt wird. Für zukünftige Evolutionsstufen des Werkzeugs, die einen Ausblick über den bisherigen Prototypen-Umfang hinaus darstellen, bilden sie die Systemlast für die Simulation des Auftragsablaufes „Order-to-delivery“ und der Prozesse in der Lieferkette. Die Validierung der Planaufträge „gegen“ die Baubarkeitsregeln ergab, dass von OTD-NET keine Planaufträge mit Regelverstößen erzeugt werden. Ein Vergleich der Volumina und Anteile von Ausstattungsmerkmalen mit den Vorgaben zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von im Schnitt 96 Prozent.

Zur Analyse der Ergebnisse kommen mehrere Komponenten, z. B. eine Pivotkomponente, zum Einsatz. Damit können alle potenziell zu analysierenden Fahrzeugeigenschaften und Auftragsdaten, Fahrzeugstammdaten, Werksdaten und Stücklistendaten individuell und gesamthaft zu Auswertungen kombiniert werden. Speziell für die BKM-Planungen wurden Analysekomponenten geschaffen, die webbasiert im Fall einer Unterdeckung des Teilebedarfes die jeweiligen Zusammenhänge zwischen Volumina, Ausstattungsmerkmalen, Baubarkeitsregeln und den Stücklisten quantifizieren, indem die Häufigkeit bestimmter Merkmalsmuster in den Planaufträgen ausgezählt und einer mehrdimensionalen

Analyse zugänglich gemacht wird. Die für jedes neue Merkmalsmuster immer wieder durchgeführte Stücklistenauflösung kann durch die oben genannte Optimierung der Stückliste und konsequente Nutzung der heute breit verfügbaren Mehrkernprozessoren auch für hunderttausende Planaufträge in wenigen Sekunden durchgeführt werden.

Das geschaffene BKM-Assistenzsystem ermöglicht es, Primärbedarfsszenarien schnell zu bewerten und damit durch verbesserte Nutzung der vorhandenen Kapazitäten einen Beitrag zu leisten, den Automobil-Endkunden ein Höchstmaß an Flexibilität, bei gleichzeitig hoher Liefertreue und kurzen Lieferzeiten, zu bieten.

Die gewählte Systemarchitektur ist damit eine sehr gute Basis für die Beantwortung der oben genannten dritten Frage: Die Prüfung der Auswirkung von Bedarfsszenarien auf die Lieferkette mittels einer Ablaufsimulation. Weiterhin stehen neue Möglichkeiten zur Verfügung, um bei kurz- oder mittelfristig auftretenden Engpässen effiziente Reaktionen auszuwählen, um negative Auswirkungen auf die genannten Kenngrößen zu minimieren.

---

## 16.4 Auftragsabwicklung in globalen Liefernetzwerken

Das Bedarfs- und Kapazitätsmanagement berechnet Bedarfe (Systemlasten) in frühen Phasen der Planung des Auftragsabwicklungsprozesses und ermittelt Kapazitätsanforderungen für das Liefernetzwerk. So können Fahrzeughersteller (OEM) und Lieferanten den Kundenanforderungen besser begegnen. Eine zuverlässige und effiziente Erfüllung von Kundenwünschen ist heute, mehr denn je, ein wettbewerbsentscheidender Faktor. Im globalen Wettbewerb, in dem jeder Kunde jedes Produkt von überall auf der Welt beziehen kann und Qualitätsunterschiede immer geringer werden, gewinnt der Service am Kunden (hohe Flexibilität, geringe Lieferzeiten und niedrige Kosten) immer stärker an Bedeutung. Gleichzeitig findet eine Konsolidierung der Wertschöpfung bei den OEMs statt, wesentliche Leistungen werden an Lieferanten vergeben und die Wertschöpfungstiefe nimmt ab. Der Auftragsabwicklungsprozess erstreckt sich weit in die Lieferkette, welche heute ebenfalls häufig kundenauftragsorientiert betrieben wird. Die Unternehmen erhoffen sich dadurch Kosteneinsparungen, ohne den Kundenservice zu beeinträchtigen. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn

- Flexibilität nicht über hohe Bestände realisiert wird,
- die resultierenden Logistikrelationen kosteneffizient betrieben und
- teure und ökologisch ineffiziente Sonderprozesse (z. B. Luftfracht) vermieden werden.

Sind diese Anforderungen nicht erfüllt, muss die dem Kunden versprochene Lieferzeit Vorlauf- und Transportzeiten der globalen Lieferrelationen mit umfassen. Dies führt jedoch zu mitunter sehr langen Lieferzeiten von mehreren Monaten in einem Markt, in dem eine schnelle Belieferung wettbewerbsentscheidend sein kann.

Durch eine frühzeitige Festlegung von Bedarfen und Volumina kann in diesen Fällen eine Strategie mit niedrigen Beständen realisiert werden, welche jedoch die Flexibilität bei schwankender Marktnachfrage reduziert. Kommt es dann zu unerwarteten Planabwei-

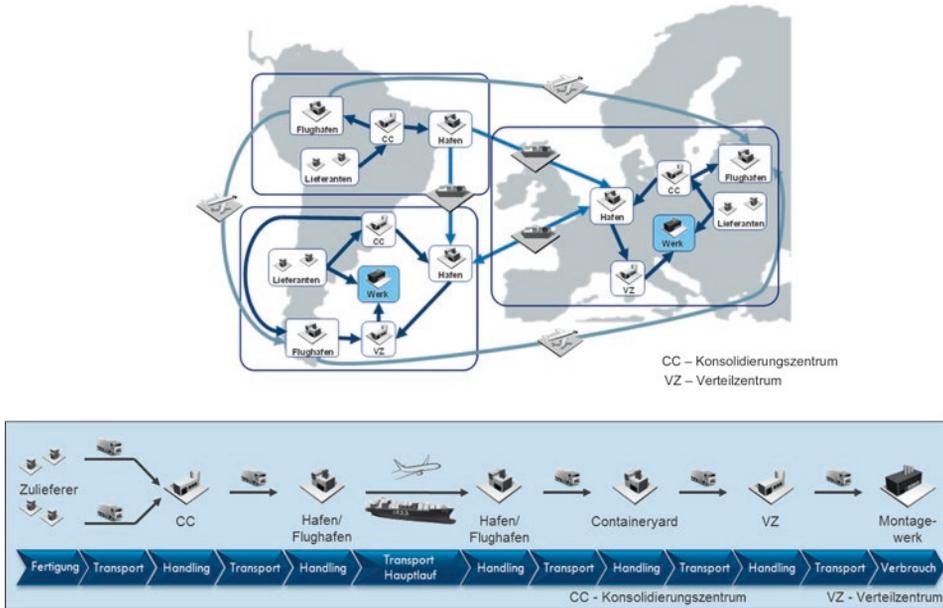
chungen, fallen für Expresstransporte (z. B. Luftfracht) oder kurzfristige Kapazitätserhöhungen hohe Mehraufwendungen an (Kuhn und Toth 2008). Der Disponent, der verantwortlich für das Zuteilen von Ressourcen und Kapazitäten ist, befindet sich nun in einem Trilemma, da er sich in einem Spannungsfeld zwischen den Interessen der internationalen Produktionsstandorte, den Anforderungen an eine effektive und effiziente Gestaltung des Auftragsabwicklungsprozesses und den Flexibilitätsanforderungen der Vertriebsseinheiten befindet (Toth und Wagenitz 2009, S. 55 ff.).

Um dem zu begegnen, bedarf es einer neuen Planungsmethode, welche fortlaufend die Verfügbarkeit von Teilen und Ressourcen bei sich ändernden Systemlasten (Sonderbedarfe, Transportabweichungen, Kapazitätsausfälle, etc.) überprüft (vgl. Henke und Motta 2014). Im Folgenden wird am Beispiel der globalen Volkswagen Nutzfahrzeuge Produktion (Amarok Produktion in Argentinien und Deutschland) ein simulationsbasierter Ansatz vorgestellt, welcher eine durchgängige Integration globaler Produktionsverbünde im Auftragsabwicklungsprozess unterstützt und insbesondere eine flexible Bedarfsplanung unter Berücksichtigung globaler Materialverfügbarkeiten ermöglicht.

#### **16.4.1 Anwendungsbeispiel Volkswagen Nutzfahrzeuge: Verfügbarkeitsplanung für die globale Amarok Produktionsdrehscheibe**

Das Modell „Amarok“ der Marke Volkswagen Nutzfahrzeuge wird in Pacheco, Argentinien und Hannover, Deutschland gefertigt und weltweit vertrieben. Eine Vielzahl europäischer Lieferanten ist sowohl für die Versorgung der deutschen als auch der argentinischen Produktion verantwortlich. Gleiches gilt für südamerikanische Lieferanten, so dass sich wechselseitige, internationale Lieferrelationen ergeben, die im Standard intermodal (Zug/LKW im Vor- und Nachlauf, Schifftransport im Hauptlauf) organisiert sind (Bockholt 2012). Alternativ ist auch eine Luftfrachtabwicklung möglich, welche aufgrund von ökologischen Aspekten und hoher Kosten jedoch nur in Engpasssituationen zum Einsatz kommt. Eine derartige, verteilte Produktion mit wechselseitigen Lieferantenbeziehungen soll im Folgenden als Produktionsdrehscheibe bezeichnet werden. Die Abb. 16.2 zeigt die Struktur der beschriebenen Produktionsdrehscheibe sowie die einzelnen Transportschritte, die inklusive Planungsvorlauf über zehn Wochen beanspruchen.

Da auf den internationalen Lieferrelationen teilweise sehr variantenreiche und kostenintensive Teile transportiert werden, ist es nicht wirtschaftlich, Bedarfsschwankungen über hohe Sicherheitsbestände auszugleichen. Auf der anderen Seite führen kurzfristige Anpassungen im Auftragsabwicklungsprozess (Änderungen in der Programmplanung oder Auftragsanpassungen) oder Schwankungen in den Prozessdurchlaufzeiten (Störungen im Prozess) zu mitunter erheblichen Abweichungen zwischen ursprünglich geplanten Bedarfen bzw. Bedarfszeitpunkten und den tatsächlichen Materialzuläufen aus den internationalen Lieferrelationen. Um dieser Herausforderung zu begegnen, bedarf es einer Planungsmethodik, welche die Auswirkungen von Engpässen und stochastischen Einflüssen im dynamischen Materialfluss globaler Lieferketten bewertet und diese mit der



**Abb. 16.2** Volkswagen Nutzfahrzeuge ( VWN) Amarok Drehscheibe

sich verändernden Systemlast (Bedarfe, Bedarfszeitpunkte, Produktion oder Kunde) abgleicht. Ziel ist es, Kunden eine hohe Variantenvielfalt bei kurzen Lieferzeiten zu ermöglichen, Unter- bzw. Überdeckungen rechtzeitig zu identifizieren und geeignete Maßnahmen abzuleiten.

### 16.4.2 Simulationsbasierte Planung globaler Lieferrelationen

Um die Abhängigkeiten und stochastischen Einflüsse analysieren zu können, ist die Simulation ein geeignetes Werkzeug. Dabei werden die dynamischen Abläufe in den internationalen Logistikrelationen mittels Materialflusssimulation abgebildet und in die übergeordneten Auftragsabwicklungsprozesse integriert. Das dafür geeignete Werkzeug OTD-NET wurde bereits in den vorherigen Kapiteln vorgestellt und kommt auch in diesem Anwendungsfall zum Einsatz. Ziel ist es, den Planern in der Lieferkette ein simulationsbasiertes Entscheidungsunterstützungswerkzeug bereitzustellen, welches

- das Material im Zulauf simuliert,
- resultierende Materialzugänge am Bedarfsort aufzeigt und somit Aussagen über Teileverfügbarkeiten ermöglicht (Available-to-Promise – ATP) (vgl. Toth und Wagenitz 2009, S. 55 ff.) und
- diese gegen die sich verändernden Bedarfe und Bedarfszeitpunkte spiegelt.

Das OTD-NET-Grundmodell bildet alle Prozesse (Transporte, Lagerung, Durchlaufzeiten, Fahrpläne, Kapazitäten) der internationalen Lieferrelationen ab und importiert den aktuellen Zustand der Lieferkette hinsichtlich der Bestände und Transporte aus zahlreichen Volkswagen- und Partnersystemen. Somit ist der Status Quo der Lieferkette in einem zentralen Datenmodell abgebildet und die Simulation des Materialflusses kann mit einem „vorgefüllten“ Modell starten. Im Rahmen der Simulation werden ausgehend vom Status Quo die nachfolgenden Prozesse simuliert und der resultierende Materialzulauf in den Produktionsstandorten aufgezeigt. Verspätungen (z. B. aufgrund von verpassten oder verspäteten Transporten) und deren Auswirkungen im dynamischen Prozess werden direkt sichtbar und können dem Planer hinsichtlich Ursache und Ausmaß aufgezeigt werden. Diese sogenannte ATP-Funktionalität zeigt die tatsächliche, unter aktuellen dynamischen Gesichtspunkten berechnete Liefertreue und erlaubt es dem Planer, weitergehende Szenarien mit unterschiedlichen stochastischen Einflüssen zu simulieren. Somit kann der Materialzulauf auch für Worst-Case-Szenarien abgebildet und Auswirkungen können direkt analysiert werden.

Eine Besonderheit von OTD-NET ist die Kopplung aus Prozess- und Materialflusssimulation entlang des Auftragsabwicklungsprozesses. In diesem Beispiel bringt erst das Zusammenspiel zwischen Bedarfsmanagement und Materialfluss den entscheidenden Vorteil für die Planung. Hierfür werden die Kundenaufträge für den Volkswagen Nutzfahrzeuge Amarok importiert. Mittels Stücklistenauflösung und Terminierung für die Montage können exakte Bedarfszeitpunkte für die Produktion berechnet werden. Dabei werden Änderungen in der Produktionsprogrammplanung ebenso berücksichtigt wie Anpassungen bei den Eigenschaften der Kundenaufträge.

Liegt eine aktuelle Auftragslast vor, wird diese, bezogen auf die aus dem terminierten Produktionsplan berechneten Bedarfszeitpunkte, gegen das verfügbare Material aus der Lieferkette gespiegelt und potenzielle Unterdeckungen werden frühzeitig sichtbar. Über ein einfaches Ampelsystem erkennt der Planer direkt, in welcher Planungswoche, an welchem Tag eine Über- oder Unterdeckung für ein bestimmtes Teil droht und welches Ausmaß diese hat. Der Planer sieht Abweichungen über den gesamten Planungshorizont und kann darauf basierend Bedarfe neu planen oder Kapazitäten neu dimensionieren. Die durch die frühzeitige Planung gewonnene Zeit kann genutzt werden, um kosteneffiziente Maßnahmen zu wählen und teure Sondertransporte zu vermeiden.

Sobald eine Maßnahme identifiziert und ausgestaltet wurde, kann ihre Wirksamkeit in einem Simulationslauf verifiziert werden. Hiermit werden ggf. unerwünschte Wechselwirkungen transparent, Bestände sichtbar und resultierende Kosten können ausgewiesen werden. Eine derartige, Szenario-basierte Planung des Auftragsabwicklungsprozesses ist heute mit den herkömmlichen Planungssystemen nicht möglich.

Diese unter normalen Umständen nur in verschiedenen Leitsystemen und Excel-Anwendungen der Automobilhersteller abgebildete Logik wird durch das hier beschriebene Assistenzsystem unterstützt und ermöglicht dadurch eine Ad-hoc-Planung neuer Auftragsszenarien in Kombination mit aktuellen Materialflussszenarien.

Hiermit steht erstmals ein ganzheitliches und durchgängiges Planungswerkzeug zur Verfügung, mit welchem die Planer unterschiedlicher Abteilungen die Einflüsse ihrer Planung auf den Auftragsabwicklungsprozess bewerten und gemeinsam (kollaborativ) Szenarien untersuchen können, um für alle Parteien bestmögliche Lösungen zu finden.

Während eine derartige Entscheidungsunterstützung schon bei herkömmlichen internationalen Lieferrelationen großen Nutzen bietet, sind die Potenziale bei Produktionsdreh scheiben nochmals höher. Eine Produktionsdreh scheibe ist eine besondere Art des Produktionsnetzwerks. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass das gleiche Endprodukt an mehreren Standorten gefertigt werden kann und die Lieferanten entweder mehrere Werke gleichzeitig beliefern oder ebenfalls an unterschiedlichen Standorten angesiedelt sind. Dabei steigt die Planungs- und Steuerungskomplexität bei gleichzeitig neuen Potenzialen, auf Engpässe reagieren zu können. So können z. B. Transporte umgeleitet oder Kapazitäten zwischen den Standorten verschoben werden. Gleichzeitig konkurrieren aber mehrere Senken um die gleichen Kapazitäten, wodurch die Anzahl möglicher Maßnahmen inklusive ihrer Auswirkungen erheblich ansteigt.

Die dargestellte Methodik bietet hier einen vielversprechenden Lösungsansatz. Sie wird durch Volkswagen Nutzfahrzeuge erfolgreich betrieben sowie in Richtung Produktionsdreh scheiben kontinuierlich weiterentwickelt.

---

## 16.5 Fazit

Die ereignisdiskrete Simulation verfügt über hohe Potenziale in der Planung und Steuerung des automobilen Auftragsabwicklungsprozesses und globaler Lieferketten. Der der Simulation zugrunde liegende Ansatz der Modellbildung sorgt durch die Integration verschiedenster Informationen (unterschiedlichster Partner in der Lieferkette) für ein hohes Maß an Transparenz. Sofern auch aktuelle Zustandsinformationen integriert werden, wird ebenfalls eine hohe Transparenz der Lieferkette erreicht. Der größte Vorteil der Simulation in der Planung und Steuerung von Lieferketten aber ist die Fähigkeit zur Projektion des zukünftigen Systemverhaltens.

Die Methode der Simulation als Vorschaukomponente in einem durchgängigen System in betriebsbegleitend genutzten Systemen zur Lieferkettenplanung und -steuerung, wie sie zuvor für das BKM und die ATP-Planung beschrieben wurden, kann dazu beitragen, Entscheidungs-(vorlauf-)zeit in der Lieferkette zu gewinnen. So kann die Flexibilität der Lieferkette durch frühzeitiges Erkennen, schnelles Planen und abgesichertes Entscheiden gesteigert und dementsprechend das erzielbare Service-Level gegenüber dem Kunden bei gleichbleibenden Kosten gesteigert werden.

Die in unmittelbarer Zukunft zu erwartende weitere Leistungssteigerung der IT-Systeme ermöglicht die Integration der beiden oben dargestellten Lösungen. Damit ließe sich für die vollständige Produktpalette auch sehr großer Automobilhersteller nicht nur, wie geschildert, der BKM-Prozess unterstützen, sondern darüber hinaus auch noch die Versorgung für wichtige Teileumfänge sicherstellen, wie im zweiten Anwendungsfall für den VW Amarok geschildert.

## Literatur

- Baumgarten H (1996) Trends und Strategien in der Logistik 2000. Technische Universität Berlin, Berlin
- Bockholt F (2012) Operatives Störungsmanagement für Globale Logistiknetzwerke. Ökonomie- und Ökologieorientiertes Referenzmodell für den Einsatz in der Automobilindustrie. Praxiswissen, Dortmund
- Christopher M (2000) The agile supply chain: competing in volatile markets. *Industrial Marketing Management* 29:37–44
- Gebhardt J, Detmer H, Madsen AL (2003) Predicting parts demand in the automotive industry – an application of probabilistic graphical models. Bayesian modelling applications workshop. In: Meek C, Kjaerulff U (Hrsg) Proceedings international joint conference on uncertainty in artificial intelligence, Acapulco, Mexico. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco
- Henke M, Motta M (2014) IT im Supply Chain Management – Logistische Assistenzsysteme als Ansatz zur Steigerung der Supply Chain Agilität. In: Kille C (Hrsg) Navigation durch die komplexe Welt der Logistik. Springer Gabler, Wiesbaden, S 153–169
- Holweg M (2008) The evolution of competition in the automotive industry. In: Parry G, Graves A (Hrsg) Build to order. The road to the 5-day car. Springer, London, S 13–34
- Klingebiel K (2009) Entwurf eines Referenzmodells für Built-to-Order-Konzepte in Logistiknetzwerken der Automobilindustrie. Dissertation, Technische Universität Dortmund
- Klingebiel K, Toth M, Wagenitz A (2010) Logistische Assistenzsysteme. In: Pradel U (Hrsg) Praxishandbuch Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungsunternehmen. Deutscher Wirtschaftsdienst, Köln. (Abschnitt 2.2.10)
- Klingebiel K, Hackstein L, Cirullies J, Parlings M, Hesse K, Hohaus C, Jung EN (2014) Ressourceneffiziente Logistik. Strategien und Betrieb. In: Neugebauer R (Hrsg) Handbuch Ressourceneffiziente Produktion. Hanser, München, S 719–748
- Klug F (2010) Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Springer, Berlin
- Kuhn A (1995) Prozeßketten in der Logistik. Praxiswissen, Dortmund
- Kuhn A, Hellingrath B (2002) Supply Chain Management. Springer, Berlin
- Kuhn A, Toth M (2008) Assistenzsysteme für die effektive Planung logistischer Netzwerke. In: Scholz-Reiter B (Hrsg) Technologiegetriebene Veränderungen der Arbeitswelt. GITO, Berlin
- Liebler K, Beisert U, Motta M, Wagenitz A (2013) Introduction to OTD-NET and LAS: order-to-delivery network simulation and decision support systems in complex production and logistics networks. In: Pasupathy R, Kim SH, Tolk A, Hill R, Kuhl ME (Hrsg) Proceedings of the 2013 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 439–451
- Schumacher R, Wenzel S (2000) Der Modellbildungsprozess in der Simulation. In: Wenzel S (Hrsg) Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. SCS Europe, Ghent, S 5–11
- Sharman G (1984) The rediscovery of logistics. *Harvard Business Review* 62:71–80
- Sillekens T (2008) Aggregierte Produktionsplanung in der Automobilindustrie unter besonderer Berücksichtigung von Personalflexibilität. Dissertation, Universität Paderborn
- Stäblein T (2008) Integrierte Planung des Materialbedarfs bei kundenauftragsorientierter Fertigung von komplexen und variantenreichen Serienprodukten. Dissertation, Technische Universität Clausthal
- Toth M, Wagenitz A (2009) Neue Wege für die effektive Planung logistischer Netzwerke – Dynamische Verfügbarkeitsplanung mit Hilfe von Assistenzsystemen. *Industrie Management* 25:55–58
- VDI (2000) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 5: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen – Integration der Simulation in die betrieblichen Abläufe. Beuth, Berlin
- Wagenitz A (2007) Modellierungsmethode zur Auftragsabwicklung in der Automobilindustrie. Dissertation, Technische Universität Dortmund

- Wagner H (2006) Kollaboratives Bedarfs- und Kapazitätsmanagement am Beispiel der Automobilindustrie: Lösungsansatz zur Sicherstellung der Wandlungsfähigkeit. Huss, München
- Zernechel T (2007) Gestaltung und Optimierung von Unternehmensnetzwerken – Supply Chain Management in der Automobilindustrie. In: Garcia F, Semmler K, Walther J (Hrsg) Die Automobilindustrie auf dem Weg zur globalen Netzwerkkompetenz – Effiziente und flexible Supply Chains erfolgreich gestalten. Springer, Berlin, S 367–378



**Prof. Dr.-Ing. Axel Wagenitz** Studierte Informatik an der Universität Bremen und ist seit 1996 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML). Er promovierte an der TU Dortmund zum Dr.-Ing. und leitete bis 2011 die Abteilung Supply Chain Engineering, für die er auch nach seinem Wechsel an die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (Lehrgebiet Wirtschaftsinformatik) weiter beratend tätig ist. Axel Wagenitz ist Mitbegründer und Gesellschafter der LogProIT GmbH.



**Prof. Dr.-Ing. Katja Klingebiel** Nach dem Studium der Wirtschaftsmathematik an der Universität Dortmund wissenschaftliche Mitarbeiterin von 2000 bis 2006 am Lehrstuhl für Fabrikorganisation der Universität Dortmund und am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund. Anschließend als Managerin für die Business Services Simulation & Research bei der ebp Consulting GmbH, Stuttgart tätig. Nach der Promotion an der Fakultät für Maschinenbau der TU Dortmund erfolgt in 2009 die Rückkehr zum Lehrstuhl für Fabrikorganisation und zum Fraunhofer IML als Leiterin des Grundlagenforschungszentrums Assistenzsysteme. Seit 2013 an die Fachhochschule Dortmund berufen als Professorin für das Lehrgebiet BWL, insb. Wirtschaftsmathematik und Logistik.



**Prof. Dr.-Ing. Michael Toth** Studium der Wirtschaftsinformatik an der Universität Paderborn und Promotion zum Doktor-Ingenieur an der TU Dortmund. Zwischen 2003 und 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter und ab 2011 Leiter der Abteilung Supply Chain Engineering am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund (Schwerpunkte: Supply Chain Management, logistische Assistenzsysteme und Simulation). Zudem Mitbegründer des Logistik- und IT-Beratungsunternehmens LogProIT GmbH (logistics processes & IT consulting) sowie Geschäftsführer des Unternehmens in den Jahren 2009 bis 2011. Seit Februar 2013 Professor für Produktionsmanagement und Logistik an der Hochschule Bochum.



**Marco Motta** Studium des Maschinenbaus an der TU Dortmund. Seit 2004 Mitarbeiter und seit 2013 Leiter der Abteilung Supply Chain Engineering am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund (Schwerpunkte: Supply Chain Management, logistische Entscheidungsunterstützung in Supply Chains und Simulation). Zudem Mitbegründer des Logistik- und IT-Beratungsunternehmens LogProIT GmbH (logistics processes & IT consulting) sowie Geschäftsführer des Unternehmens in den Jahren 2009 bis 2014. Seit 2013 Leiter des Geschäftsfeldes Planung, Steuerung und Logistik in der Fraunhofer Allianz Automobilproduktion. Dozent für Supply Chain Management und Logistik im Verbundstudium Wirtschaftsinformatik der Fachhochschulen Dortmund & Köln.



**Dirk Weibels** Seit der Ausbildung zum Werkzeugmacher 1983–1986 tätig bei Volkswagen Nutzfahrzeuge. Auf den staatlich geprüften Maschinenbau-Techniker im Jahr 1986–1990 folgte ein Studium der Wirtschaftsinformatik an der Verwaltungs- und Wirtschaftsakademie, das er 1995 erfolgreich abschloss. 1996–2005 Aufbau und Leitung der Markenprogrammplanung. 2005 Übernahme der Leitung der Marken-Disposition sowie des Bedarfs- und Kapazitätsmanagements von Volkswagen Nutzfahrzeuge.



# Simulation von Lieferantennetzwerken: Grundlagen und Anwendungen bei der ZF Friedrichshafen AG

# 17

Kai Gutenschwager und Philipp Arnold

## 17.1 Einleitung

Die explizite Auseinandersetzung mit der Planung und Steuerung der Aufbau- und Ablauforganisation von Lieferketten kann wesentliche Optimierungspotenziale für Unternehmen aufdecken. Viele Werkzeuge des Supply Chain Managements setzen hier auf einem vergleichsweise hohen Aggregationsgrad auf, um beispielsweise mit Hilfe mathematischer Modelle geeignete Strukturen von Lieferketten zu bestimmen. Dieser hohe Aggregationsgrad kann aber durchaus zu Fehleinschätzungen führen, da insbesondere dynamische Zusammenhänge und stochastische Einflüsse vernachlässigt werden, die das Wesen von Lieferketten ausmachen. Daher sind weiterführende Analysen von Liefernetzwerken, die auch dynamische Zusammenhänge und stochastische Einflüsse berücksichtigen, sinnvoll. Die ereignisdiskrete Simulation ermöglicht die hierfür notwendige Abbildung von Zufälligkeiten. Hierzu gehören beispielsweise Störgrößen wie Nachfrageschwankungen, Maschinenausfälle oder Transportverzögerungen, die jeweils als externe Einflüsse zu betrachten sind. Die Berücksichtigung solcher Einflüsse dient dazu, die Robustheit geplanter Lieferketten geeignet beurteilen sowie die Kosten für verschiedene Netzwerkkonfigurationen zur Erreichung eines vorgegebenen Lieferservicegrades abschätzen zu können.

In diesem Beitrag werden zunächst typische Problemstellungen und Ziele sowie Werkzeuge der Supply Chain Simulation thematisiert. Der anschließende Abschn. 17.4 befasst

---

K. Gutenschwager (✉)

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Institut für Information Engineering,  
Wolfenbüttel, Deutschland

E-Mail: [k.gutenschwager@ostfalia.de](mailto:k.gutenschwager@ostfalia.de)

P. Arnold

ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen, Deutschland

sich dann mit einem Beispielprojekt der ZF Friedrichshafen AG. Die ZF Friedrichshafen AG ist ein deutscher Automobilzulieferer und gehört mit einem Umsatz von knapp 37 Mrd. Euro und ca. 149.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zu den weltweit führenden Zulieferern in der Mobilitätstechnik (ZF Friedrichshafen AG 2019). Zum ZF Konzern gehören über 230 Produktionsstandorte in 40 Ländern, woraus weltweite Liefernetzwerke resultieren. ZF setzt die ereignisdiskrete Simulation u. a. zur Beurteilung neu aufzubauen-der Lieferketten ein.

---

## 17.2 Anwendungsbereiche und Zielsetzungen

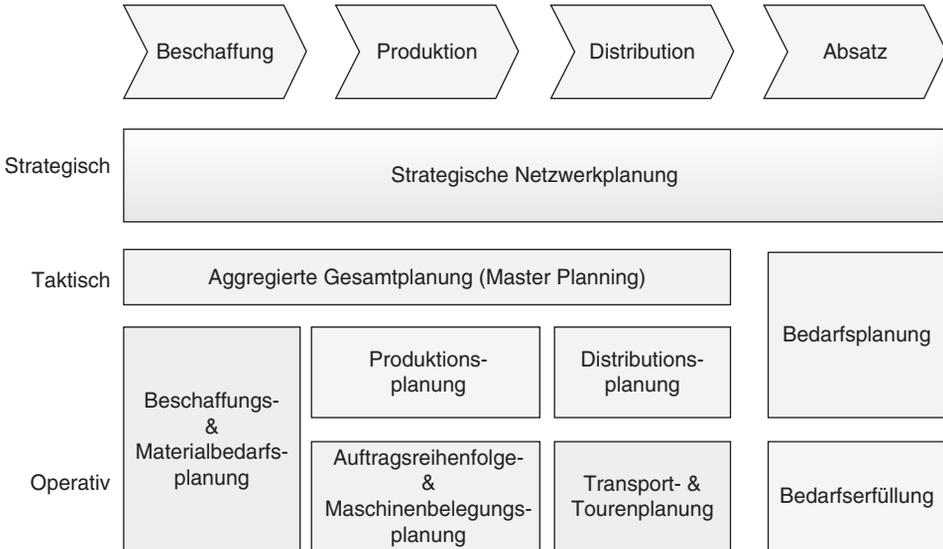
Im Verständnis der allgemeinen Definition des Supply Chain Managements als „integration of key business processes from end user through original suppliers that provides products, services, and information that add value for customers and other stakeholders“ (Lambert und Cooper 2000, S. 66) sind die Problemstellungen, die mittels Simulation angegangen werden können, in aller Regel dem Bereich des Supply Chain Designs zuzuordnen. Die Zielsetzung des Supply Chain Designs besteht typischerweise in einer Gesamtkostenminimierung. Auch umweltspezifische Zielgrößen, beispielsweise der CO<sub>2</sub>-Ausstoß, finden sich als weitere Zielgröße in einigen Publikationen, siehe z. B. Rabe et al. (2013). Die Größe des Lieferservicegrads wird in aller Regel als Restriktion definiert.

Eine geeignete Basis zur Klassifikation der einzelnen Problemstellungen, die mittels der Supply Chain Simulation untersucht werden können, bildet die Supply Chain Matrix (Meyr et al. 2008; Stadler 2005), die eine strategische, taktische sowie operative Ebene für die einzelnen Planungsaufgaben unterscheidet und die relevanten Informationsflüsse zwischen den einzelnen Aufgaben darstellt (siehe Abb. 17.1).

Auf der obersten Ebene, der strategischen Netzwerkplanung, werden die Strukturen von Lieferketten festgelegt. Typische Problemstellungen auf dieser Ebene sind:

- Auswahl eines oder mehrerer zentraler Produktions- und Lagerstandorte bei gegebener Kundenstruktur,
- Bestimmung der optimalen Anzahl Ressourcen (z. B. Fertigungslinien oder Maschinen) und Zuordnung zu Produktionsstätten,
- Bestimmung der optimalen Zuordnung von Produkten oder einzelnen Arbeitsgängen zu Standorten bzw. Ressourcen unter Berücksichtigung notwendiger Logistikprozesse,
- Bewertung verschiedener Beschaffungsstrukturen (z. B. globale versus lokale Beschaffung).

In diesem Umfeld kommen häufig mathematische Optimierungsmodelle zum Einsatz. Allerdings sind diese Modelle zumeist soweit aggregiert, dass die eigentlichen Prozesse innerhalb der Lieferketten nicht abgebildet werden. So geht beispielsweise auch der Lieferservicegrad weder als Zielgröße noch als Restriktion in entsprechende Modellformulierungen ein. Um für diese Größe Aussagen machen zu können, sind Problemstellungen auf



**Abb. 17.1** Supply Chain Planungsmatrix in Anlehnung an Meyr et al. (2008)

der taktischen und operativen Ebene zu betrachten. Ausgehend von der Bedarfsplanung betrifft dies insbesondere die aggregierte Gesamtplanung (Master Planning), deren Ziel darin besteht, die Kundenbedarfe mit den zur Verfügung stehenden Kapazitäten auszubalancieren. Dabei sind neben der Festlegung von Produktionsmengen auch die Bestellmengen (grob) zu planen, womit sich auch eine Abstimmung mit Partnern entlang der Lieferkette ergibt. Typische Problemstellungen auf dieser Ebene sind:

- Bestimmung optimaler Losgrößen für Produktion und Transport,
- Festlegung geeigneter Bestellpolitiken,
- Bestimmung optimaler Sicherheitsbestände, um vorgegebene Lieferservicegrade zu erfüllen,
- Festlegung von Anlieferungszyklen oder festen Auslieferungstouren.

Auf operativer Ebene (Shop Floor) wird schließlich auf den Ergebnissen der Gesamtplanung aufgesetzt und eine Feinplanung durchgeführt, die produktionsseitig eine Auftragsreihenfolge- und Maschinenbelegungsplanung sowie distributionsseitig eine Tourenplanung beinhalten können. Eine ähnliche Darstellung der Planungsprobleme sowie ihrer logischen und zeitlichen Abhängigkeiten in der Produktion findet sich in Gierth und Schmidt (2006).

Für die Supply Chain Simulation ist die Ebene der innerbetrieblichen Materialflüsse (und die entsprechende Feinsteuerung) typischerweise nur von nachrangigem Interesse und wird deshalb zumeist nur grob abgebildet. Vielmehr geht es um die Abbildung der relevanten Planungs- und Bestellverfahren und die Modellierung der zugehörigen Informationsprozesse. Diese Modelle können somit der weiteren Analyse von Design-Varianten

aus der Netzwerkplanung dienen. Die Netzwerkplanung an sich sollte jedoch nicht allein mit einer Supply Chain Simulation angegangen werden. Hier lassen sich für die Standort-, Ressourcen- und Produktallokationsplanung mittels mathematischer Modelle zumeist gute Ausgangslösungen bestimmen, die aber bezüglich der weiteren Zielgrößen, insbesondere der Lieferservicegrade, weiter zu analysieren sind, bevor sie umgesetzt werden. Mit Hilfe der Simulation können verschiedene Design-Varianten aber auf Basis gegebener Strukturen sowie der zum Einsatz kommenden Produktions- und Beschaffungsstrategien auf Prozessebene miteinander verglichen werden. In diesem Planungsschritt kann zwar wiederum auf analytische Lösungsverfahren zurückgegriffen werden, für die Bewertung von Zusammenhängen einzelner Planungsergebnisse und stochastischer Einflüsse ist aber in aller Regel die Simulation unumgänglich. Mögliche Fragestellungen sind dabei die Dimensionierung von Bestandsreichweiten, die Ermittlung geeigneter Transportlösungen (Anlieferungszyklen, Mindestbestellmengen, Lieferlosgrößen, Transportmodi), die Dimensionierung von Produktionsressourcen sowie beispielsweise die Bestimmung der notwendigen Behälteranzahl bei Verwendung von Spezialbehältern. Das Ergebnis dieses Schrittes im Planungsprozess kann durchaus sein, dass eine Design-Variante, die laut aggregiertem Optimierungsmodell das beste Ergebnis liefert (z. B. bezüglich der durchschnittlichen Transportkosten), eher unterdurchschnittlich zu bewerten ist, da hier vergleichsweise hohe Sicherheitsbestände vorzuhalten sind, um Schwankungen in den Transportzeiten abzufedern.

Die Anwendung und der Nutzen der Supply Chain Simulation zur Unterstützung bei der Festlegung der Beschaffungsstruktur wird in Abschn. 17.4 an einem Praxisbeispiel der ZF Friedrichshafen AG im Bereich Beschaffung dargestellt. Darüber hinaus wird bei der ZF Friedrichshafen AG die Supply Chain Simulation bisher punktuell für Problemstellungen aus dem Bereich operatives Bestandsmanagement in Supply Chains (Dimensionierung von Sicherheitsbeständen, Bestimmung von Transportzyklen) sowie zur transparenten Darstellung der Wirkungszusammenhänge mehrerer stochastischer Einflüsse wie z. B. volatile Nachfrage und Verzögerungen in der Wiederbeschaffung eingesetzt.

Über die bisher genannten Nutzenpotenziale hinaus kann die Simulation den Anlauf von Lieferketten beschleunigen. Fehler in der Netzwerkkonfiguration können vor dem realen Anlauf der Lieferkette mittels Simulation ermittelt und eliminiert werden. Des Weiteren kann ein Simulationsmodell im operativen Betrieb eingesetzt werden (Prognosefunktion der Simulation), um z. B. Steuerungsentscheidungen hinsichtlich ihrer Auswirkungen vorab zu prüfen.

---

### 17.3 Simulationsmethoden und -werkzeuge

Für die Simulation von Lieferketten lassen sich verschiedene Methoden einsetzen (Angehofer und Angelides 2000; Kleijnen 2005). System Dynamics wird typischerweise bzgl. strategischer Fragestellungen genutzt, während die ereignisdiskrete Simulation zumeist für Problemstellungen auf operativer und taktischer Ebene eingesetzt wird (Tako und Robinson

2012). In Terzi und Cavaliere (2004) findet sich eine vergleichende Übersicht bezüglich der Ziele und eingesetzten Werkzeuge im Rahmen der Supply Chain Simulation.

Einige dieser Werkzeuge bieten spezifische Klassenbibliotheken oder Bausteinkästen an, mittels derer die wesentlichen Elemente von Lieferketten abgebildet werden können, wie z. B. Lager- und Produktionsstandorte, Hubs, Kunden (zur Nachfragegenerierung), Transportverbindungen sowie insbesondere Planungsverfahren (Prognose-, Produktions-, Beschaffungs- und Distributionsplanung). Die abgebildeten Prozesse orientieren sich dabei oftmals am Supply-Chain-Operations-Reference-Modell (Supply Chain Council 2010). Beispiele, die im deutschsprachigen Raum eine relativ hohe Verbreitung haben, sind Anylogic (XJ Technologies), Arena (Rockwell Automation), Enterprise Dynamics (Incontrol), FlexSim (FlexSim Software Products), Tecnomatix Plant Simulation (Siemens) und Witness (Lanner Simulation Technology). Die meisten dieser Werkzeuge setzen auf objektorientierten Modellierungsansätzen auf, wobei jeder Baustein (Objekt), wie z. B. ein Lager, innerhalb der Modellierungsumgebung zu parametrisieren ist. Um Daten zu importieren sowie Ergebnisse zu sichern, können typischerweise Schnittstellen zu gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen sowie Datenbanksystemen genutzt werden, wobei die eigentlichen Import- und Exportmethoden zumeist eigenhändig im Rahmen der Modellerstellung zu programmieren sind.

Eines der ersten speziellen Simulationswerkzeuge für Lieferketten ist der IBM Supply Chain Analyzer (Bagchi et al. 1998). Ein speziell für Daimler entwickeltes Werkzeug stellt der Supply Net Simulator (SNS) dar (Baumgärtel et al. 2007). Dieses Werkzeug wurde in diversen Daimler internen Projekten eingesetzt. Auch hier existiert eine Reihe von Bausteinen, die zu komplexen Modellen kombiniert werden können. OTD-NET (Order-To-Delivery-NETwork) des Fraunhofer-Institutes für Materialfluss und Logistik stellt ein weiteres spezielles Werkzeug der Supply Chain Simulation dar, das insbesondere in der Automobilindustrie seit vielen Jahren eingesetzt wird; für ein Praxisbeispiel siehe Motta et al. (2008). Weitere Simulationswerkzeuge für die Analyse von Lieferketten sind Simio der Firma Simio LCC und SCOT der Firma SDZ GmbH.

Neben diesen Werkzeugen existieren auch allgemeinere Werkzeuge für die Planung von Lieferketten, deren ursprünglicher Funktionsumfang sich auf Verfahren der mathematischen Optimierung sowie entsprechender Heuristiken – insbesondere für die strategische Netzwerkplanung (Vahrenkamp und Mattfeld 2013) – beschränkte. Zu dieser Gruppe von Werkzeugen gehören beispielsweise 4flow vista der Firma 4flow, der Logistics Designer der LOCOM Software GmbH sowie der Supply Chain Guru der Llamasoft, Inc. Diese bieten mittlerweile Komponenten der ereignisdiskreten Simulation, um zusätzlich auch das dynamische Verhalten von Lieferketten analysieren zu können.

SimChain, mit dem die Fallstudie im folgenden Abschnitt erstellt wurde, ist ein Simulationswerkzeug der Firma SimPlan AG, das ursprünglich als Bausteinbibliothek für Tecnomatix Plant Simulation unter dem Namen ICON-SimChain entwickelt (Alicke und Gutenschwager 2004) und in einer Vielzahl von Projekten – insbesondere in der Automobilindustrie – eingesetzt wurde (Fechteler und Gutenschwager 2014). In den ersten Versionen erfolgte die Datenmodellierung unter Verwendung der internen Datenstrukturen von

Plant Simulation; diese wurde dann aber auf eine MySQL-Datenbank umgestellt. Das Werkzeug stellt damit ein rein generisches Simulationsmodell dar, welches unter anderem von der ZF Friedrichshafen AG eingesetzt wird. Für das Anlegen von Szenarien steht mittlerweile auch ein Web-Frontend zur Verfügung, so dass das Werkzeug als Cloud-Dienst genutzt werden kann.

---

## 17.4 Anwendungsbeispiel – Beschaffungsplanung

In diesem Abschnitt wird eine typische Fallstudie der ZF Friedrichshafen AG vorgestellt, die sich mit der Analyse verschiedener Beschaffungsstrategien befasst. Betrachtungsgegenstand ist die Belieferung eines Nutzfahrzeugmarktes in Übersee. Der dortige ZF-Standort wird heutzutage neben lokalen auch von weltweit ansässigen Lieferanten beliefert. Das führt zu langen Lieferketten, deren Lieferzeiten um ein Vielfaches höher sind als die Fixierungshorizonte der Kunden. Diese Differenz kann sowohl zu Produktionsengpässen als auch zu Überbeständen führen, ohne dass der Kunde zufriedenstellend beliefert wird. Die resultierende mangelnde Flexibilität soll mithilfe einer Simulationsstudie untersucht werden. Diese Simulationsstudie vergleicht die zwei Strategien *lokale* und *globale Beschaffung* und legt den Fokus auf die Gesamtkostenoptimierung der Supply Chain. Des Weiteren sollen die Einflüsse verschiedener Strategien auf die Bestände dargestellt werden.

### 17.4.1 Betrachtungsrahmen der Simulationsstudie

In der vorliegenden Simulationsstudie wird die Supply Chain der 1-tier Lieferanten zum ZF-Standort inklusive der größten Kunden betrachtet. Der Fokus der Studie liegt auf der langen Lieferzeit der Überseelieferanten. Deshalb werden nur die Lieferanten, deren Lieferzeit größer als zehn Tage ist, in der Studie berücksichtigt. Innerhalb dieser ausgewählten Lieferantengruppe gibt es sowohl externe Lieferanten (keine ZF-Standorte) als auch interne Lieferanten (ZF-Standorte). Es werden zudem nur zwei Produkte der gleichen Produktfamilie und ihre Stücklisten betrachtet. Diese zwei Einschränkungen reduzieren das Datenvolumen und ermöglichen, dass zum einen die Dauer der Simulationsläufe reduziert werden kann und zum anderen die Komplexität beherrschbar bleibt, ohne dabei die ursprüngliche Fragestellung aus dem Fokus zu verlieren.

Abb. 17.2 zeigt den Betrachtungsrahmen der Simulationsstudie, die den ZF-Standort mit allen 1-tier Lieferanten, deren Lieferzeit größer als zehn Tage ist, bis zu den Kunden, hier mehrere Original Equipment Manufacturers (OEM), der ausgewählten Produkte beinhaltet. Mögliche Lieferengpässe in den Vorstufen der kompletten Supply Chain (z. B. vom 2-tier Lieferanten zum 1-tier Lieferanten) werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.



**Abb. 17.2** Betrachtungsrahmen der Simulationsstudie

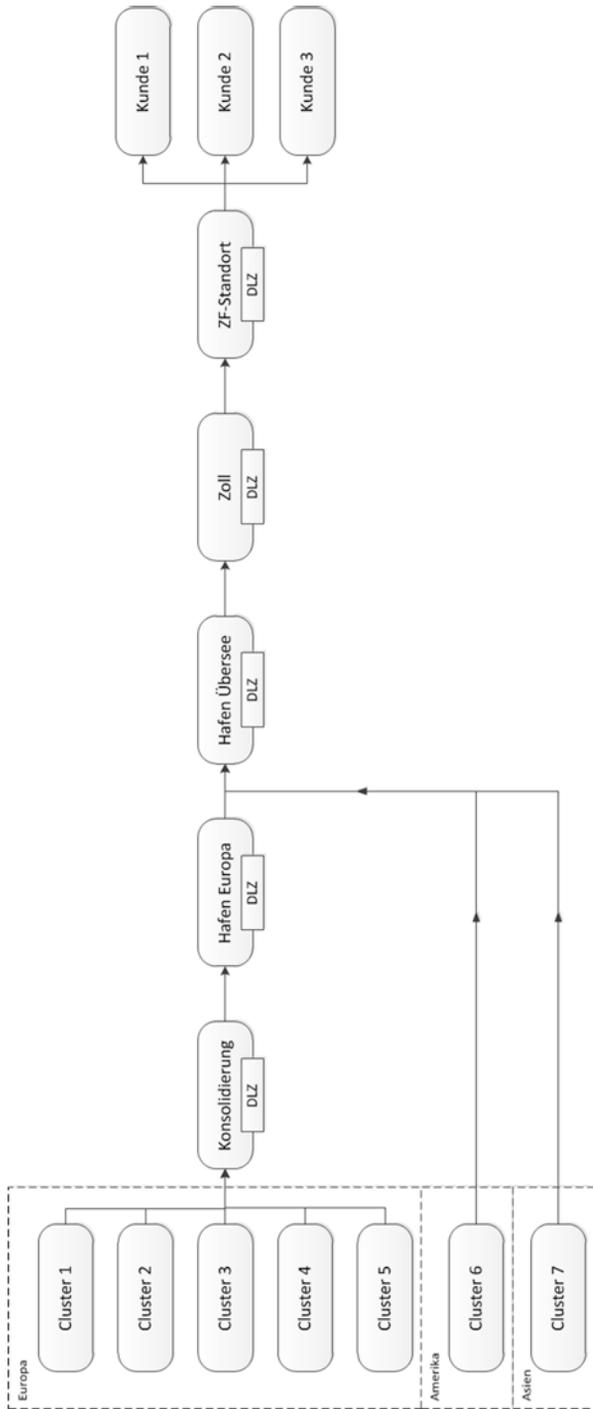
### 17.4.2 Datenbeschaffung und -aufbereitung

Für die Supply Chain Simulation stellt die Datenbeschaffung und -aufbereitung typischerweise eine große Herausforderung dar, da ggf. Daten verschiedener Teilnehmer der Kette zusammenzutragen, abzugleichen und auf einheitliche Datenformate zu transformieren sind. Im Rahmen der Datenbeschaffung und -aufbereitung sind in der Fallstudie die folgenden Schritte notwendig:

1. Beschaffung aller Lieferanten zur ausgewählten Produktstückliste
2. Detaillierte Abbildung der Supply Chain Struktur
3. Beschaffung der Nachfrage- und Prognosedaten der Kunden
4. Beschreibung der Unsicherheiten in der Supply Chain

Im ersten Schritt werden die Lieferanten aller Teile der zwei ausgewählten Stücklisten identifiziert, deren Lieferzeit größer als zehn Tage ist. Für diese Studie ergeben sich 38 verschiedene Lieferanten, die insgesamt 186 Teile zum ZF-Standort liefern. Diese 38 Lieferanten werden nach Lieferzeit und Herkunft sortiert und gebündelt. Daraus ergeben sich sieben Lieferantencuster für die Simulationsstudie. Anschließend erfolgt die detaillierte Abbildung der Supply Chain Struktur inklusiver aller Hubs. Die Lieferungen der europäischen Lieferanten werden in Deutschland konsolidiert und anschließend vom europäischen Hafen nach Übersee verschifft. Alle weiteren nicht europäischen Lieferanten versenden ihre Teile direkt von entsprechenden Häfen nach Übersee. Vom dortigen Empfangshafen aus werden die Container verzollt und per Lkw zum ZF-Standort geliefert. Am ZF-Standort wird eine DLZ (Durchlaufzeit) für die Montage abgebildet und abschließend erfolgt die Lieferung zu den definierten Kunden.

Die in Abb. 17.3 abgebildete Supply Chain stellt das Ergebnis dieses Teils der Datenaufbereitung dar. Auf der linken Seite sind die sieben regional nach Kontinenten gebildeten Lieferantencuster zu sehen. Für alle direkten Verbindungen (Pfeile) ist eine entsprechende Lieferzeit als Verteilung in der Simulation hinterlegt. Außerdem werden für die Hubs innerhalb der Supply Chain Durchlaufzeiten, z. B. für das Be- und Entladen der Schiffe (als Verteilung), benötigt. Ein weiterer Punkt der Supply Chain Struktur sind die Lieferfrequenzen und Arbeitskalender der einzelnen Standorte. Für die Schiffe ist eine Abfahrt pro Woche an den Häfen vorgesehen. Für Lieferanten, Kunden, Zoll und ZF-Standort wird eine Fünf-Tage-Woche hinterlegt; alle Lkw können jeweils nur von Montag bis Freitag ankommen oder abfahren.



**Abb. 17.3** Abgebildete Supply Chain in der Simulationsstudie

Ziel der Analyse der historischen Nachfrage- und Prognosedaten der Kunden ist die Entwicklung eines Prognosemodells, das in SimChain umgesetzt werden kann. Dazu werden für den Zeitraum des vergangenen Jahres jeweils die wöchentlichen Prognosewerte der Kunden sowie die tatsächlichen Abrufmengen analysiert. Für die betrachteten Kunden gilt ein wöchentlicher Planungszyklus, der jeweils die Bedarfe der nächsten zwei Wochen abdeckt (rollierende Planung). Zusätzlich erfolgt eine monatliche Bedarfsprognose für die folgenden drei Monate.

Neben der prozentualen Abweichung von Prognosewert und tatsächlichem Abruf wird für jeden Planungszyklus und -horizont ausgewertet, mit welchem Prozentsatz die Prognose zu hoch oder zu niedrig ausfällt. Ein entsprechendes Wertepaar wird für alle Prognosewerte und tatsächlichen Bedarfe (unter weiterer Berücksichtigung des zeitlichen Abstands von Bedarfstermin und Prognosetermin) berechnet. Der Mittelwert aller Abweichungen ergibt dann die in der Simulationsstudie eingesetzte Abweichung für den jeweiligen Planungshorizont. Zusätzlich wird auch der prozentuale Anteil aller Prognosewerte, die höher als der tatsächliche Bedarf sind, für den jeweiligen Planungshorizont ermittelt und im Prognosemodell eingesetzt.

Tab. 17.1 zeigt für das Beispiel den wöchentlichen Planungszyklus für die ersten zwei Wochen (Tag 1–14) sowie die folgenden monatlichen Planungszyklen für die ersten drei Monate. Da der Fokus dieser Simulationsstudie auf den zeitlich langen Supply Chains liegt, sind vor allem die letzten beiden Zeilen des Prognosemodells wichtig, da sich die Lieferzeiten zum ZF-Standort in Übersee je nach Lieferant zwischen 40 und 70 Tagen bewegt. Diese beiden Zeilen zeigen eine relativ hohe Abweichung der Prognose vom tatsächlichen Bedarf, die tendenziell zu hoch ausfällt. Das bedeutet, dass der Transitbestand in der Regel höher als der tatsächliche Bedarf ist.

Wie aus dem gerade dargestellten Prognosemodell hervorgeht, beinhaltet dieses Modell Unsicherheiten über die Nachfragemenge. Des Weiteren existieren zeitliche Unsicherheiten im Beschaffungsprozess. Diese liegen einmal bei der Schiffsankunft (in 5 % aller Fälle kommt das Schiff zu spät im Hafen an) und bei der Zollabfertigung, bei welcher die Abfertigungszeiten zwischen drei und zehn Tagen schwanken. Diese Unsicherheit wird mittels einer Dreiecksverteilung (unter Angabe des Minimal-, Durchschnitts- und Maximalwertes) abgebildet.

**Tab. 17.1** Beispielhaftes Prognosemodell in SimChain

Zyklus Planung [Tage]	Von Tag	Bis Tag	Abweichung vom Ist [%]	Anteil Prognose zu hoch [%]
7	1	7	5	20
7	8	14	7	20
30	15	30	21	64
30	31	60	29	70
30	61	90	59	89

### 17.4.3 Numerische Ergebnisse

Insgesamt werden drei verschiedene Supply-Chain-Szenarien untersucht. Das erste Szenario bildet die aktuelle Situation ab und simuliert die Supply Chain bei *globaler Beschaffung*. Anschließend wird ein zweites Szenario gebildet, in welchem alle Teile lokalisiert werden. Dazu werden sieben neue Lieferantencluster gebildet, die alle (virtuelle) Standorte im Empfangsland haben. Diese sieben Lieferantencluster unterscheiden sich in ihrer Lieferzeit, die von einem bis zu sieben Tage reicht, wobei die Zuordnung der Teile zu den Lieferanten zufällig erfolgt. Das zweite Szenario kann als *lokale Beschaffung* beschrieben werden und stellt damit das direkte Gegenstück zum ersten Szenario dar. Des Weiteren wird als drittes Szenario eine Mischform aus den ersten beiden Szenarien simuliert (*globale und lokale Beschaffung*). Dazu werden die Lieferanten aus dem ersten Szenario nach internen (ZF-Standorte) und externen (nicht zu ZF gehörende) Lieferanten getrennt. Alle internen Lieferanten liefern ihre Teile wie bisher nach Übersee, womit für diese Teile weiterhin die lange Supply Chain existiert. Alle anderen Teile werden wie im zweiten Szenario lokalisiert und direkt vor Ort beschafft.

Die drei Szenarien unterscheiden sich dabei nur beschaffungsseitig. Als Prognosemodell wird in jedem Szenario das Modell aus Tab. 17.1 angewendet. Damit die Simulationsergebnisse vergleichbar sind, werden in den drei Modellen die einzelnen Sicherheitsbestände in jeweils einem Experiment so eingestellt, dass für jedes Szenario die Zielliefertreue von 99 % erreicht wird. Zur Wahrung statistischer Sicherheit werden so viele Replikationen erzeugt, dass die Untergrenze des Konfidenzintervalls über 99 % Liefertreue liegt (i. d. R. werden mindestens 20 Replikationen benötigt). Die Simulationsergebnisse werden zum einen bezogen auf die Gesamtkosten der Supply Chain pro Jahr und zum anderen bezogen auf das gebundene Kapital (Bestandsanalyse) in der Supply Chain ausgewertet.

Generell werden für alle Szenarien die folgenden Kostenarten ausgewertet:

- Materialkosten
- Bestandskosten
- Zollkosten
- Transportkosten

Die Materialkosten sind in der Analyse in allen Szenarien gleich. Die anderen Kosten unterscheiden sich in den drei Szenarien. Zur Vereinfachung werden die Zollkosten in allen Szenarien aus benötigter Stückzahl pro Jahr multipliziert mit Teilepreis und Importzollsatz berechnet. Außerdem wird in der Gesamtkostenanalyse als Bestandskosten nicht der Wert des gebundenen Kapitals, sondern die Kosten dafür (mit einer definierten Zinsrate) berücksichtigt.

Die Gesamtkostenanalyse zeigt, dass die globale Beschaffung aus Gesamtkostenbetrachtung das teuerste Szenario ist, da sowohl die Bestands- als auch die Zoll- und

**Tab. 17.2** Bestandsergebnisse der Simulationsstudie

Szenario	Ø Bestand in Transit	Ø Bestand im ZF-Standort	Ø Gesamtbestand
Globale Beschaffung	7,6 %	7,1 %	14,7 %
Lokale Beschaffung	0,6 %	3,7 %	4,3 %
Globale und lokale Beschaffung	3,7 %	4,0 %	7,7 %

Transportkosten jeweils höher sind als bei den anderen beiden Szenarien. Bei detaillierter Betrachtung fällt auf, dass vor allem die Zollkosten für die Unterschiede in den drei Szenarien verantwortlich sind. Die Begründung dafür liegt in den hohen Importzollsätzen für die betrachteten Teile. Eine wichtige Erkenntnis zeigt sich außerdem in den Bestandskosten der Supply Chain. Diese unterscheiden sich nur geringfügig, da kostenseitig nur die kalkulatorischen Zinsen für das gebundene Kapital berücksichtigt werden.

In der Bestandsanalyse werden nicht die Kapitalbindungskosten, sondern der Wert des gebundenen Kapitals der drei Szenarien verglichen. Die Kapitalbindung kann in zwei Kategorien aufgeteilt werden: Bestand in Transit und Bestand im ZF-Standort. Bezogen auf die Materialkosten ergeben sich für die Kapitalbindung die in Tab. 17.2 dargestellten Werte.

Wie zu erwarten ist das gebundene Kapital im Szenario *lokale Beschaffung* am geringsten. Im Vergleich zur *globalen Beschaffung* ist das gebundene Kapital in der Supply Chain bei der *lokalen Beschaffung* um ca. 70 % und beim Szenario *globale und lokale Beschaffung* immer noch um ca. 47 % niedriger. Der Bestand im ZF-Standort beim zweiten Szenario entsteht hauptsächlich aufgrund des Sicherheitsbestands, der notwendig ist, um eine 99-prozentige Liefertreue zu erhalten.

Die beiden Analysen zeigen, dass bei der *globalen Beschaffung* die Gesamtkosten und die Bestände am höchsten sind. Zusätzlich birgt diese Supply Chain aufgrund ihrer langen Lieferzeit die geringste Flexibilität, um auf Kundenänderungen (Produktmix, Menge) zu reagieren sowie ein höheres Risiko, z. B. aufgrund von Änderungen des Zollsatzes. In beiden Analysen werden die Materialkosten in allen Szenarien gleichgestellt. Da es unwahrscheinlich ist, dass die Materialkosten der gleichen Teile in Übersee den Kosten bei der *globalen Beschaffung* entsprechen, kann nach der Simulationsstudie gezeigt werden, wie sich die Materialkosten bei einer Lokalisierung ändern dürfen, um in der Gesamtkostenbetrachtung den Wert der *globalen Beschaffung* zu erreichen. Auch bei der *globalen und lokalen Beschaffung* sind diese Gesamtkosteneffekte noch deutlich erkennbar. Diese Gesamtkosteneffekte dienen als Grundlage der strategischen Entscheidung, ob eine globale oder eine lokale Beschaffungsstrategie angestrebt wird. Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Simulation hier theoretische Potenziale aufzeigt, deren Umsetzung in der Praxis weiterführend zu prüfen ist. Dazu zählen neben Qualitätsaspekten wie Herstellbarkeit, Lieferfähigkeit, Kapazität auch Aspekte wie z. B. Liquidität oder Lieferantenabhängigkeit.

## 17.5 Fazit

Die Supply Chain Simulation unterstützt betriebliche Entscheider durch die Bereitstellung weitreichender Analysen und quantitativer Ergebnisgrößen. Ein großer Vorteil ist dabei einerseits die Möglichkeit, Wirkungszusammenhänge stochastischer Einflüsse und Risiken in verschiedenen Szenarien abzubilden, ohne dabei in reale Prozesse einzugreifen, und andererseits fundierte Hinweise für die quantitativen Auswirkungen einzelner Maßnahmen oder ganzer Design-Varianten zu erhalten. In der dargestellten Fallstudie konnten per Supply Chain Simulation die prozentualen Gesamtkosteneffekte verschiedener Beschaffungsstrategien ermittelt werden. Generell bietet sich die Supply Chain Simulation bei hohen Unsicherheiten und Risiken für die in Abschn. 17.2 genannten Problemstellungen an, um mögliche Szenarien zu bilden und zu evaluieren. Gerade in Anbetracht der zunehmenden Volatilität der Weltmärkte dürfte die Supply Chain Simulation in Zukunft insbesondere in der Automobilindustrie vermehrt Anwendung finden. Um den vielfältigen Problemstellungen Rechnung zu tragen, ist auch eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Softwarewerkzeuge Voraussetzung.

---

## Literatur

- Alicke K, Gutenschwager K (2004) Supply Chain Simulation mit ICON-SimChain. In: Kopfer H, Spengler T, Voß S (Hrsg) Logistik Management. Physica, Heidelberg, S 161–178
- Angerhofer BJ, Angelides MC (2000) System dynamics modelling in supply chain management: research review. In: Joines JA, Barton RR, Kang K, Fishwick PA (Hrsg) Proceedings of the winter simulation conference 2000. IEEE, Piscataway, S 342–351
- Bagchi S, Buckley SJ, Ettl M, Lin GY (1998) Experience using the IBM supply chain simulator. In: Medeiros DJ, Watson EF, Carson JS, Manivannan MS (Hrsg) Proceedings of the winter simulation conference 1998. IEEE, Piscataway, S 1387–1394
- Baumgärtel H, Stäblein T, Wilke J (2007) The Supply net simulator SNS: an artificial intelligence approach for highly efficient supply network simulation. In: Günther H-O, Mattfeld DC, Suhl L (Hrsg) Management logistischer Netzwerke. Heidelberg, Physica, S 85–110
- Fechteler T, Gutenschwager K (2014) Die Landkarte zeigt, wie gut es funktioniert. IT&Production 9:64–65
- Gierth A, Schmidt C (2006) Zeitdynamische Simulation in der Produktion. In: Schuh G (Hrsg) Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte, 3. Aufl. Springer, Heidelberg, S 646–681
- Kleijnen JPC (2005) Supply chain simulation tools and techniques: a survey. International Journal of Simulation & Process Modelling 1:82–89
- Lambert DM, Cooper MC (2000) Issues in supply chain management. Ind Mark Manag 29:65–83
- Meyr H, Wagner M, Rohde J (2008) Structure of advanced planning systems. In: Stadler H, Kilger C (Hrsg) Supply chain management and advanced planning – concepts, models, software and case studies. Springer, Berlin, S 109–115
- Motta M, Wagenitz A, Hellingrath B, Weller R (2008) Gestaltung logistischer Netzwerke: Ein Praxisbericht. In: Rabe M (Hrsg) Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Fraunhofer IRB, Stuttgart, S S 21–S 30

- Rabe M, Gutenschwager K, Sari MU, Fechteler T (2013) A data model for carbon footprint simulation in consumer goods supply chains. In: Pasupathy R, Kim S-H, Tolk A, Hill R, Kuhl ME (Hrsg) Proceedings of the winter simulation conference 2013. IEEE, Piscataway, S 2677–2688
- Stadler H (2005) Supply chain management and advanced planning – basics, overview and challenges. Eur J Oper Res 163:575–588
- Supply Chain Council (2010) Supply chain operations reference model, version 10.0. Supply Chain Council, US
- Tako AA, Robinson S (2012) The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. Decis Support Syst 52:802–815
- Terzi S, Cavalieri S (2004) Simulation in the supply chain context: a survey. Comput Ind 53:3–16
- Vahrenkamp R, Mattfeld DC (2013) Logistiknetzwerke: Modelle für Standortwahl und Tourenplanung, 2. Aufl. Springer Gabler, Wiesbaden
- ZF Friedrichshafen AG (2019) Geschäftsbericht 2018. [https://annualreport.zf.com/site/annualreport/media/annualreport/ZF\\_Geschaeftsbericht2018\\_DE.pdf](https://annualreport.zf.com/site/annualreport/media/annualreport/ZF_Geschaeftsbericht2018_DE.pdf). Zugegriffen am 02.09.2019



**Prof. Dr. Kai Gutenschwager** Nach dem Studium der Wirtschaftsinformatik an der TU Braunschweig wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Wirtschaftsinformatik und Informationsmanagement der TU Braunschweig. Nach der Promotion 2001 Niederlassungsleiter der SimPlan AG am Standort Braunschweig von 2002 bis 2009. Ab 2009 Professor an der Hochschule Ulm (Lehrstuhl IT in der Logistik) und seit 2013 Professor an der Fakultät Informatik der Ostfalia Hochschule für Angewandte Wissenschaften Braunschweig/Wolfenbüttel (Lehrstuhl Wirtschaftsinformatik). Geschäftsführender Leiter des Institutes für Information Engineering der Ostfalia Hochschule seit 2016.



**Philipp Arnold** Nach dem Bachelorstudium Wirtschaftsingenieurwesen/Logistik an der HS Neu-Ulm (2008–2012) folgte das Masterstudium Systems Engineering and Management Logistics an der HS Ulm (M.Eng.) bis 2013. Seit 2013 Angestellter in verschiedenen Abteilungen (u. a. Logistikplanung, Supply Chain Design, Logistikcontrolling) bei der ZF Friedrichshafen AG mit Schwerpunkt auf Supply Chain Simulation.



# Simulationsbasierte kombinierte Instandhaltungs- und Produktionsplanung

# 18

Berend Denkena, Karl Doreth, Marian Köller, Sören Wilmsmeier  
und Florian Winter

## 18.1 Einleitung

Die Produktionssysteme im heutigen Automobilbau zeichnen sich sowohl durch vernetzte Maschinen als auch durch eine hohe Automatisierung und Komplexität der Anlagen bzw. Technologien aus. Aufgrund der Kapitalintensität dieser Produktionssysteme ist ein wirtschaftlicher Betrieb daher nur durch eine hohe Auslastung der Maschinen zu erreichen (Kuhn et al. 2006; Strunz 2012). Innerhalb dieser Produktionssysteme können Stillstände einzelner Maschinen beträchtliche Störungen auch für vor- und nachgelagerte Produktionsschritte hervorrufen, wenn beispielsweise nachgelagerte Bereiche nicht mehr mit Bauteilen versorgt werden (Denkena et al. 2012). Wird die Störung nicht schnell genug behoben, sind hohe Ausfallfolgen bzw. Produktionsverluste (z. B. durch entgangene Stückzahlen) für das gesamte Produktionssystem die Folge (Denkena und Kröning 2013; Kröning und Denkena 2013).

---

B. Denkena (✉) · S. Wilmsmeier  
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover,  
Garbsen, Deutschland  
E-Mail: [denkena@ifw.uni-hannover.de](mailto:denkena@ifw.uni-hannover.de)

K. Doreth  
DMG MORI Software Solutions GmbH, Pfronten, Deutschland

M. Köller  
Innovationszentrum Niedersachsen GmbH, Hannover, Deutschland

F. Winter  
FAUSER AG, Garbsen, Deutschland

Zur Vermeidung dieser Ausfallfolgen bzw. Produktionsverluste wurden in den letzten Jahren Systeme zur Überwachung und Diagnose erforscht und entwickelt, die es ermöglichen, den aktuellen Zustand von ausgewählten Maschinenkomponenten stetig zu erfassen und Instandhaltungsbedarfe rechtzeitig vor dem Versagen einer Komponente aufzuzeigen. Dieses Vorgehen ist als zustandsorientierte Instandhaltung definiert (VDI 1997). Die reine Zustandsüberwachung und -diagnose reicht jedoch nicht aus, um die oben beschriebenen Produktionsverluste zu vermeiden. Besonders bei Produktionssystemen, die im Drei-Schichtbetrieb ausgelastet sind und dadurch kaum über fertigungsfreie Zeiten verfügen, ist ein geplanter instandhaltungsbedingter Stillstand der Maschine während der Produktion nicht zu verhindern. Jedoch wird auch hierdurch der Produktionsablauf gestört, was wiederum zu erhöhten Produktionskosten führt. Deshalb ist eine effiziente Integration geplanter Instandhaltungsaufträge – sowohl präventiv als auch zustandsorientiert – in die komplexen Produktionsabläufe durch vorherige Abstimmung beider Planungsbereiche erforderlich (Denkena und Kröning 2013; Kröning und Denkena 2013).

Interviews von Produktions- und Instandhaltungsmitarbeitern unterschiedlicher produzierender Unternehmen ergaben, dass die Abstimmung beider Planungsbereiche derzeit mit Hilfe einfacher organisatorischer Maßnahmen durchgeführt wird. Diese finden z. B. durch gemeinsame Planungsrunden der Mitarbeiter, im Rahmen der Organisation der Instandhaltung als Unterabteilung der Produktion, durch Besetzung des Produktions- und Instandhaltungsleiters in Personalunion oder der Wahl des Instandhaltungszeitpunkts anhand einfacher Kriterien (z. B. Verfügbarkeit qualifizierten Personals) statt. Die Maßnahmen berücksichtigen jedoch nicht ausreichend die hohe Komplexität und Stochastik des Produktionssystems sowie die daraus resultierende Dynamik der Produktionsinformationen und -zustände, die durch einen instandhaltungsbedingten Stillstand zusätzlich beeinflusst werden. Somit ist es für den Planer nicht möglich, die Beeinträchtigung der Produktion und somit die Qualität der Produktions- und Instandhaltungspläne hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit zu bewerten.

Bestehende wissenschaftliche Ansätze unterliegen bisher stark restriktiven Annahmen, wie beispielsweise Ein- oder Zwei-Maschinensystemen und der Annahme einer deterministischen Fertigung, wodurch die Komplexität realer Produktionssysteme nicht hinreichend abgebildet werden kann (Ghasemi et al. 2007; Frangopol et al. 2009; van der Weide et al. 2010; Saassouh et al. 2007).

Des Weiteren werden größtenteils statische, analytische Methoden eingesetzt. Diese sind für stark vereinfachte bzw. statische Produktionssysteme ausgelegt, um lediglich funktionale Zusammenhänge der Planungsbereiche aufzeigen. Die durch die Instandhaltungsmaßnahme induzierten dynamischen Wirkzusammenhänge und somit wesentliche in der Realität auftretende Phänomene und Informationen werden in der Entscheidungsfindung jedoch häufig ignoriert (Heitmann 1999; Gierth und Schmidt 2006; Schneider 2005).

Darüber hinaus werden die Wechselwirkungen zwischen der Produktions- und Instandhaltungsplanung und der entstehende Zielkonflikt mit einfachen Methoden und somit nicht mit ausreichender Genauigkeit modelliert. Die Ansätze zur Terminierung von

Instandhaltungsmaßnahmen vernachlässigen häufig die Beeinträchtigung der Produktion durch die hierdurch hervorgerufenen dynamischen Effekte (Gössinger und Kaluzny 2010).

Insgesamt sind somit bestehende Ansätze für eine operative Entscheidungsunterstützung bei komplexen Produktionssystemen ungeeignet. Es fehlen hinreichend genaue Methoden zur Integration der operativen Produktions- und Instandhaltungsplanung in die industrielle Anwendung, um die beschriebenen Defizite aufzuheben. Darüber hinaus existiert derzeit eine Unkenntnis über die Wechselwirkungen der Produktion und Instandhaltung sowie über die Potenziale und Grenzen einer integrierten Planung bei Berücksichtigung der Komplexität, Stochastik und Dynamik realer Produktionssysteme, welche die schlechte Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen zur Folge hat.

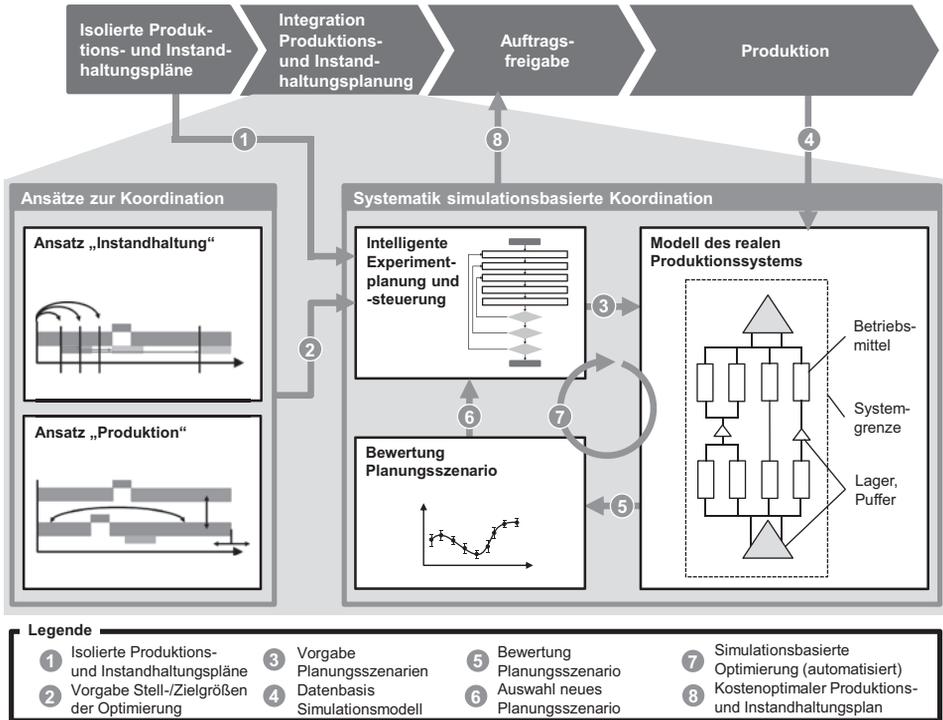
Dieses Defizit ist aufgrund seiner Komplexität durch einfache Modelle oder menschliche Erfahrung nicht kompensierbar. Durch den Einsatz der Ablaufsimulation und die darauf basierende integrierte Planung von Produktion und Instandhaltung kann dieses Problem jedoch behoben werden. Die Simulation erlaubt vergleichsweise einfach, komplexe Produktionssysteme inklusive ihrer Stochastik realitätsgetreu abzubilden. Durch solch eine Abbildung der Komplexität, Dynamik und Stochastik realer Produktionssysteme wird eine hohe Planungsqualität der Methodik sichergestellt und das Risiko von Fehlplanungen reduziert, da stets die stochastische Verteilung der prognostizierten Planungsergebnisse bekannt ist. Eingesetzt wird die Ablaufsimulation bereits seit Langem zur Unterstützung der isolierten operativen Produktionsplanung und -steuerung und im Rahmen der Fabrikplanung.

Durch Abbildung und Berücksichtigung der Interdependenzen beider Planungsbereiche im Simulationsmodell kann jedoch auch eine kostenoptimale Integration von Instandhaltungsmaßnahmen (präventiv, zustandsorientiert) in komplexen Produktionsabläufen angestrebt werden. Hierdurch kann eine statistische Minimierung von Produktionsverlusten und dadurch eine nachhaltige Senkung der Produktions- und Instandhaltungskosten erzielt werden. Im Folgenden wird zunächst diese integrierte Methode zur Produktions- und Instandhaltungsplanung erläutert sowie eine Erweiterung um die Beanspruchung und Lebensdauer der Fertigungsmittel vorgestellt. Anschließend wird ein Ansatz zur Selbstparametrierung der dafür notwendigen Simulationsmodelle beschrieben. Den Abschluss dieses Kapitels bilden eine Darstellung der industriellen Einsatzmöglichkeiten sowie zukünftige Potenziale des Einsatzes in der Praxis.

---

## 18.2 Methode zur operativen Produktions- und Instandhaltungsplanung

Am IFW (Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen) wurde zur Integration der Planungsbereiche ein Ansatz zur Koordination der Produktions- und Instandhaltungsplanung und -steuerung entwickelt (vgl. Abb. 18.1) (Kröning 2014). Dieser besteht aus zwei verschiedenen Teilansätzen, die entweder separat Anwendung finden oder miteinander kombiniert werden können. Diese Teilansätze legen die zu betrachtenden Modellparameter, Stell- und Zielgrößen innerhalb der Ablaufsimulation fest.



Krö/68804©IFW

**Abb. 18.1** Aufbau und Ablauf der Methodik

Der erste Teilansatz „Instandhaltung“ umfasst die dynamische Terminierung von Instandhaltungsmaßnahmen und monetäre Bewertung möglicher Startzeitpunkte. Hierzu werden sowohl die direkten Instandhaltungskosten als auch die dynamischen, indirekten Kosten (z. B. Ausfallfolgekosten) ermittelt. Während die Instandhaltungsplanung in diesem Ansatz variiert wird, bleibt die Produktionsplanung unberührt.

Im zweiten Teilansatz wird hingegen die dynamische Adaption der Produktionsplanung bei vorgegebenen Durchführungszeitpunkten für die Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt. Dieser Ansatz liefert eine dynamische Bewertungsgrundlage, um eine kurzfristige Anpassung der Produktionsplanung (Reihenfolge-, Losgrößen- und Maschinenbelegungsplanung) bei zeitlich fixierten Instandsetzungsmaßnahmen zu analysieren.

Die Kombination beider Teilansätze vereint die Berücksichtigung der Komplexität und Stochastik von Produktionssystemen sowie die durch Instandhaltungsmaßnahmen induzierte Beeinträchtigung der Produktion (z. B. Abriss der Versorgung für Maschinen nachgelagerter Prozessschritte).

Als Eingangsinformationen der Methode werden getrennt voneinander definierte Produktions- und Instandhaltungspläne angenommen, die aufgrund übergeordneter Planungsvorgaben festgelegt wurden. Die Produktionspläne lassen sich dabei vergleichsweise einfach basierend auf Kundenbestellungen im Rahmen der Produktionsprogrammplanung für

einzelne Produkte und Produktionssysteme ableiten (Hackstein 1989). Im Gegensatz dazu gestaltet sich die Vorhersage von Komponentenausfällen und notwendigen Instandhaltungsbedarfen zur Erstellung der Instandhaltungspläne schwieriger.

Zwar lässt sich im Rahmen der zustandsbasierten Instandhaltungsplanung mithilfe von Systemen zur Maschinenüberwachung/-diagnose der Abnutzungszustand von Maschinenkomponenten detektieren und überwachen. Die Ermittlung eines Ausfallzeitpunkts mit einer für die operative Produktionsplanung erforderlichen Genauigkeit von oftmals wenigen Tagen ist jedoch kaum möglich. Zudem zeigt eine empirische Analyse, dass die betrachteten Zeiträume in der Instandhaltungsplanung um ein Vielfaches höher sind als der Betrachtungshorizont in der operativen Produktionsplanung (Kröning 2014). Daher ist es erforderlich, den langen Planungshorizont der Instandhaltungsmaßnahmen auf den kurzen Planungshorizont der operativen Produktionsplanung einzugrenzen. Durch die Festlegung einer Warngrenze bei Überwachung des Ist-Abnutzungszustands lässt sich eine Reaktionszeit bestimmen, die als Zeitraum für die Terminierung der Instandhaltungsmaßnahme zur Verfügung steht. Die Warngrenze ist dabei so zu wählen, dass einerseits der Abnutzungsvorrat der Komponente möglichst weit ausgenutzt werden kann, andererseits die Wahrscheinlichkeit eines ungeplanten Ausfalls vor Durchführung der Instandsetzungsmaßnahme vernachlässigbar gering ist.

Der entwickelte Ansatz zur Koordination der Produktions- und Instandhaltungsplanung greift neben der Terminierung der notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen auf die Stellgrößen aus den Produktionsplänen (z. B. Losgrößen-, Reihenfolge- und Maschinenbelegungsplanung) zurück. Während der Ansatz „Instandhaltung“ die Variation des Startzeitpunkts der Instandhaltungsmaßnahmen bei vorgegebener Produktionsplanung umfasst, werden durch den Ansatz „Produktion“ die Stellgrößen der Produktionsplanung bei zeitlich fixierten Instandhaltungsmaßnahmen variiert. Der koordinative Ansatz kombiniert die Variation von Stellgrößen der Produktions- und Instandhaltungsplanung.

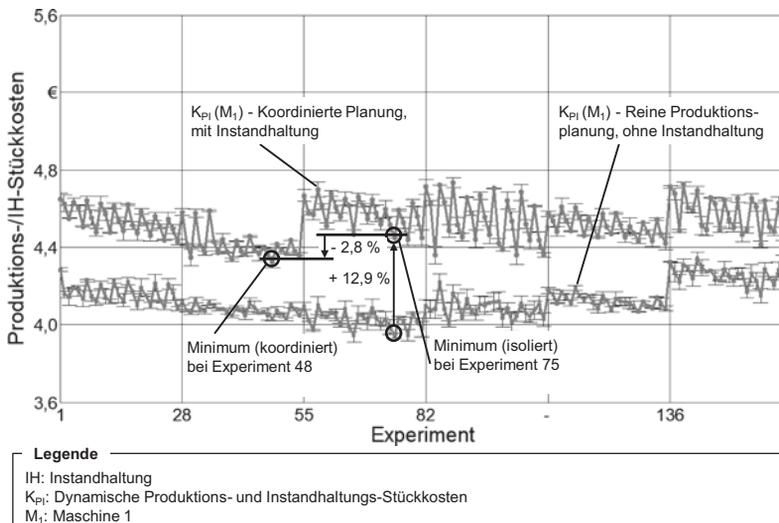
Mit Hilfe eines ereignisorientierten Simulationsmodells des realen Produktionssystems werden sich ergebende Systemzustände für relevante Planungsszenarien bzw. -alternativen prognostiziert. Die Planungsszenarien werden dabei z. B. durch eine zeitlich diskrete Verschiebung von Instandhaltungsmaßnahmen im Rahmen des Ansatzes Instandhaltung aufgestellt. Eine intelligente Experimentplanung und -steuerung reduziert die möglichen Kombinationen von variierten Stellgrößen auf eine praktikable Anzahl an Experimenten (vgl. Kröning 2014). Das Modul „Bewertung Planungsszenario“ bewertet die prognostizierten Fertigungsinformationen wie Ausbringungsmenge, Durchlaufzeit der Fertigungslose oder Lagerbestände anhand der dynamischen Produktionsstückkosten.

Der Planungsansatz wird gemeinsam mit einem Automobilhersteller zur praxisgerechten Validierung und Evaluierung angewendet. Hierzu werden u. a. Ersatzmodelle für stochastische Eingangsdaten (z. B. Störverhalten Maschinen) abgeleitet sowie ein ereignisorientiertes Simulationsmodell der Fertigungsstrukturen und -abläufe entwickelt.

Anschließend wird anhand unterschiedlicher Szenarien das Potenzial des koordinierten Planungsansatzes im Vergleich zur isolierten Produktions- bzw. Instandhaltungsplanung ermittelt. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse werden für jedes Szenario mehrere

Simulationsbeobachtungen durchgeführt. Die Ergebniswerte werden ohne Anwendung des Planungsansatzes bei Variation der Stellgrößen der Produktion bzw. Instandhaltung sowie bei Verwendung der koordinierten Planungsmethodik verglichen. Als Vergleichsgröße werden für alle Simulationsstudien die dynamischen Produktions- und Instandhaltungsstückkosten herangezogen. Diese umfassen die Maschinen-, Personal-, Rüst- und Lagerkosten zur Bestimmung der Produktionskosten sowie die Instandhaltungskosten (Kröning 2014).

Zur Veranschaulichung der Gefahr von Fehlplanungen durch eine isolierte Betrachtungsweise werden die Kosten bei einer Produktionsplanung ohne Berücksichtigung einer notwendigen Instandhaltungsmaßnahme denen der koordinierten Planung gegenübergestellt, vgl. Abb. 18.2. In diesem Szenario werden die Ergebnisse der isolierten Produktionsplanung (untere Linie) um die Berücksichtigung der Instandhaltungsplanung erweitert (obere Linie). Bei sonst identischen Eingangsdaten mit den Stellgrößen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung wird zusätzlich eine Instandhaltungsmaßnahme für die betrachtete Maschine für einen Zeitraum von zwölf Stunden zu einem zeitlich fixen Startzeitpunkt durchgeführt. Die Experimente auf der horizontalen Achse stellen somit die Kosten bei identischen Eingangsdaten mit Ausnahme der Berücksichtigung der Instandhaltungsmaßnahme an der Maschine dar, sodass ein paarweiser Vergleich der Ergebnisse möglich ist. Der Vergleich zeigt, dass für jedes Planungsszenario die dynamischen Produktions- und Instandhaltungsstückkosten der reinen Produktionsplanung (ohne Instandhaltung) die Stückkosten der koordinierten Planung (mit Instandhaltung) unterschreiten. Der instandhaltungsbedingte Stillstand führt folglich zu einer Verlängerung der Durchlaufzeit des Produktionsauftrags, was wiederum zu einer Erhöhung der dynamischen Produktions- und Instandhaltungsstückkosten führt.



Krö/68839©IFW

**Abb. 18.2** Dynamische Produktions- und Instandhaltungsstückkosten

Bei der Auswertung der Ergebnisse dieses Szenarios ist jedoch ebenfalls festzustellen, dass das identifizierte Minimum der Stückkosten (Experiment 75) bei der zeitgleichen Berücksichtigung der Instandhaltungsplanung nicht mehr kostenoptimal ist. Durch die Wahl einer alternativen Losgrößen- und Reihenfolgekombination können in diesem Fall die Stückkosten um ca. 2,8 % reduziert werden (vgl. Experiment 48). Der kostenoptimale Produktions- und Instandhaltungsplan weicht folglich bei isolierter und koordinierter Planung voneinander ab.

Die detaillierte Analyse der Wechselwirkungen beider Planungsdisziplinen anhand der dynamischen Produktions- und Instandhaltungsstückkosten hat ergeben, dass eine isolierte Produktions- und Instandhaltungsplanung zu einem nicht kostenoptimalen Produktions- und Instandhaltungsplan führen kann. Die gezeigte Methode zur Koordination der Produktions- und Instandhaltungspläne erlaubt die Wechselwirkungen eines geplanten Maschinenstillstands innerhalb des Produktionssystems zu prognostizieren und die Gesamtkosten zu minimieren. Durch die Verwendung der Ablaufsimulation lassen sich dabei die Auswirkungen der operativen Produktions- und Instandhaltungsplanung effizient aufeinander abstimmen und die Gefahr von Fehlplanungen reduzieren.

---

### 18.3 Modellierung der Beanspruchung und Lebensdauer in der Ablaufsimulation

Im Rahmen von Forschungsprojekten (Make-IT, MK ProInst) wurde eine Systematik entwickelt, die eine Modellierung der Abnutzung und des zunehmenden Ausfallrisikos von Maschinenkomponenten ermöglicht (Denkena et al. 2012; Kröning und Denkena 2013). Die Systematik umfasst die Abbildung sowohl einer zeitveränderlichen Abnutzung als auch von Frühausfällen unterschiedlicher Komponenten in einer Maschine. Bei Einbau einer neuwertigen Komponente beträgt der Abnutzungsvorrat 100 %. Aus einer zuvor empirisch ermittelten Ausfalldichtefunktion wird ein Zufallswert gezogen, der für den deterministischen Fall die Lebensdauer der Komponente beschreibt. Bei Annahme eines linearen Verschleißfortschritts sowie der Kenntnis zweier Punkte kann die Steigung der Abnutzungsgeraden berechnet werden. Die Steigung beschreibt somit die variantenbezogene Abnutzung für festgelegte Prozessparameter. Darauf basierend wird im Betrieb die kontinuierliche Abnutzung der Komponente jeweils nach der Fertigung eines Werkstücks berechnet.

Hierzu wurden zwei Methoden kombiniert, einerseits die Berechnung der Abnutzung („Normal“-Abnutzung) mit Hilfe der Brownschen-Bewegung (vgl. Hassler 2007), andererseits die Frühausfallmodellierung mit Hilfe von Markov-Ketten („Frühausfall“). Nach jeder Bearbeitung eines Werkstücks kann die Komponente mit Hilfe unterschiedlicher Übergangswahrscheinlichkeiten PNA (Wahrscheinlichkeit für Ausfall durch „Normal“-Abnutzung), PFA (Wahrscheinlichkeit für Ausfall durch Frühausfall) in zwei mögliche Zustände ZNA (Ausfall durch „Normal“-Abnutzung) und ZFA (Ausfall durch Frühausfall) überführt werden. Beim Zustand ZNA wird die Abnutzung der Komponente in

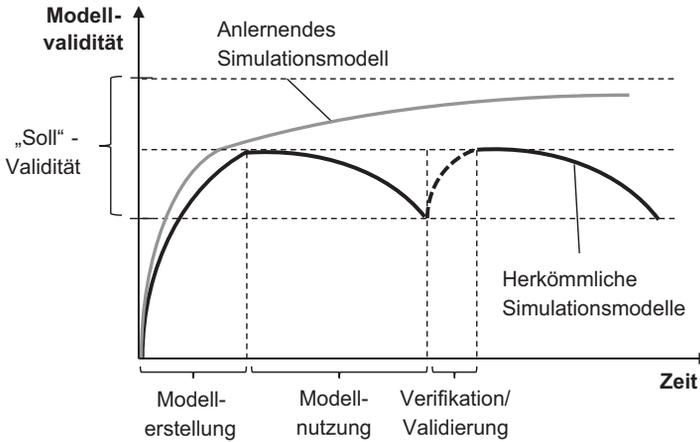
Abhängigkeit der zu fertigenden Variante berechnet, indem ein Sprung des Abnutzungsvorrates nach der Fertigung eines Bauteils stochastisch bestimmt wird. Dieser Sprung ist normalverteilt, beschreibt die Abnahme des Abnutzungsvorrates nach  $n$  bearbeiteten Werkstücken und hängt direkt von der Steigung der Abnutzungsgeraden ab. Für die Komponente ist eine Instandsetzung erforderlich, sobald der Abnutzungsvorrat einen Wert von „0“ erreicht. Bei Überführung der Komponente in den Zustand ZFA, dem Auftreten eines Frühausfalls, ist hingegen eine sofortige Instandhaltung der Komponente erforderlich.

---

## **18.4 Einsatz anlernender und selbstparametrierender Simulationsmodelle in der Produktions- und Instandhaltungsplanung**

Eine besondere Herausforderung für den Einsatz von Simulationsmodellen stellt die Parametrierung in Hinblick auf Datenaktualität, -konsistenz und -vollständigkeit dar. Auch der oben beschriebene dynamische Planungsansatz (Methode zur operativen Produktions- und Instandhaltungsplanung) bietet zunächst keine umfassende Lösung im Rahmen einer aufwandsarmen Vorgehensweise zur Parametrierung. Diese bleibt weiterhin in der Verantwortung des Anwenders und erfolgt üblicherweise durch eine statische Anbindung an die bestehende Datenverwaltung des Betriebs, z. B. MES (Manufacturing Execution System), BDE (Betriebsdatenerfassung), MDE (Maschinendatenerfassung) oder manuell über die Pflege von Datentabellen. Als Lösung dient eine praxisgeeignete Erweiterung der Methodik um Ansätze zur einfachen und schnellen Modellerstellung und -pflege durch selbstparametrierende bzw. anlernende Simulationsmodelle mit Echtzeitdaten der Produktion aus BDE- und MDE-Systemen. Die dafür geeigneten Teilkomponenten und der Implementierungsansatz für Industrieunternehmen werden in diesem Abschnitt erläutert.

Das zugrunde liegende Konzept der anlernenden bzw. selbstparametrierenden, simulationsgestützten Koordination wird in Abb. 18.3 verdeutlicht. Die Validität herkömmlicher Simulationsmodelle sinkt nach erstmaliger Modellerstellung und -validierung über die Zeit, da Änderungen in der Fertigung (z. B. Einsatz neuer Werkzeuge mit unbekanntem Verschleißverhalten, Fertigung neuer Bauteile mit anderen Bearbeitungszeiten, Änderungen der Puffer-/Lagerdimensionierung) nicht in das ablaforientierte Simulationsmodell zurückgeführt werden bzw. der Aufwand zur manuellen Datenerfassung (z. B. bei stochastischen Daten) wirtschaftlich nicht vertretbar ist. Eine einfache, direkte Ankopplung des Simulationsmodells an BDE-, MDE- oder PPS- (Produktionsplanungs- und Steuerungs-) Systeme ohne Vorverarbeitung der Daten löst dieses Problem aufgrund der geforderten hohen Abbildungsgenauigkeit nicht. Gelingt es jedoch, Ist-Produktionsdaten stetig zu erfassen und durch Auswertungsroutinen, z. B. statistische Auswertung der Werkzeugausfälle, derart aufzubereiten und automatisiert der simulationsgestützten Koordination zur Verfügung zu stellen, wird eine kosten- und zeitintensive Datenanalyse und Modellerstellung sowie die anschließende Validierung und Modellpflege vermieden und die Grundlage für einen wirtschaftlichen betriebsbegleitenden Einsatz der Methodik gelegt. Um dies er-



**Abb. 18.3** Anlernende und selbstparametrierende Simulationsmodelle

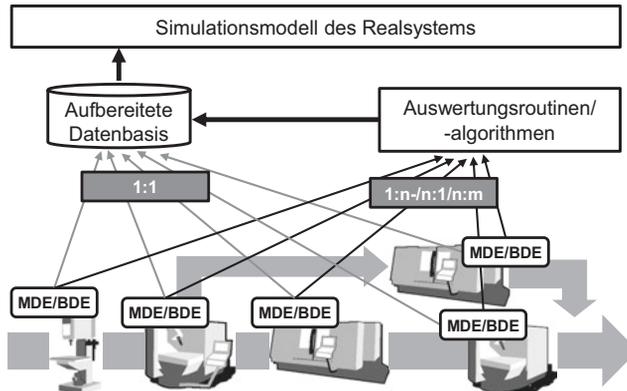
reichen zu können, ist die Erweiterung der Methodik um neue Vorgehensweisen, insbesondere der automatisierten Modellpflege durch eine anlernende und selbstparametrierende Simulation und der Möglichkeit von Feedback-Schleifen, erforderlich.

Wesentliche Vorteile dieses Ansatzes sind:

- eine deutlich erhöhte Prognosequalität der zukünftigen Auswirkungen von Planungsentscheidungen durch Abbildung der Komplexität und Dynamik realer Produktionssysteme insbesondere in Hinblick auf die Wechselwirkungen zwischen der operativen Produktions- und Instandhaltungsplanung,
- eine Reduzierung des Risikos von Fehlentscheidungen durch rechtzeitiges Anzeigen einer nicht mehr ausreichenden Modellgüte innerhalb einer Feedback-Schleife,
- das nachhaltige Senken der Produktions- und Instandhaltungskosten basierend auf der Vorgehensweise der Methode zur operativen Produktions- und Instandhaltungsplanung.

Die grundlegende Struktur in der Umsetzung der Selbstparametrierung ist in Abb. 18.4 dargestellt. Die Kombination aus Direktzugriff auf MDE und BDE und die zeitgleich stattfindende Kombination der in der Fertigung zur Verfügung stehenden Daten mittels Auswertungsroutinen und -algorithmen, wie der Support Vector Machine und dem Hidden Markov Model, gewährleisten eine vollständige Datenbasis zur Parametrierung des Simulationsmodells. Bei deterministischen Daten (z. B. Bearbeitungszeiten, Pufferfüllstände) wird die Ist-Ausprägung zeitpunktbezogen aus BDE- bzw. MDE-Daten ermittelt und dem Simulationsmodell zur Verfügung gestellt.

Bei den Methoden zum Anlernen hingegen werden stochastische Daten betrachtet, bei denen zum Betrachtungszeitpunkt lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen über deren aktuelle und zukünftige Ausprägung getroffen werden können (z. B. Störungen durch Werkzeugwechsel, stochastische Rüstzeiten). Um diese Daten im Simulationsmodell abzubilden, wird die Datenbasis eines längeren Zeitraums analysiert, um statistisch abgesicherte,



**Abb. 18.4** Vorgehensweise zur Rückführung von Ist-Produktionsdaten

stochastische Ersatzmodelle, z. B. Ausfallverteilungsfunktionen bei Werkzeugen, zu entwickeln. Bei einfachen 1:1-Beziehungen werden die Simulationsdaten direkt durch das BDE- bzw. MDE-System erfasst (z. B. Bearbeitungszeit) und dem Simulationsmodell über Schnittstellen zur Verfügung gestellt (vgl. Abb. 18.4). Bei komplexeren 1:n-, n:1- bzw. n:m-Beziehungen ist es jedoch erforderlich, mittels der genannten Auswertungsroutinen und -methoden die Produktionsdaten miteinander zu verknüpfen, um die Simulationsdatenbasis zu berechnen. Ein Beispiel sind die Pufferfüllstände, die nicht direkt im BDE-/MDE-System erfasst, jedoch bei Kenntnis der Produktionsstückzahlen der einzelnen Maschinen sowie der Anordnung der Maschinen des Produktionssystems indirekt kalkuliert werden können (n:m-Beziehung).

Die vereinfachte Modellerstellung und -pflege durch die stetige Rückführung von Ist-Produktionsdaten zur Anpassung der Simulationsdatenbasis schafft die wesentliche Grundlage für einen wirtschaftlichen betriebsbegleitenden Einsatz der ablauforientierten Simulation. Dies betrifft einerseits die Koordination der Produktion und Instandhaltung, lässt sich aber auf eine Vielzahl weiterer operativer Fragestellungen übertragen.

## 18.5 Ausblick und empfohlener Praxiseinsatz

Es hat sich gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, die Interdependenzen der Planungsbereiche Produktion und Instandhaltung innerhalb einer Ablaufsimulation zu berücksichtigen. Dies ermöglicht die kostenoptimale Integration sowohl von präventiven als auch zustandsbasierten Instandhaltungsmaßnahmen in komplexe Produktionsabläufe. Bestehende Herausforderung für den Praxiseinsatz der beschriebenen Methoden ist insbesondere eine aktuelle und exakte Abbildung der Realität im Rahmen des Simulationsmodells. Ein Lösungsansatz ist im Abschn. 18.4 anhand einer Selbstparametrierung der Simulationsmodelle dargestellt.

Mit dem Fortschreiten der unter dem Oberbegriff „Industrie 4.0“ zusammengefassten Ansätze zur Digitalisierung der Fertigung ist zu erwarten, dass insbesondere mehr und aktuellere Daten aus der Fertigung zur Verfügung stehen werden, die für einen integrierten simulationsgestützten Planungsansatz eine wertvolle Basis liefern. So bietet sich insbesondere für Unternehmen mit einem hohen Vernetzungsgrad der datenerzeugenden Elemente der Fertigung, wie Maschinensteuerungen oder BDE-Terminals, das größte Potenzial zum Einsatz der beschriebenen Methoden. Idealerweise wird dabei auf allgemeingültige Schnittstellen bzw. Frontend-Lösungen für Simulationsmodelle, die mit Hilfe des in der Automobilindustrie verbreiteten VDA (Verband der Automobilindustrie) Automotive Bausteinkastens aufgebaut werden können, zurückgegriffen.

Ein wesentlicher Faktor für einen wirtschaftlichen Einsatz der Simulation in der integrierten Planung ist, neben der Akzeptanz, eine aufwandsarme Pflege der Daten und Parameter des Simulationsmodells. Über den im Abschn. 18.4 beschriebenen Ansatz bietet sich hierzu zukünftig die Verwendung neuer Methoden der Datenanalyse aus dem Anwendungsfeld „Big Data“ an. So wird es zukünftig möglich sein, durch das digitale Erfassen vorhandener Planungsdaten aus der Arbeitsvorbereitung automatisiert eine Identifikation des Fertigungssystems und wesentlicher Prozessparameter sowie Betriebsmittel zu realisieren. Hierdurch lassen sich Simulationsmodelle zunächst ohne manuellen Eingriff vorbereiten, sodass der Modellierungsaufwand signifikant reduziert wird. Gegebenenfalls wird in diesem Kontext die Entwicklung neuartiger ereignisgesteuerter Simulationskonzepte notwendig sein, die eine dynamische Modellierung von Fertigungsabläufen und die Integration von Heuristiken zur Lösung komplexer multikriterieller Optimierungsprobleme innerhalb der Simulationssysteme ermöglichen. Somit kann auch für zukünftige Herausforderungen der Produktions- und Instandhaltungsplanung ein adäquater Lösungsansatz durch die Ablaufsimulation geboten werden.

---

## Literatur

- Denkena B, Kröning S (2013) Prognose von Ausfallfolgekosten, Grundlage zur Terminierung von Instandhaltungsmaßnahmen innerhalb komplexer Produktionssysteme. *wt Werkstatttechnik online* 103:616–621
- Denkena B, Blümel P, Kröning S, Röbbing J (2012) Condition based maintenance planning of highly productive machine tools. *Prod Engineering Res Dev* 6:277–285
- Frangopol DM, Strauss A, Bergmeister K (2009) Lifetime cost optimization of structures by a combined condition-reliability approach. *Engineering Structures* 31:1572–1580
- Ghasemi A, Yacout S, Ouali MS (2007) Optimal condition based maintenance with imperfect information and the proportional hazards model. *Int J Prod Res* 45:989–1012
- Gierth A, Schmidt C (2006) Zeitdynamische Simulation in der Produktion. In: Schuh G (Hrsg) *Produktionsplanung und -steuerung*. Springer, Heidelberg, S 646–681
- Gössinger R, Kaluzny M (2010) *Integrative Koordination von Produktion und Instandhaltung: Konzeption eines dezentralen Ansatzes*. Diskussionsbeiträge zum Produktions- und Logistikmanagement. Technische Universität Dortmund
- Hackstein R (1989) *Produktionsplanung und -steuerung: Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. VDI, Düsseldorf

- Hassler U (2007) Stochastische Integration und Zeitreihenmodellierung. Springer, Heidelberg
- Heitmann K (1999) Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle. Dissertation, Technische Universität München
- Kröning S (2014) Integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung und -steuerung mittels Simulationstechnik. Dissertation, Leibniz Universität Hannover
- Kröning S, Denkena B (2013) Dynamic scheduling of maintenance measures in complex production systems. CIRP J Manuf Sci Technol 6:292–300
- Kuhn A, Schuh G, Stahl B (2006) Nachhaltige Instandhaltung – Trends, Potentiale und Handlungsfelder nachhaltiger Instandhaltung. VDMA, Frankfurt
- Saassouh B, Dieulle L, Grall A (2007) Online maintenance policy for a deteriorating system with random change of mode. Reliab Engineering & Syst Saf 92:1677–1685
- Schneider J (2005) Effektive Integration und effiziente Nutzung betrieblicher Simulationsmethoden und -werkzeuge im operativen Geschäft von Industrieunternehmen. Forschungsbericht, Fachhochschule Oldenburg, Ostfriesland, Wilhelmshaven
- Strunz M (2012) Instandhaltung: Grundlagen Strategien Werkstätten. Springer, Heidelberg
- VDI (1997) VDI-Richtlinie 2888: Zustandsorientierte Instandhaltung. Beuth, Berlin
- van der Weide JAM, Pandey MD, van Noortwijk JM (2010) Discounted cost model for condition-based maintenance optimization. Reliab Engineering & Syst Saf 95:236–246



**Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena** Nach dem Studium des Maschinenbaus an der Leibniz Universität Hannover wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) an der Leibniz Universität Hannover von 1987–1992. Nach der Promotion 1992 Leiter in der Entwicklung bei Thyssen Production Systems und Gildemeister Drehmaschinen. Seit 2001 Professor an der Leibniz Universität Hannover und Leiter des IFW. Seit 2009 Mitglied und stellvertretender Sprecher des Sonderforschungsbereichs SFB 871 „Regeneration komplexer Investitionsgüter“ sowie seit 2018 Präsident der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP).



**Dr.-Ing. Karl Doreth** Nach dem Studium des Maschinenbaus mit Fachrichtung Produktionstechnik an der Leibniz Universität Hannover wissenschaftlicher Mitarbeiter des Institutes für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen. Dort bis 2017 technischer Geschäftsführer des Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums in Hannover. Aktuell Senior Produkt Manager für Digitalisierung bei einem führenden deutschen Werkzeugmaschinenhersteller.



**Dr.-Ing. Marian Köller** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Leibniz Universität Hannover und der Keio University, Yokohama. Bis 2015 Bereichsleiter Fertigungsplanung und -organisation am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover. Aktuell Leiter der Geschäftsstelle des Netzwerks Industrie 4.0 Niedersachsen.



**Sören Wilmsmeier** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Leibniz Universität Hannover. Von August 2014 bis Februar 2016 Mitarbeiter der Qualitätssicherung im Projektmanagement der Firma ENERCON. Seit März 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover und dort seit Oktober 2019 Leiter der Abteilung für Fertigungsplanung und -steuerung. Tätig in Forschungsprojekten zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung sowie zur adaptiven Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung.



**Dr.-Ing. Florian Winter** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Leibniz Universität Hannover und der Technical University of Denmark, Kopenhagen. Seit der Promotion am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen an der Leibniz Universität Hannover im Jahr 2017 tätig als Leiter der Forschung und Entwicklung bei der Fauser AG, Softwarehersteller für die Produktionsplanung und -steuerung.



# Virtuelle Inbetriebnahme mittels Ablaufsimulation in der Automobilindustrie

# 19

Torben Meyer und Ulrich Grillitsch

Durch die virtuelle Inbetriebnahme, auch als „Emulation“ bezeichnet, werden Steuerungssysteme vor der realen Inbetriebnahme intensiv auf Funktion und unter Last getestet. Dafür wird das in Betrieb zu nehmende Steuerungssystem in einer Testumgebung bereitgestellt und der gesteuerte Bereich (materialflussintensives Produktions- oder Logistiksystem) in einem Simulationsmodell nachgebildet, welches die im realen IT-System relevanten Schnittstellenprotokolle beherrschen muss.

Nach der Erstellung des Simulationsmodells kann es mit dem Steuerungssystem gekoppelt werden, so dass es aus Sicht des Steuerungssystems wirkt, als würde es kein Modell, sondern bereits das reale Produktions- oder Logistiksystem steuern. Auf diesem Wege wird durch einen vorgelagerten Test der Softwarequalität eine Risikoreduzierung (Einhaltung der Zeitfenster, keine Projektverschiebung) bei der Inbetriebnahme des Steuerungssystems erreicht und die Zeit für die reale Inbetriebnahme verkürzt. Vor allem wird das Risiko von Produktionsausfällen nach der Inbetriebnahme, die vom Steuerungssystem verursacht werden, deutlich reduziert, da das komplette System ausführlich getestet wurde. Der nachgelagerte Einsatz des Modells für Schulungen von Betriebs- und Instandhaltungspersonal steigert den Nutzen der Emulation zusätzlich.

---

T. Meyer (✉)  
Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg, Deutschland  
E-Mail: [torben.meyer@volkswagen.de](mailto:torben.meyer@volkswagen.de)

U. Grillitsch  
BMW AG, Regensburg, Deutschland

## 19.1 Motivation

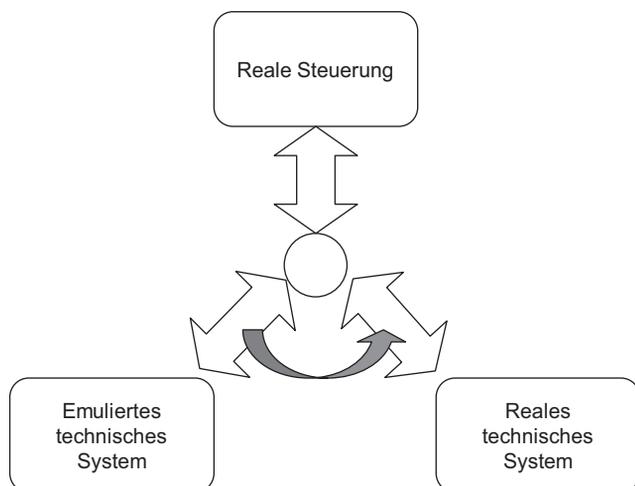
Die Kernidee der virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) ist die Verschiebung von Inbetriebnahmetätigkeiten, die simulativ unterstützt werden können, in vorhergehende Projektphasen. Typischerweise handelt es sich bei diesen Tätigkeiten um die Anpassung und Konfiguration von Steuerungskomponenten an einen konkreten, projektbezogenen Einsatzfall. Die VIBN stellt bereits in frühen Projektphasen eine Testumgebung zur Verfügung, die die Möglichkeit bietet, eine Steuerung unter realitätsnahen Bedingungen zu testen. Damit wird die Softwarequalität der Steuerung vor der eigentlichen Inbetriebnahmephase erhöht. Idealerweise wird durch den Einsatz der VIBN die reale Inbetriebnahmezeit verkürzt, da bei der eigentlichen Inbetriebnahme mit einer besseren Qualität der Steuerungssoftware gearbeitet werden kann. Freigewordene Zeiten können beispielsweise für Qualitäts- oder Taktzeitoptimierung genutzt werden.

Während der VIBN ist die Steuerung mit der Emulationsumgebung verbunden. Dieses Szenario kann für Qualitätsverbesserungen der Steuerung genutzt werden. Ab der realen Inbetriebnahme wird die bereits getestete Steuerung dann mit der realen Anlage verbunden (Abb. 19.1).

Da die VIBN unabhängig von im produktiven Einsatz befindlichen Produktionsanlagen erfolgt, kann sie auch für die Einweisung oder Schulung von Instandhaltungs- oder Bedienpersonal genutzt werden. Ferner gibt es für die Testdurchführung keine Restriktionen durch Personal oder Material, da bei der VIBN beliebig viele Objekte (Paletten, Fahrzeugkarosserien, etc.) im System platziert werden können. Die Testfälle und -szenarien können gezielt aufgezeichnet und wiederholt werden.

Typische Fragestellungen, bei denen die VIBN mit Ablaufsimulation eingesetzt wird, sind u. a. der Massen- oder Lasttest von Systemen (z. B. die virtuelle Erzeugung von

**Abb. 19.1** Umschaltung zwischen realem technischen System und emuliertem technischen System



vielen Behältern in einem automatisierten Logistiksystem), um das Verhalten einer Steuerung im Grenzbereich zu testen oder die Entwicklung einer Steuerung in Verbindung mit einem experimentierfähigen Emulationsmodell.

Vor dem Hintergrund von Industrie 4.0, „Plug & Produce“-Tendenzen und der damit verbundenen Virtualisierung von Komponenten sowie einer erweiterten digitalen Beschreibung der Komponenten kommt der VIBN eine hohe Bedeutung zu. Durch die VIBN kann zu einem frühen Zeitpunkt im Anlagenentstehungsprozess eine virtualisierte und testfähige Produktionsanlage zur Verfügung stehen; dies setzt allerdings eine durchgängige digitale Produktionsplanung einschließlich gepflegter Bibliotheken zur Beschreibung des funktionalen Verhaltens der verwendeten Komponenten voraus.

---

## 19.2 Einleitung

Die VIBN entspricht einer Inbetriebnahme mit der realen Steuerung unter Verwendung eines virtuellen Modells für das gesteuerte System. Die Steuerung befindet sich dabei in einer dedizierten Testumgebung, d. h. Auswirkungen auf produktive Systeme können ausgeschlossen werden. Die Testumgebung steht somit für Anwendungsfälle im Bereich der Software- und Steuerungsentwicklung, der Schulung, des Trainings oder der Einweisung oder für Zwecke des Tests (Factory Acceptance Test, vgl. DIN EN 62381 2006) zur Verfügung.

Bei der Durchführung einer VIBN wird unterschieden zwischen einerseits der Steuerung und andererseits dem über Schnittstellen damit verbundenen technischen System. Die Steuerung ist derjenige Teil des Systems, der durch die Virtuelle Inbetriebnahme getestet werden soll. Bei der Steuerung können in Abhängigkeit vom Anwendungsfall verschiedene Ausprägungen (MFR (Materialflussrechner), SPS (speicherprogrammierbare Steuerungen) oder ERP (Enterprise Resource Planning)) unterschieden werden.

Da das technische System vor der realen Inbetriebnahme in vielen Fällen nicht vollständig und testbereit zur Verfügung steht, ist für die Emulation bzw. Nachbildung des technischen Systems in einem experimentierfähigen Modell eine aufwandsintensive Modellierungsphase erforderlich. Das Emulationsmodell des technischen Systems muss sich gegenüber der Steuerung identisch zum realen technischen System verhalten.

Die reale Steuerung und das technische System kommunizieren miteinander über ein definiertes Schnittstellenprotokoll sowohl in der realen Anlage als auch in der Emulation. Da die realen Komponenten diese Schnittstelle bereits implementiert haben, müssen die Ablaufsimulationsanwendung und das Emulationsmodell das gleiche Schnittstellenprotokoll ebenfalls beherrschen.

Im nächsten Abschnitt wird auf die Unterschiede zwischen Simulation und Emulation sowie deren Ziele eingegangen. Im übernächsten Abschnitt werden die typischen Anwendungsfälle unterschieden, die bei der VIBN auftreten. Insbesondere werden auch typische Beispiele für die Steuerungen, technischen Systeme und Schnittstellen vorgestellt.

### 19.3 Unterschied zwischen Simulation und Emulation

Für das Verständnis der Herausforderungen und Anwendungsfälle bei der virtuellen Inbetriebnahme ist es essenziell, die Unterschiede zwischen der Simulation und der Emulation zu verstehen. Mit den beiden Ansätzen werden in der Regel verschiedene Ziele verfolgt (McGregor 2002). Die eigentliche Simulation in Produktion und Logistik wird meistens planungsbegleitend zur Investitionsabsicherung durchgeführt, während die Emulation bei der VIBN den oben genannten Zielen, beispielsweise dem Test der Steuerungssoftware, dient.

Daraus ergibt sich, dass bei der Simulation in der Regel die schnelle Ausführung des Simulationsmodells gefordert wird, damit große Zeiträume oder viele Parametervariationen abgedeckt und in kurzer Zeit simuliert werden können. Die Emulation wird in Realzeit oder zumindest näherungsweise in Realzeit durchgeführt, damit die Steuerung unter realitätsgetreuen Bedingungen getestet werden kann. Da die Simulatoren bei der Emulation ggf. auch schneller oder langsamer als die Realzeit arbeiten, kann das eine potenzielle Fehlerquelle sein und bedarf besonderer Aufmerksamkeit.

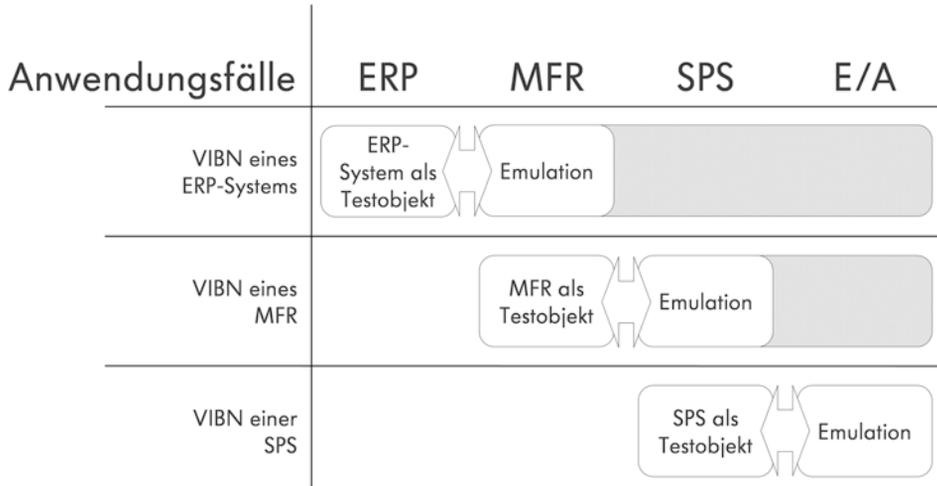
Ein weiterer Unterschied zwischen Simulation und Emulation betrifft die Steuerung des Modells. Während bei der Simulation die Steuerung meistens im Simulationsmodell integriert ist, ist das Emulationsmodell über ein Schnittstellenprotokoll mit einer externen Steuerung verbunden. Folglich erfolgt bei der Simulation im Modell kein Zeitfortschritt während die Steuerungsalgorithmen laufen; die Steuerungsantwort ist verfügbar, ohne dass Simulationszeit verstreicht. Im Gegensatz dazu läuft die Simulationszeit bei der Emulation kontinuierlich weiter, um dem Zeitfortschritt bei der Steuerung zu entsprechen, und die variierenden Antwortzeiten müssen ggf. berücksichtigt werden bzw. mit den realen Signallaufzeiten verglichen werden.

---

### 19.4 Anwendungsfälle

Vergleichbar zur Vorbereitung einer Simulationsstudie sind auch bei der Vorbereitung einer VIBN mittels Ablaufsimulation vorher u. a. das Ziel sowie das Abstraktions- bzw. Detaillierungsniveau des Emulationsmodells zu definieren. Bei der Emulation bedeutet dies konkret, dass definiert werden muss, welche Ausprägung von Steuerung (ERP, MFR oder SPS) in Betrieb genommen bzw. getestet werden soll (siehe Abb. 19.2). Dabei steht die Abkürzung E/A in der Abbildung für Ein- bzw. Ausgabe auf Signalebene.

In Abhängigkeit von dieser Entscheidung wird neben der Detaillierung des Emulationsmodells auch das zu verwendende Schnittstellenprotokoll festgelegt. Das Emulationsmodell muss hinreichend genau modelliert sein, so dass aus Sicht der zu testenden Steuerung das nachgebildete technische System nicht von dem realen technischen System zu unterscheiden ist. Vereinfachungen bzw. Abstraktionen im Modell können jedoch zur Aufwandsreduzierung in der Modellierungsphase notwendig sein. Im Wesentlichen werden bei der praktischen Anwendung die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Fälle unterschieden.



**Abb. 19.2** Anwendungsfälle der Virtuellen Inbetriebnahme (in Anlehnung an Kemper und Spieckermann 2010)

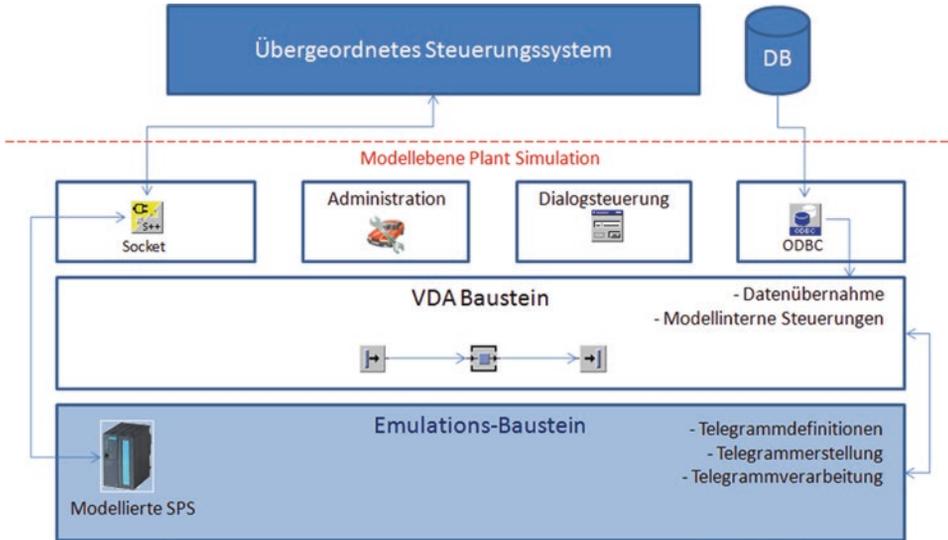
### 19.4.1 VIBN eines Materialflussrechners

Die VIBN eines Materialflussrechners bzw. eines ERP-Systems verfolgt den bereits beschriebenen Zweck, die der SPS übergeordnete Steuerung unter realen Bedingungen auf Funktion und Last zu testen. Dafür wird die gesamte Fördertechnik bzw. die gesamte Produktionsanlage mit allen zugehörigen SPSen in einem Emulationsmodell nachgebildet und per simulationsinterner Socket-Schnittstelle oder Datenbankverbindung mit einem Testsystem verbunden, auf dem das reale Steuerungssystem (MFR, ERP) installiert ist.

Die SPS-Ebene wird nur soweit nachgebildet, dass Telegramme gesendet und empfangen werden können. Eingabe- und Ausgabe-Signale (E/A-Signale), Funktions- und Datenbausteine einer SPS werden dabei nicht im Detail betrachtet. Aus Sicht des Steuerungssystems verhält sich das Simulationsmodell nun wie eine echte Produktionsumgebung. Somit kann der komplette Telegrammverkehr unter realitätsnahen Bedingungen ablaufen und das Steuerungssystem anhand von vorher festgelegten Testfällen (Use Cases) überprüft werden.

Vom Materialflussrechner empfängt die SPS Informationen über die zu produzierenden Aufträge und verarbeitet diese. Dieser Informationsaustausch erfolgt über einen Telegrammverkehr (beispielsweise in Form von strukturierten ASCII-Zeichenketten oder Binärkodes), in dem alle relevanten Daten enthalten sind. Es existieren typischerweise mehrere verschiedene Telegrammtypen, um der Prozesskomplexität gerecht zu werden und alle Prozessschritte abdecken zu können (z. B. Telegramme für Ein- und Auslagerungen, Statusinformationen an Meldepunkten, Auftragsanforderungen, etc.).

Um eine VIBN mit diesem Anwendungsfall durchführen zu können, muss auf der einen Seite die Verfügbarkeit der (der SPS übergeordneten) Steuerung bzw. des Steuerungssystems



**Abb. 19.3** Erforderliche Schnittstellen bei einer VIBN von Materialflussrechnern

(Test-Instanz) gegeben sein. Auf der anderen Seite wird auch ein Fachkonzept oder IT-Konzept des in Betrieb zu nehmenden Prozesses benötigt. Die erforderlichen Schnittstellen sind in der Abb. 19.3 dargestellt. Das übergeordnete Steuerungssystem ist mit der Socket-Schnittstelle verbunden. Datenbankzugriffe erfolgen über die ODBC (Open Database Connectivity)-Schnittstelle. Beide Schnittstellen sind in vielen Simulationswerkzeugen verfügbar und sind Standard-Objekte z. B. im Simulationssystem Plant Simulation, für das die VDA (Verband der Automobilindustrie) Arbeitsgruppe Ablaufsimulation eine spezielle Objektbibliothek entwickelt hat.

Steuerungssysteme arbeiten in vielen Fällen mit Datenbanken, in denen die kompletten Produktionsdaten abgelegt werden. Um auf diese Daten zugreifen zu können, wird in Simulationsmodellen eine Datenbankschnittstelle genutzt (z. B. die ODBC-Schnittstelle von Plant Simulation). Damit können per SQL-Abfragen genau die benötigten Informationen ausgelesen werden, z. B. für eine Vorbelegung des Modells mit den Paletten, die laut Datenbank zum Zeitpunkt der Initialisierung des Modells schon auf der Fördertechnik stehen. Alle Ereignisse, die die Emulation durch den Telegrammverkehr im Steuerungssystem auslöst, werden dann wie bei der realen Produktionsumgebung in der Datenbank gespeichert. Somit muss darauf geachtet werden, dass beim Emulationsstart immer eine definierte bzw. zurückgesetzte, bereinigte Datenbasis vorliegt.

Je nach Anforderung des Prozessverantwortlichen im Fachbereich wird das Modell abstrakt oder detailliert aufgebaut. Ein abstraktes Modell beinhaltet nur den logischen Fachprozess, ohne Prozessinformationen wie z. B. das Layout, die Bearbeitungszeiten von Stationen, die Anzahl von Stationen oder die Fördergeschwindigkeiten zu berücksichtigen. Es

werden nur diejenigen Stationen modelliert, die einen Telegrammverkehr auslösen. Ein detailliertes Modell berücksichtigt auch die Prozessinformationen, die im abstrakten Modell nicht notwendig sind. Detaillierte Modelle benötigen daher mehr Modellierungsaufwand.

Ein Telegramm ist eine strukturierte ASCII-Zeichenkette, die Auftrags- und Prozessinformationen beinhaltet. Die Telegrammlänge (in Bytes) und der Telegammaufbau (Struktur) werden abhängig vom Steuerungssystem und dem verbundenen Prozess festgelegt. Das Telegramm besteht beispielsweise jeweils aus einem vorlaufenden Kopf (Header) und einem Datenteil. Der Kopf dient dem entsprechenden Steuerungssystem zur eindeutigen Identifizierung des Telegramms und beinhaltet den Sender und Empfänger (zur konkreten Zuordnung an eine SPS), den Telegrammtyp (der beschreibt, wie der Datenteil aufgebaut ist) und ggf. die Telegrammversion, damit beide Kommunikationspartner wissen, wie das Telegramm zu interpretieren ist.

Der Datenteil beinhaltet neben der Auftrags- oder Transaktionskennung die Nutzdaten sowie ggf. auch den Zeitstempel. Tab. 19.1 zeigt beispielhaft die Struktur eines Telegramms.

In der Form einer zusammenhängenden Zeichenkette werden die Informationen wie folgt übertragen:

```
SPS00001SPS00001PLSSTARTTRAN000199PLSSTARTPID-
00000000000001PID_SPS000010000220150423105501
```

Als Schnittstellenprotokoll zur Verbindung mit einem MFR kommt häufig das TCP/IP-Protokoll (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) zum Einsatz. Hier werden zwei Varianten favorisiert: ein natives Protokoll, das nur das Telegramm überträgt, oder ein sogenanntes TCP/IP RFC1006 (Request für Comments) Protokoll, das zusätzlich einen Telegrammheader zur eindeutigen Identifizierung eines Telegramms mitsendet.

**Tab. 19.1** Beispiel der Telegrammstruktur eines SPS Start-Telegramms

Beschreibung	Byte Start	Anzahl Bytes	Inhalt
SPS-Absender	1	8	SPS00001
SPS-Empfänger	9	8	SPS00001
Telegrammname	17	8	PLSSTART
Quittungsinfo	25	4	TRAN
Telegrammversion	29	4	0001
Prozess-Kennzeichen	33	2	99
TG-Kennung	35	8	PLSSTART
Transaktions-Kennung	43	17	PID00000000000001
Prozess-ID	60	3	PID
SPS-Anlagenkennziffer	63	14	SPS0000100002
Zeitstempel	77	14	20150423105501

## 19.4.2 Virtuelle Inbetriebnahme einer SPS

Die VIBN einer SPS mit Ablaufsimulation kann beispielsweise für den Karosseriebau eingesetzt werden, da dort oft ein hoher Automatisierungsgrad vorherrscht und zahlreiche SPSen zum Einsatz kommen. Im Zuge der immer umfassenderen Automatisierung und Vernetzung können im Modell verschiedene Szenarien implementiert werden, um die SPS-Programme zu testen (vgl. Abb. 19.4).

Wie bei allen Emulationen werden das Schnittstellenprotokoll und damit das Detaillierungsniveau des Modells von der Steuerung und der Fachabteilung vorgegeben. Über die Schnittstelle werden die Speicherbereiche der SPS ausgelesen bzw. manipuliert. Typischerweise werden die Informationen dabei als Signal (Boolean), Zahlenwerte (Byte, Word, DWord, etc.), seltener als Felder (Arrays) oder Zeichenketten (Strings) übertragen.

Im Gegensatz zur Anlagensimulation wird bei der Emulation mit Ablaufsimulation nicht das Roboterprogramm getestet, vielmehr sind der Roboter und das damit verbundene Roboterprogramm Bestandteile des Modells.

### 19.4.2.1 Schnittstellenprotokolle

Als Schnittstellenprotokolle zur Verbindung mit einer SPS kommt entweder ein natives Feldebeneprotokoll oder das für den Datenaustausch zur Feldebene erdachte Object Linking and Embedding for Process Control (kurz OPC) zum Einsatz. Für die verbreiteten Simulationsanwendungen sind Schnittstellen erhältlich, die eine direkte Verbindung mit einem Feldebeneprotokoll ermöglichen, aber umfassend zu parametrisieren sind. Als beispielhafte Implementierung soll hier die so genannte PLCconnect-Schnittstelle genannt werden.

OPC lässt sich mit wenig Aufwand konfigurieren und verbreitete Simulationsanwendungen bringen bereits OPC-Schnittstellen mit. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass das Einschalten der OPC-Schnittstelle auf der realen SPS die SPS-Zykluszeit deutlich verlangsamt und auf diesem Weg keine Sicherheitssignale mit der SPS ausgetauscht bzw. manipuliert werden können. Darüber hinaus ist die Latenz der OPC-Verbindung gegenüber den klassischen Feldebeneverbindungen höher, so dass bei hohen Echtzeitanforderungen seitens der Steuerung von einer OPC-Verbindung abzusehen ist.

### 19.4.2.2 Auswahl des Simulators

Im Zusammenhang mit der Emulation von vielen Komponenten auf der Feldebene muss an dieser Stelle auf die Grenzen der Leistungsfähigkeit von Simulatoren bei der Ablaufsimulation hingewiesen werden. Bei einer VIBN einer SPS bestehen hohe Anforderungen an die Reaktionszeit der Emulation. Die SPS erwartet die Aktualisierung der Signalzustände echtzeitnah; dies ist u. a. begründet in der Zykluszeit der SPS, welche sich im Bereich von Millisekunden bewegt.

Für die Modellierung von derartigen Anlagenkomponenten auf E/A-Ebene haben sich eigene Applikationen entwickelt, die nicht der Ablaufsimulation zuzuordnen sind und die nicht ereignisdiskret arbeiten. Hierbei handelt es sich beispielsweise um die Applikationen

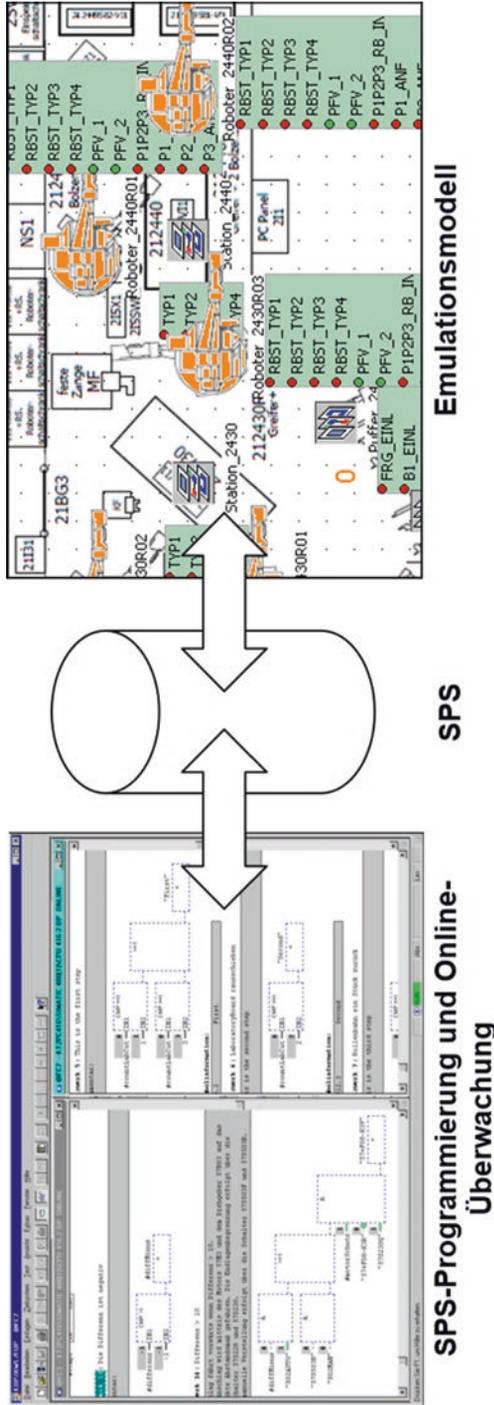


Abb. 19.4 Virtuelle Inbetriebnahme einer speicherprogrammierbaren Steuerung

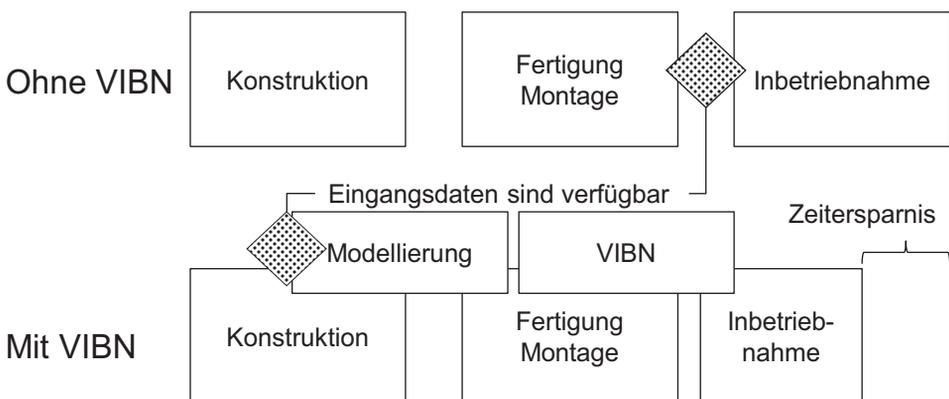
SIMIT (von Fa. Siemens) oder WinMOD (von Fa. Mewes und Partner). Vor der Durchführung der VIBN einer SPS sollte der Einsatz dieser Applikationen hinsichtlich der Anforderungen und Randbedingungen geprüft werden.

## 19.5 Projektablauf

Die Virtuelle Inbetriebnahme wird auch als Vorabinbetriebnahme bezeichnet und findet im Entstehungsprozess von Produktionsanlagen zwischen der Produktionsplanungs- und der Inbetriebnahmephase statt bzw. wird bereits der Inbetriebnahmephase zugeordnet (Meyer 2014). Für einen nutzbringenden Einsatz der VIBN muss daher auch das Emulationsmodell bereits mit Beginn der VIBN zur Verfügung stehen. Folglich fällt der Aufwand für die Modellerstellung in die Planungsphase.

Aufgrund der Tatsache, dass zusätzlich ein Modell erstellt werden muss, erfährt der bisher etablierte Entstehungsprozess der Produktionsanlagen eine wichtige Änderung. Reichte es bisher bei allen beteiligten Engineeringprozessen (Steuerungstechnik, Konstruktion, Elektroplanung, etc.) aus, ihre jeweiligen Ergebnisse spätestens mit Beginn der Inbetriebnahmephase abzugeben, so ist es nun erforderlich, diese Ergebnisse früher in der Planungsphase zur Verfügung zu stellen (vgl. Abb. 19.5). Damit ermöglicht die VIBN erstmalig auch, vor der eigentlichen Inbetriebnahmephase das Zusammenspiel der Ergebnisse aller beteiligten Engineeringprozesse zu beurteilen. Folglich könnte mit der VIBN auch ein sogenanntes *quality gate* für den Projektablauf etabliert werden.

Zur Erlangung von gesicherten Simulationsergebnissen ist die Anwendung von Methoden der Verifikation und Validierung (V&V) unerlässlich (Rabe et al. 2008). Zusätzlich zu den Bestandteilen der Emulation, die auch eine gewöhnliche Simulation enthält, sind die V&V-Methoden ebenfalls auf die zusätzlichen Bestandteile der Emulation anzuwenden. Hierzu zählt vor allem die Implementierung der Schnittstelle bzw. der Kommunikation, die über die Schnittstellen abgewickelt wird.



**Abb. 19.5** Projektablauf mit VIBN-Meilensteinen

Die betriebliche Praxis zeigt, dass die erstmalige Durchführung einer VIBN mit beachtenswerten Aufwänden verbunden ist. Diese sind begründet in der ggf. erstmaligen Implementierung der relevanten Schnittstellen zwischen Simulator und Steuerung, der initialen Erstellung der Simulationsbibliotheken für die VIBN, etc. Nachdem die Erstaufwendungen erbracht wurden, werden sich jedoch bei gleichartigen Emulationen Skalen- und Erfahrungskurveneffekte einstellen, d. h. der Ablauf von Emulationsprojekten wird weniger aufwendig und somit schneller durchführbar sein (Stetter 2004).

---

## 19.6 Durchdringungsgrad bei OEMs

Bei der Analyse des Durchdringungsgrads der VIBN muss eine Unterscheidung zwischen den Anlagenlieferanten und den Anlagenbetreibern vorgenommen werden. Anlagenlieferanten entwickeln und produzieren häufig gleichartige Anlagen und können sich daher leichter eigene Standards entwickeln. Die Anlagenbetreiber, zu denen auch die OEMs gehören, wählen die Anlagen häufig bevorzugt unter kaufmännischen Gesichtspunkten aus. Das erschwert den Einsatz der VIBN, da Anlagenkomponenten unterschiedlicher Hersteller im Einsatz sind und emuliert werden müssen. Etwas anders verhält es sich, wenn der OEM eine eigene Steuerungsentwicklung betreibt, die dann ihrerseits Standards für den OEM selbst entwickeln und so die VIBN deutlich erleichtern kann.

Der Durchdringungsgrad z. B. mit der Software Plant Simulation ist bei den Automobilherstellern in Deutschland groß, Plant Simulation ist dort ein etabliertes Werkzeug. Der Einsatz beschränkt sich aber hauptsächlich auf Simulationsanwendungen, weniger auf virtuelle Inbetriebnahmen. Das liegt daran, dass Emulationen derzeit überwiegend auf SPS-Ebene (siehe Abschn. 19.4.2) durchgeführt werden, für die Plant Simulation aus den oben diskutierten Gründen nur eingeschränkt geeignet ist.

---

## 19.7 Zusammenfassung

Die Verwendung der etablierten Materialfluss- bzw. Ablaufsimulation für die VIBN bietet sich bei den diskutierten Anwendungsfällen an und wurde bereits erfolgreich durchgeführt. Die Publikationen der vergangenen Jahre zeigen, dass die Entwicklung noch lange nicht abgeschlossen ist. So wurde beispielsweise die Standardisierung von Emulationsmodellen (Grillitsch und Mayer 2010) ebenso diskutiert, wie deren mögliche teilautomatische Generierung (Meyer und Straßburger 2013).

In diesem Kapitel wurde eingangs erläutert, dass die VIBN zur Verkürzung der Inbetriebnahmedauer und zur Risikoreduzierung bei der Softwarequalität der Steuerungssoftware eingesetzt werden kann. Anschließend wurden die Begriffe Simulation und Emulation voneinander abgegrenzt und es wurden exemplarisch Potenziale sowie Schnittstellen dargestellt. Schließlich wurde auf den Projektablauf sowie den Durchdringungsgrad eingegangen.

Die Bedeutung der VIBN wird in den kommenden Jahren aus zwei Gründen weiterhin zunehmen. Auf der einen Seite steht aufgrund verkürzter Produktentstehungsprozesse und reduzierter Markteinführungsdauer immer weniger Zeit für die Inbetriebnahme zur Verfügung, so dass alle Potenziale an dieser Stelle ausgeschöpft werden müssen. Auf der anderen Seite ist die Absicherung der Steuerungssoftwarequalität (Meyer 2014) eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzung von Industrie 4.0 Visionen oder Plug&Produce-Ideen. Die VIBN ist damit ein wichtiger Wegbereiter der vierten industriellen Revolution.

---

## Literatur

- DIN EN 62381 (2006) Automation systems in the process industry – factory acceptance test (FAT), site acceptance test (SAT), and site integration test (SIT)
- Grillitsch U, Mayer G (2010) Auf dem Weg zum Standard – Virtuelle Inbetriebnahme von IT-Steuerungssystemen in der Produktionssteuerung. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 591–598
- Kemper J, Spieckermann S (2010) Emulation von Logistik-Steuerungen in SAP-Umgebungen. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 583–590
- McGregor I (2002) The relationship between simulation and emulation. In: Yücesan E (Hrsg) Proceedings of the 2002 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 1683–1688
- Meyer T (2014) Die Schnittstelle von der Digitalen Fabrik zum Digitalen Fabrikbetrieb. ZWF 109:752–755
- Meyer T, Straßburger S (2013) Methoden zur teilautomatischen Generierung von Emulationsmodellen. In: Dangelmaier W, Laroque C, Klaas A (Hrsg) Simulation in Produktion und Logistik. HNI Verlagsschriftenreihe, Paderborn, S 741–750
- Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S (2008) Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Springer, Berlin/Heidelberg
- Stetter R (2004) Ein Low-Budgetansatz zur Simulation von Produktionssystemen. In: Zäh MF, Reinhart G (Hrsg) Virtuelle Produktionssystemplanung: virtuelle Inbetriebnahme und digitale Fabrik. Utz, München, S 3.1–3.23



**Dr. Torben Meyer** Studierte bis 2010 Wirtschaftsingenieurwesen an der FH Wedel, der Nottingham Trent University und der TU Ilmenau. Herr Meyer hat über mehrere Jahre die VDA-Arbeitsgruppe Virtuelle Inbetriebnahme geleitet. Das derzeitige Aufgabenfeld von Herrn Meyer im Bereich des Werkzeug- und Anlagenbaus der Volkswagen AG in Wolfsburg umfasst die Einführung eines Produktlebenszyklusmanagements (PLM).



**Ulrich Grillitsch** Studierte zwischen 1980 und 1985 Maschinenbau an einer österreichischen höheren technischen Lehranstalt und begann 1987 seine Tätigkeit für die BMW AG. Zwischen den Jahren 2000 und 2008 beschäftigte er sich als Simulationsexperte mit Materialflusssimulation in der Produktionssteuerung. Seit dem Jahr 2008 liegt sein Aufgabenfokus auf der virtuellen Inbetriebnahme in der Prozess-IT.



# Simulation des Personaleinsatzes in der Automobilindustrie

# 20

Gert Zülch

## 20.1 Notwendigkeit zur Integration des Personaleinsatzes in die Ablaufsimulation

### 20.1.1 Bedeutung des Personaleinsatzes für die Produktivität von Arbeitssystemen

Allenthalben findet sich in Veröffentlichungen der Hinweis darauf, dass der Mensch die wichtigste Ressource in der Produktion darstellt. Dies sollte dann aber auch für die Ablaufsimulation im Bereich der Automobilindustrie gelten. Umso mehr überrascht es, dass der Personaleinsatz nur vereinzelt simuliert wird, obwohl die zugehörigen Methoden bereits seit den Anfängen der Personalsimulation in den 1980er-Jahren bekannt sind (vgl. zur Historie in Deutschland Zülch 2015). Auch besteht bereits seit nahezu anderthalb Jahrzehnten eine VDI-Richtlinie 3633 Blatt 6 (VDI 2001), die sich speziell mit der Abbildung des Personals in Simulationsmodellen befasst.

Eversheim und Abels (2003) behandeln den Personaleinsatz in einer „manuell geprägten“ Pkw-Endmontage. Etwas eingehender befassen sich Clausing und Heinrich (2008) mit dem „Vergleich der Werkzeuge MTM und Ablaufsimulation zur Darstellung von Werkerabläufen“. Diese Autoren betrachten jedoch typischerweise nur manuelle Stationen, nicht aber deren Kombination mit mechanisierten und automatisierten Arbeitsvorgängen, wie sie heutzutage bereits vielfach üblich ist.

Auch andere Literaturstellen behandeln die Thematik der Simulation des Personaleinsatzes in der Automobilproduktion eher beiläufig (vgl. z. B. Petri 2003; Huber und Wenzel 2011). Dies mag daran liegen, dass die meisten Automobilunternehmen in Deutschland

---

G. Zülch (✉)

Institut für Arbeits- und Betriebsorganisation, Karlsruher Institut für Technologie,  
Weingarten (Baden), Deutschland

E-Mail: [gert.zuelch@gefora-beratung.de](mailto:gert.zuelch@gefora-beratung.de)

derartige Untersuchungen, die zumeist im Planungsstadium neuer Produktionssysteme entstehen, als Firmengeheimnisse betrachten und diese daher nicht veröffentlichen wollen (siehe zum Nachweis z. B. Fritzsche 2012, S. 14).

### **20.1.2 Übertragbarkeit von Simulationsansätzen aus anderen Bereichen auf die Automobilindustrie**

Vorhandene Simulationsverfahren und Modellierungsansätze lassen sich jedoch auch auf Arbeitssysteme in der Automobilindustrie übertragen. Grundlegende Voraussetzung ist hierfür allerdings, dass es das Konzept des Verfahrens ermöglicht, Menschen und Betriebsmittel als gleichberechtigte Ressourcen zu behandeln, was sich vor allem in der Forderung nach separaten Ausführungs- und ggf. Rüstzeiten des Personals sowie der Betriebsmittel ausdrückt (vgl. zu den zeitwirtschaftlichen Begriffen im Folgenden REFA 2011, S. 23 ff.). Gleiches gilt für die Arbeitszeit der Belegschaft und die Betriebszeit der technischen Einrichtungen des betrachteten Arbeitssystems.

Vor diesem Hintergrund lassen sich unterschiedlichste Arbeitssysteme in der Automobilindustrie simulativ betrachten: Im Vordergrund stehen dabei oftmals Endmontagesysteme mit ihren eher physiologischen Anforderungen, aber auch Komponentenmontagen mit unterschiedlichen Mechanisierungs- und Automatisierungsgraden. Weiterhin können Teilefertigungssysteme Gegenstand von Simulationsuntersuchungen sein (vgl. bezüglich einer Werkzeugfertigung in einem Automobilunternehmen Zülch et al. 2009a, S. 2246 f.). Auch in den indirekten Bereichen der Produktion lassen sich Modellierungsansätze finden, so vor allem in der Organisation von Instandhaltungs- und Qualitätssicherungsfunktionen. Schließlich gibt es auch bereits Ansätze, eher durch mentale Anforderungen geprägte Abteilungen zu simulieren (Zülch und Schmidt 2011). Nachfolgend sollen zu diesem Themenkreis einige Problembereiche und deren Möglichkeiten zur Simulation aufgezeigt werden.

---

## **20.2 Simulation des Personaleinsatzes in Montagelinien**

### **20.2.1 Simulation alternativer Planungslösungen**

Ein klassisches Problem der Planung im Automobilbereich stellt die Leistungsabstimmung von Montagelinien dar (Abb. 20.1). Da Endmontagelinien heutzutage mit gemischten Auftragsprogrammen betrieben werden, kommen im Anschluss an die Leistungsabstimmung des technischen Systems Simulationsverfahren vorrangig bei zwei organisatorischen Problemen zum Einsatz: Bei der Planung einer Montagelinie stellt sich zum einen die Frage der Überprüfung des vorgesehenen Personaleinsatzes, und zwar dann, wenn weniger Personal eingesetzt werden soll als Stationen mit bereits zugeordneten Montagevorgängen vorhanden sind, oder zum anderen, wenn einer Arbeitsgruppe



**Abb. 20.1** Virtueller Blick in eine Automobil-Endmontage (Siemens PLM Software 2010, S. 14 f.)

mehrere Montagestationen zugeordnet werden sollen. In beiden Fällen ist insbesondere zu klären, wie sich die notwendigen Wegezeiten der Mitarbeiter auf die Produktivität der Montagelinie auswirken.

Zülch et al. (2002a, S. 43 ff.) verwenden für die Leistungsabstimmung einer Getriebemontage in der Automobilindustrie ein statisches Verfahren, mit dem die technische Systemstruktur für ein einheitliches Produkt ausgelegt werden kann. Sie verifizieren mögliche Lösungen des Problems dadurch, dass sie mehrere aus einem solchen Planungsverfahren resultierende Alternativen in ein kommerzielles Simulationsverfahren übertragen und dort hinsichtlich ihrer dynamischen Eigenschaften untersuchen.

Auf diese Weise lässt sich die technische Systemstruktur in Verbindung mit dem Personaleinsatz auf Basis bekannter produktionslogistischer Kennzahlen bewerten, und dies auch bei einem variantenreichen Auftragsprogramm. Im vorliegenden Fall gehören zu den Kennzahlen neben der erzielbaren Stückzahl pro Zeitabschnitt die Auslastung der Mitarbeiter und der Stationen mit zum Teil parallelen Arbeitsplätzen. Weiterhin kann mit Hilfe der Simulation auch ein Beitrag zur Dimensionierung von Puffern zwischen den Stationen geleistet werden.

### **20.2.2 Steuerung variantenreicher Auftragsprogramme bei variierendem Personaleinsatz**

Ein weiterer Problembereich besteht bei gegebener technischer Struktur des Montagesystems und geplantem Personaleinsatz bezüglich der Steuerung eines variantenreichen Auftragsprogramms. Obwohl hierfür in der Literatur vielfältige Lösungsverfahren auf der Basis stochastisch verteilter Stationszeiten vorhanden sind, kann auch in diesem Fall letztlich nur die Simulation mit ihren vielfältigen Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Randbedingungen (z. B. Zonenbeschränkungen, Einrichtungsgrenzen und Zwangsfolgen von Arbeitsvorgängen) Aufschluss über das Erreichen gewünschter Kennzahlen geben.

Der Vorteil der Simulation ist auch darin zu sehen, dass gegenüber statischen Planungsverfahren nicht nur ein Zielkriterium verfolgt werden kann, sondern aus den Ergebnissen des Simulationsverfahrens mehrere davon bewertet werden können. In welcher Weise diese mehrfachen Zielsetzungen zu einer gesamtheitlichen aggregiert werden, ob mit additiver, lexikografischer oder Pareto-effizienter Präferenzfunktion, bleibt dabei dem Benutzer des Simulationsverfahrens überlassen.

### **20.2.3 Berücksichtigung von Mitarbeitern mit Einsatzbegrenzungen**

In aller Regel geht man bei der Planung von Montagesystemen davon aus, dass alle Mitarbeiter die ihnen zugeordneten Tätigkeiten und Montagestationen beherrschen. Dies ist in der Anlaufphase eines Montagesystems jedoch keineswegs der Fall, auch wenn dann bereits eine bestimmte Stückzahl pro Zeitabschnitt montiert werden soll.

Aber auch in der Hochlaufphase einer Montagelinie muss mit einem gewissen Wandel oder auch einer begrenzten Einsatzfähigkeit der Mitarbeiter gerechnet werden. Dies kann zum Beispiel dazu führen, dass je nach Schicht mit einer anderen Personalbesetzung geplant werden muss. Dies lässt sich durch die oben angesprochene Unterscheidung zwischen der Arbeitszeit der Mitarbeiter, hier der Schichtgruppen, und der Betriebszeit der Montageeinrichtungen berücksichtigen.

Einen weiteren Umstand können qualifikatorische Einschränkungen einzelner Mitarbeiter bedeuten, was deren Einsatz an bestimmten Stationen verhindert. Als Parameter der Qualifikationsstruktur einer Belegschaft wurde die Qualifikationsdichte definiert: Sie drückt prozentual aus, wie viele Arbeitsvorgänge eine Person im Vergleich zu allen im Arbeitssystem vorkommenden Arbeitsvorgängen ausführen kann. Die Streuung dieser Kennzahl macht quantitativ die Diversifikation der vorhandenen Qualifikationen deutlich. Es kann gezeigt werden, dass nur im mittleren Bereich der Qualifikationsdichte die Möglichkeit besteht, die Produktivität des Arbeitssystems positiv zu beeinflussen, während in den Extremfällen, also der Einzelplatzarbeit und der Mehrstellenarbeit über alle Stationen, hierfür keine Möglichkeiten bestehen (Zülch et al. 2002b, S. 443).

---

## **20.3 Simulation des Personaleinsatzes in der Komponentenmontage**

### **20.3.1 Berücksichtigung der allein vom Arbeitsgegenstand abhängigen Zeiten**

Komponentenmontagen in der Automobilproduktion weisen in der Regel einen höheren Automatisierungsgrad auf als Endmontagen. Dies führt dazu, dass es bei der Leistungsabstimmung nicht ausreicht, sich wie üblich auf eine günstige Zuordnung von Montagevorgängen zu Stationen zu konzentrieren. Durch den höheren Automatisierungsgrad sind in der Regel weniger Mitarbeiter als Montagestationen mit den darin ggf. enthalte-

nen parallelen Arbeitsplätzen notwendig, sodass zusätzlich eine günstige Zuordnung von Mitarbeitern zu Stationen zu finden ist.

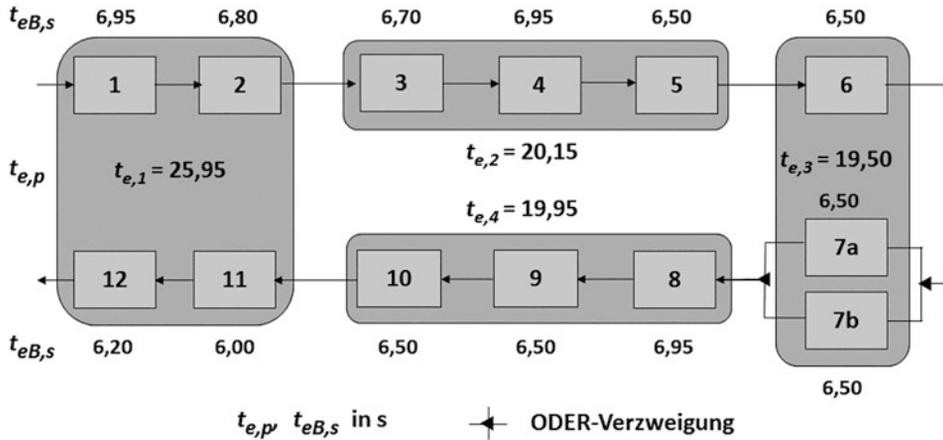
Müller (2002, S. 70 ff.) weist auf eine weitere Möglichkeit der Produktivitätssteigerung hin, wenn auch Zeiten des Arbeitsgegenstandes berücksichtigt werden, die weder eine besondere Station noch eine manuelle Tätigkeit erfordern. Beispiele hierfür sind Abkühlprozesse, Trocknungsvorgänge und Abbindezeiten von Klebverbindungen. In diesen Zeiträumen kann ein weiterer Arbeitsgegenstand die zuletzt durchlaufene Station nutzen oder der Mitarbeiter an einer anderen Station eingesetzt werden. Auch in diesem Falle kann die Simulation zur Verifikation und Quantifizierung möglicher Einsparungen dienen.

### 20.3.2 Alternativen des Personaleinsatzes in U-förmigen Montagesystemen

Gerade in Montagesystemen mit kleinvolumigen Arbeitsgegenständen hat sich in letzter Zeit eine U-förmige Anordnung der Stationen bewährt. In Bezug auf die Zuordnung von Montagevorgängen zu Stationen (z. B. mittels Vorranggraph) können grundsätzlich dieselben Methoden der Leistungsabstimmung wie bei geradlinigen Systemen verwendet werden, da dasselbe Ablaufprinzip zugrunde liegt. Anders verhält es sich mit der Zuordnung des Personals zu den Montagestationen, da hier wegen der Anordnung der Stationen auf zwei gegenüber liegenden Schenkeln des Systems im Vergleich zu geradlinigen Systemen weitere Einsatzmöglichkeiten des Personals bestehen. Diese reichen von der trivialen Lösung, dass jeweils ein Mitarbeiter eine Station bedient, bis hin zu der Möglichkeit, dass jeder Mitarbeiter alle Stationen des U-förmigen Montagesystems in Form eines materialflussbegleitenden Einsatzes bedient. Beide Möglichkeiten scheiden jedoch vielfach aus, wenn aufgrund des hybriden Charakters des Systems mit manuellen, mechanisierten und automatisierten Stationen weniger Mitarbeiter eingesetzt werden als Stationen vorhanden sind. Ein weiterer Problemfall besteht dann, wenn wegen qualifikatorischer Engpässe ein Materialfluss begleitender Personaleinsatz oder eine Zuordnung zu mehreren Stationen nicht realisierbar ist.

Somit bieten sich vor allem Einsatzformen an, bei denen die Mitarbeiter an benachbarten oder gegenüberliegenden Stationen eingesetzt werden; Abb. 20.2 zeigt eine ebenfalls mögliche Mischform beider Zuordnungen. Hierin sind die üblicherweise als Vorranggraph modellierten Montagevorgänge bereits den zwölf Stationen (davon eine mit zwei parallelen Arbeitsplätzen) in einem Kapazitätsgraphen zugeordnet, während die vier eingesetzten Personen als Personaleinsatzgraph dargestellt sind. Für die letztgenannte Planungsaufgabe sind jedoch andere Methoden als für die Leistungsabstimmung bzw. die Auslegung des Kapazitätsgraphen der Stationen notwendig, um auch eine Zuordnung der Mitarbeiter zu gegenüberliegenden Stationen zu ermöglichen.

In der Abbildung sind beispielhaft die Betriebsmittelzeit je Einheit  $t_{e,s}$  jeder Station  $s$  angegeben sowie die personellen Zeiten je Einheit  $t_{e,p}$  für jede Person  $p$ . Das Funktionslayout des Kapazitätsgraphen macht bereits deutlich, dass eine statisch als möglich erscheinende Taktzeit von 26 Sekunden nicht realisierbar ist, da zusätzlich zu den Tätigkeitszeiten der Mitarbeiter an den ihnen zugeordneten Stationen auch die Wegezeiten



**Abb. 20.2** Personaleinsatz an benachbarten und gegenüber liegenden Stationen eines U-förmigen Montagesystems

zwischen diesen Stationen berücksichtigt werden müssen. Zülch und Zülch (2014, S. 2187 ff.) zeigen anhand einer Simulationsstudie zu diesem Fall, dass nur etwa zwei Drittel der geplanten Stückzahl pro Schicht erreicht werden kann. Außerdem weist die Personalauslastung eine relativ große Spannweite auf, die etwa bei einem Drittel des mittleren Wertes liegt. Eine solche ungleichmäßige Verteilung der Tätigkeitszeiten wird von den Mitarbeitern des Systems erfahrungsgemäß als ungerechtfertigt angesehen und kann zu Motivationsproblemen führen.

Ein Forschungsgegenstand bei U-förmigen Montagesystemen ist daher auch der Einfluss der Wegezeiten im Verhältnis zu den Tätigkeitszeiten der Mitarbeiter bzw. zu den Stationszeiten. Weitere Fragestellungen betreffen die Lage und Größe möglicher Puffer zwischen den Stationen sowie den Einfluss von Störungen auf die Produktivität. Der erste Fall trifft vor allem auf variantenreiche Montagesysteme zu, in denen es aufgrund variantenabhängiger Stationszeiten zu Stauungen an einzelnen Stationen kommen kann, die erst wieder durch nachfolgende Arbeitsgegenstände ausgeglichen werden können. Die Pufferung kann zu einem Ausgleich und damit zu einer höheren Produktivität auf Kosten des Platzbedarfes und der Durchlaufzeiten der Aufträge führen. Weiterhin können Puffer auch dazu dienen, kurzfristige Störungen einzelner Stationen auszugleichen, allerdings wiederum verbunden mit den genannten Nachteilen.

### 20.3.3 Simulation des Personaleinsatzes bei älter werdender Belegschaft

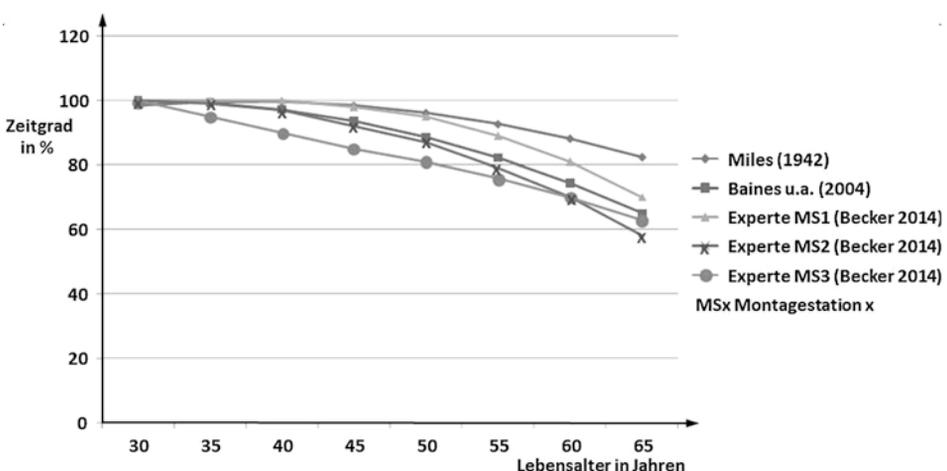
Ein immer drängenderes Problem, und dies nicht nur in der Automobilindustrie, sind demografische Veränderungen in der Gesellschaft und damit auch in einer Belegschaft. Insbeson-

dere in den durch physiologische Anforderungen geprägten Arbeitssystemen ist mit dem Älterwerden der Mitarbeiter mit zunehmenden Produktivitätseinbußen zu rechnen, die nicht mehr durch größere Erfahrung ausgeglichen werden können.

Eine Möglichkeit, die abnehmende Leistungsfähigkeit von Mitarbeitern simulativ abzubilden, ist die Berücksichtigung des Zeitgrades, der das Verhältnis der geplanten Sollzeit eines Arbeitsvorganges zur benötigten Istzeit eines Mitarbeiters in einer Planungsperiode wiedergibt (REFA 2011, S. 100). Dieser Ansatz findet sich bereits in einer Veröffentlichung von Miles (1942, zitiert nach Scholz 1964, S. 26), später dann von Baines et al. (2004, S. 519). Während sich der zuerst genannte Autor vorrangig auf sensomotorische Routinetätigkeiten konzentrierte, betrachtete die zweite Autorengruppe ein Arbeitssystem in einer englischen Automobil-Endmontage. Die Ansätze beider Untersuchungen lassen sich in Zeitgrade umrechnen (Abb. 20.3).

Während diese beiden Untersuchungen den Zeitgrad in Abhängigkeit vom Lebensalter der Mitarbeiter global für das gesamte Arbeitssystem annehmen, schlägt Becker (2014, S. 77 ff. und S. 115 ff.) vor, den Zeitgrad in Abhängigkeit von den zu verrichtenden Tätigkeiten zu modellieren, also auf der Ebene von Arbeitsvorgängen (REFA 2011, S. 40). Damit wirken sich ggf. nur diejenigen Arbeitsvorgänge auf eine Minderung der Leistungsfähigkeit aus, die entsprechende körperliche Erschwernisse aufweisen. Zülch et al. (2009b), Zülch und Becker (2010) sowie Zülch et al. (2013, S. 75 ff.) haben mit diesem Ansatz mehrere Komponentenmontagen in der Automobilindustrie untersucht.

Waldherr und Schmidt (2009, S. 117) kommen im Fall eines durch physiologische Anforderungen geprägten Montagesystems zu dem Ergebnis, dass durch den Alternseinfluss jährlich mit einer Leistungsminderung von ca. 1 % gerechnet werden muss. Dennoch wollen betriebliche Vorgesetzte oftmals die bestehende Belegschaft aufgrund deren Erfahrung über einen möglichst langen Zeitraum erhalten.



**Abb. 20.3** Angenommene Entwicklung des Zeitgrades in Abhängigkeit vom Lebensalter

### **20.3.4 Personalorientierte Simulation leistungsgewandelter Mitarbeiter**

Während der Einsatz begrenzt einsatzfähiger Mitarbeiter in einer personalorientierten Simulation durch eine einfache Vermeidung der Zuordnung zu den betreffenden Arbeitsplätzen berücksichtigt werden kann, lässt sich der Einsatz leistungsgewandelter Mitarbeiter durch einen verringerten Zeitgrad modellieren. Durch Simulation kann dann herausgefunden werden, ob die verbleibende Personalkapazität für die betroffenen Arbeitsvorgänge und Montagestationen ausreichend ist, um die gewünschten Stückzahlen pro Zeitabschnitt zu erreichen, oder ob eine Neuordnung oder auch eine Erhöhung des Personalbestandes notwendig ist.

Zülch und Zülch (2015) haben wiederum in einem U-förmigen Montagesystem aufgezeigt, dass ein produktionslogistisch wünschenswerter, materialflussbegleitender Personaleinsatz aufgrund der vorhandenen Qualifikationen der Mitarbeiter nicht realisierbar sein kann und daher eine Begrenzung des Einsatzbereiches dieser Mitarbeiter auf einige Stationen erfolgen muss. In ihrer Fallstudie betrachten sie zusätzlich den Einsatz zweier leistungsgewandelter Personen an zwei benachbarten Stationen und an einer Station mit zwei parallelen Arbeitsplätzen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die gewünschte Stückzahl selbst durch eine Erhöhung des Personalbestandes nicht erreicht werden kann. Als Kriterium verwenden die Autoren dabei den Arbeitsenergieumsatz nach Spitzer et al. (1982, S. 143) sowie die notwendige Anzahl Schritte pro Mitarbeiter. Deren prozentuale Abweichungen vom mittleren Wert können darüber hinaus als eine Ungleichverteilung der Arbeitsaufgaben interpretiert werden. Trotz Erhöhung des Personalbestandes um eine Person weicht der mit Hilfe der Simulation ermittelte Ausstoß pro Schicht um mehr als 25 % von der statischen Berechnung mittels Tabellenkalkulation nach unten ab.

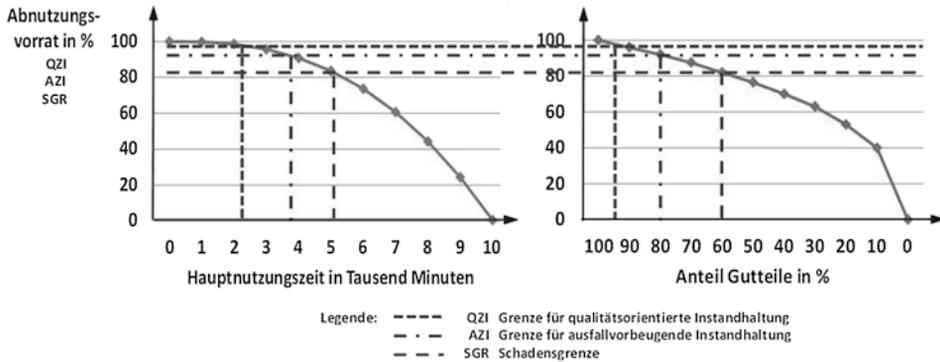
---

## **20.4 Möglichkeiten der Simulation in indirekten Bereichen der Produktion**

### **20.4.1 Simulation der Instandhaltungs- und Qualitätssicherungsorganisation**

Neben den direkten Bereichen der Teilefertigung und Montage weisen auch die indirekten Bereiche in der Automobilindustrie einen, wenn auch nicht gleichermaßen, hohen Personalbedarf auf. Hierzu zählen vor allem die Instandhaltung, die Qualitätssicherung sowie die innerbetriebliche Logistik. Diesbezügliche Ansätze lassen sich ohne Weiteres auf die Automobilindustrie übertragen.

Vollstedt (2003) verbindet in seiner Arbeit die Qualität der in einer Teilefertigung hergestellten Erzeugnisse mit der dortigen Instandhaltungsorganisation. Dazu definiert er arbeitsvorgangsbezogen den Abnutzungsvorrat einer Maschine in Abhängigkeit von deren



**Abb. 20.4** Schematischer Zusammenhang zwischen dem Abnutzungsvorrat einer Maschine und Qualität des Erzeugnisses (nach Vollstedt 2003, S. 82 ff. und S. 99 ff.)

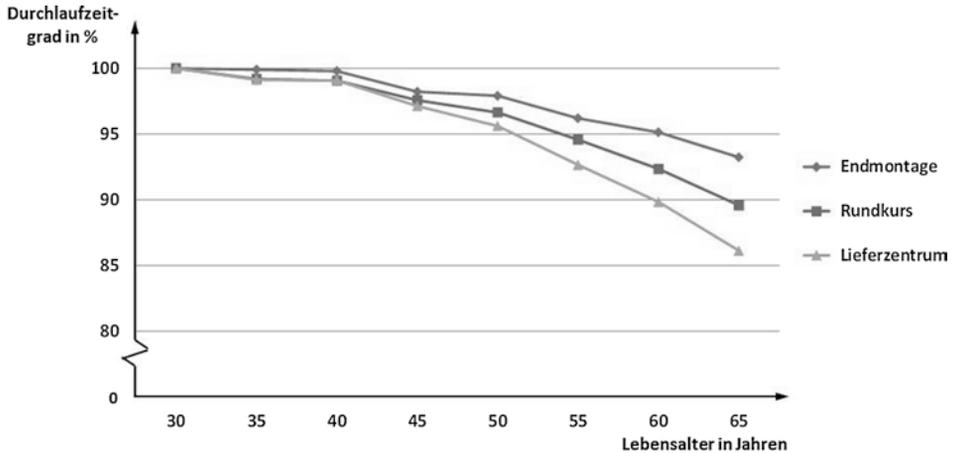
Hauptnutzungszeit  $t_{h,v}$  und in der Folge davon den Anteil produzierter Gutteile. Beide Funktionszusammenhänge weisen einen abnehmenden Verlauf auf, wobei der Autor neben einer Schadensgrenze auch zeitliche Grenzwerte für eine qualitätsorientierte und danach noch eine vorbeugende Instandhaltung vorsieht (Abb. 20.4).

Zusätzlich betrachtet der Autor die Aufbauorganisation im Arbeitssystem, wobei er im Falle der Störung einer Maschine in eine maschinennahe Instandhaltung durch die Maschinenbediener sowie in eine dezentrale und eine zentrale Instandhaltungsabteilung unterscheidet. Hierzu definiert er die potenzielle zeitliche Verfügbarkeit der Instandhalter, die sich vor allem in der Zeitdauer von deren Anforderung zur Störungsbeseitigung bis zum Eintreffen am Störungsort unterscheiden. Hieraus leitet der Autor dann für den Einzelfall die günstigste Instandhaltungsorganisation ab. Über das behandelte Pilotbeispiel hinaus sind jedoch bisher keine weiteren Anwendungen dieses Ansatzes bekannt geworden.

#### 20.4.2 Personalorientierte Simulation im innerbetrieblichen Logistikbereich

Bereits an anderer Stelle (Zülch 2010) wurde über eine Studie im innerbetrieblichen Logistikbereich eines Geräteherstellers berichtet. Der Schwerpunkt dieser Untersuchung lag auf dem Produktivitätseffekt einer alternden Belegschaft in diesem Bereich. Hierbei wurde ein Arbeitsschweregrad für die einzelnen Arbeitsvorgänge definiert und in Anlehnung an Landau et al. (2007) als Alternseffekt eine Abnahme der Leistungsfähigkeit des Muskel-Skelett-Systems von 4 % über 20 Jahre angenommen.

In organisatorischer Hinsicht gab es verschiedene Möglichkeiten für die Arbeitsorganisation in diesem innerbetrieblichen Logistikbereich. Neben einer Materialversorgung durch die Mitarbeiter der Endmontage selbst standen in der Fallstudie die Organisation durch Rundkursfahrer und die Anlieferung über ein Lieferzentrum zur Diskussion. Als



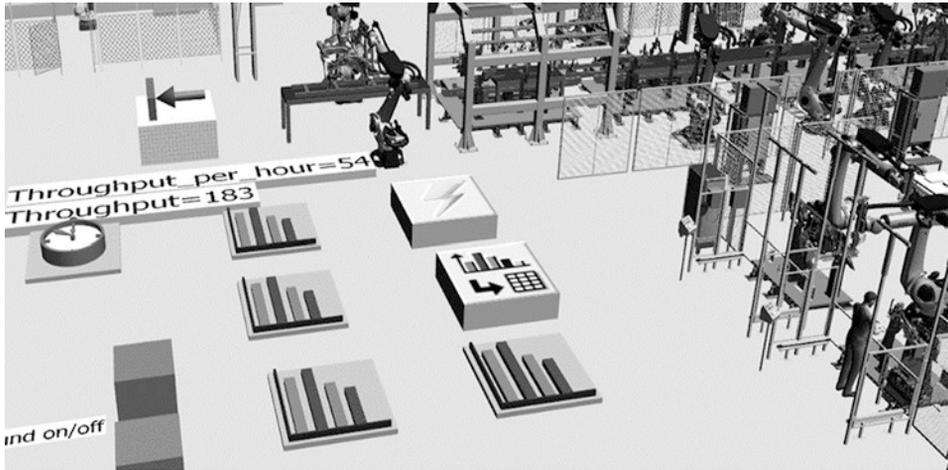
**Abb. 20.5** Altersbedingte Veränderung der Durchlaufzeiten in Abhängigkeit von der Arbeitsorganisation in einer innerbetrieblichen Logistikabteilung (nach Zülch 2010, S. 406)

Folge der unterschiedlichen Arbeitsschwere und Häufigkeit der durchzuführenden Tätigkeiten ergaben sich auch hier unterschiedliche Arbeitsenergieumsätze nach Spitzer et al. (1982). Dabei zeigte sich im Mittel über die jeweils durchzuführenden Arbeitsvorgänge, dass ein Lieferzentrum in Bezug auf die Durchlaufzeiten der Aufträge die schlechteste Lösung darstellt, gefolgt von einer Rundkursorganisation.

Abb. 20.5 zeigt dies anhand des über dem Lebensalter abnehmenden Durchlaufzeitgrades in Abhängigkeit von der Arbeitsorganisation. Der Durchlaufzeitgrad wurde hier (analog zur Abb. 20.3) definiert als das Verhältnis der Durchlaufzeit im Alter von 30 Jahren zu der in einem bestimmten Lebensalter bis zu 65 Jahren. Bezüglich des Lieferzentrums zeigte sich für einen 65-Jährigen eine 14 %ige Verringerung des Durchlaufzeitgrades im Vergleich zu einem 30-Jährigen, während diejenige bei einer Erledigung der Arbeitsvorgänge durch die Mitarbeiter der Endmontage nur 7 % betrug.

## 20.5 Ausblick auf weitere Aspekte der Personaleinsatzsimulation

In methodischer Hinsicht kann die Simulation bereits heute eine maßgebliche Hilfestellung bei Fragen des Personaleinsatzes in der Automobilindustrie leisten. Dies trifft vor allem auf die im Forschungsbereich entwickelten Verfahren zu, aber auch kommerzielle Verfahren haben die dortigen Ansätze zum Teil aufgegriffen und erweitern diese in Abhängigkeit von den Kundenwünschen. Ihre ursprüngliche Fragestellung im Hinblick auf die produktionslogistische Leistungsfähigkeit von Arbeitssystemen wird zunehmend durch ergonomische Modelle ergänzt, wobei je nach Modellierungsansatz der Verfahren diesbezüglich ggf. Vereinfachungen getroffen und Einschränkungen berücksichtigt werden müssen.



**Abb. 20.6** Verbindung von ereignisdiskreter Ablaufsimulation und Menschmodellierung in der Digitalen Fabrik (Quelle: Siemens PLM Software, persönliche Mitteilung, 2014)

Eine Tendenz besteht in der Verbindung der ereignisdiskreten Simulation mit Methoden der ergonomischen Menschmodellierung in Werkzeugen der Digitalen Fabrik (Abb. 20.6). Eine solche Koppelung ist sinnvoll, um Datenredundanzen und damit Modellierungsfehler zu vermeiden. Allerdings ist der Planungshorizont bzw. der Betrachtungsbereich beider Verfahrensklassen unterschiedlich: Während die Simulation größere Zeiträume bis in den Bereich von Monaten analysiert, betrachtet die Menschmodellierung nur einen kleinen Ausschnitt davon im Minuten- oder gar Sekundenbereich (VDI 2015, S. 2; siehe beispielsweise Fritzsche 2010, S. VII). Damit bleibt für den Benutzer die Aufgabe bestehen, innerhalb eines längeren Simulationszeitraums diejenige Zeitspanne zu finden, die unter ergonomischen Gesichtspunkten relevant ist.

Auch in Zukunft wird die Frage des Einflusses einer alternden Belegschaft auf die Arbeitsproduktivität von hoher Relevanz für die Automobilindustrie sein. In arbeitsorganisatorischer Hinsicht stellt sich hier die Problematik einer Entkopplung von Vor- und Endmontagebereichen sowie einer Zurückführung von bereits ausgelagerten Betriebsbereichen, wenn der Personalbestand auch bis zur Ruhestandsgrenze beibehalten werden soll. Fragen betreffen auch die altersadäquate Arbeitszeitgestaltung sowie die Flexibilisierung von Arbeitszeiten im Hinblick auf eine verbesserte Work-Life-Balance der Mitarbeiter. Weiterhin stellen sich Fragen bezüglich des Einflusses psychischer Belastungen auf die Produktivität eines Arbeitssystems sowie Fragen nach der salutogenetischen Wirkung von alters- und geschlechtsheterogener Gruppenarbeit. Zur Beantwortung der zuletzt genannten Fragen fehlt es allerdings noch weitestgehend an quantitativen Modellen.

Somit zeigt sich für die Simulation des Personaleinsatzes auch im Automobilbereich eine Reihe von neuen Aufgabenfeldern. Die vorhandenen Simulationsverfahren leisten zwar bereits heute einen wesentlichen Beitrag, bedürfen aber vor dem hier aufgezeigten Hintergrund einer stetigen Weiterentwicklung.

## Literatur

- Baines T, Mason S, Siebers P-O, Ladbrook J (2004) Humans: the missing link in manufacturing simulation? *Simul Modelling PractTheory* 12:515–526
- Becker M (2014) Leistungspotenzial eines Fertigungssystems unter dem Aspekt langfristig bestehender Belegschaftsstrukturen. ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Bd 42, Shaker, Aachen
- Clausing M, Heinrich S (2008) Vergleich der Werkzeuge MTM und Ablaufsimulation zur Darstellung von Werkerabläufen. In: Rabe M (Hrsg) *Advances in simulation for production and logistics application*. Fraunhofer IRB, Stuttgart, S 31–39
- Eversheim W, Abels I (2003) Simulationsgestützte Personaleinsatzplanung in der Pkw-Endmontage. In: Bayer J, Collisi T, Wenzel S (Hrsg) *Simulation in der Automobilproduktion*. Springer, Berlin, S 61–70
- Fritzsche L (2010) Work group diversity and digital ergonomic assessment as new approaches for compensating the aging workforce in automotive production. Dissertation, TU Dresden
- Fritzsche L (2012) Faktor Mensch in der Automobilproduktion. imk automotive, Chemnitz. [http://www.imk-automotive.de/publikationen-ergonomie.html2013~Fritzsche&Trepte\\_Digital.Humans.Application.pdf](http://www.imk-automotive.de/publikationen-ergonomie.html2013~Fritzsche&Trepte_Digital.Humans.Application.pdf). Zugegriffen am 08.01.2015
- Huber L, Wenzel S (2011) Trends und Handlungsbedarfe der Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. *Ind Manag* 27:27–30
- Landau K, Weißert-Horn M, Rademacher H, Brauchler R, Bruder R, Sinn-Behrendt A (2007) Altersmanagement als betriebliche Herausforderung, 2. Aufl. *Ergonomia*, Stuttgart
- Miles WR (1942) Performance in relation to age. *Pub Health* 67:34–42
- Müller R (2002) Planung hybrider Montagesysteme auf Basis mehrschichtiger Vorranggraphen. ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Bd 27. Shaker, Aachen
- Petri H (2003) Trends in automobile production. *AutoTechnol* 3:64–67
- REFA-Bundesverband (Hrsg) (2011) REFA-Lexikon. 2. Aufl, Hanser, München
- Scholz H (1964) Wechselbeziehungen zwischen Alter und Leistung. *Arbeits- und berufskundliche Reihe* 1. Bund, Köln, S 9–34
- Siemens PLM Software (Hrsg) (2010) Wie transformieren wir den Innovationsprozess für die Automobilindustrie? Siemens Industry Software, Köln
- Spitzer H, Hettinger T, Kaminsky G (1982) *Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit.*, 6. Aufl. Beuth, Berlin/Köln
- VDI (2001) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 6: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Abbildung des Personals in Simulationsmodellen. Beuth, Berlin
- VDI (2015) VDI-Richtlinie 4499 Blatt 4: Digitale Fabrik – Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik. Beuth, Berlin
- Vollstedt T (2003) Simulationsunterstützte Personalstrukturplanung auf Basis eines abnutzungsorientierten Instandhaltungskonzeptes. ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Bd 32. Shaker, Aachen
- Waldherr M, Schmidt D (2009) Altersdifferenzierte Neuplanung von Montagesystemen. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) *Auswirkungen der demographischen Entwicklung in Montagesystemen*. Universität, Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation, Karlsruhe, S 103–119
- Zülch G (2010) Makroergonomische Probleme im Lager- und Transportbereich. In: Griefahn B, Golka, K, Hengstler JG, Bolt M (Hrsg) *Dokumentation 50. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin, Thema: Transport und Verkehr. Geschäftsstelle der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin*, Aachen, S 400–408. [http://www.dgaum.de/fileadmin/PDF/Tagungsbaende/DGAUM\\_Tagungsband\\_2010.pdf](http://www.dgaum.de/fileadmin/PDF/Tagungsbaende/DGAUM_Tagungsband_2010.pdf). Zugegriffen am 08.01.2015

- Zülch G (2015) Vier Jahrzehnte personalorientierte Simulation – Rückblick und Ausblick. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg) Verantwortung für die Arbeit der Zukunft. GfA Press, Dortmund, USB: B.2.12.pdf
- Zülch G, Becker M (2010) Impact of ageing workforces on long-term efficiency of manufacturing systems – abstract. *J Simul* 4:260–267
- Zülch G, Schmidt D (2011) Simulation von routinemäßigen Tätigkeiten mit vorwiegend mentalen Anforderungen. In: Spath D (Hrsg) Wissensarbeit – Zwischen strengen Prozessen und kreativem Spielraum. GITO, Berlin, S 303–324
- Zülch G, Zülch M (2014) Planning hybrid U-shaped assembly systems using heuristics and simulation. In: Tolk A, Diallo SY, Ryzhov IO, Yilmaz L, Buckley S, Miller JA (Hrsg) Proceedings of the 2014 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 2180–2191
- Zülch M, Zülch G (2015) Produktionslogistische und ergonomische Bewertung U-förmiger Montagesysteme. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg) Verantwortung für die Arbeit der Zukunft. GfA Press, Dortmund, USB: B.2.11.pdf
- Zülch G, Müller R, Vollstedt T (2002a) Planung der Leistungsabstimmung für Pkw-Getriebe mit Hilfe der Simulation. In: Bayer J, Collisi T, Wenzel S (Hrsg) Simulation in der Automobilproduktion. Springer, Berlin, S 37–46
- Zülch G, Rottinger S, Vollstedt T (2002b) New requirements for planning and controlling of personnel assignment in manufacturing. Twelfth international working seminar on production economics, Igls/Innsbruck, 19.-22. Februar 2002. Pre-prints, 1:433–450
- Zülch G, Steininger P, Gamber T, Leupold M (2009a) Generating, benchmarking and simulating production schedules – from formalisation to real problems. In: Rossetti MD, Hill RR, Johansson B, Dunkin A, Ingalls RG (Hrsg) Proceedings of the 2009 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, S 2238–2249
- Zülch G, Becker M, Linsenmaier W (2009b) Modelling and simulation of human performance changes in assembly systems due to aging. In: International Ergonomics Association (Hrsg) 17th World Congress on Ergonomics IEA 2009, Xiaotangshan, Changping District, Peking. CD-ROM: (2AG0001) Modelling and simulation of human performance changes~1.pdf; (2HS0003)\_ Simulating the productivity effects of an ageing workf~1.pdf
- Zülch G, Waldherr M, Becker M (2013) Effects of an ageing workforce on the performance of assembly systems. In: Schlick C, Frieling E, Wegge J (Hrsg) Age-differentiated work systems. Springer Netherland, Dordrecht, S 65–87



**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gert Zülch** Jahrgang 1946. Nach dem Studium des Maschinenbaus an der TU Braunschweig und wirtschaftswissenschaftlichem Aufbaustudium an der RWTH Aachen Leiter der Abteilung Arbeitsstrukturierung im Zentralbereich Forschung und Technik der Siemens AG in München. Von 1985 bis 2012 Lehrstuhlinhaber und Leiter des Institutes für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, nunmehr Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Von 1984 bis 2018 wissenschaftlicher Leiter der gefora – Beratungs-Gesellschaft für Organisation und Arbeitswirtschaft mbH, Weingarten (Baden).



---

# Der Energiebedarf der Automobilproduktion im Fokus der Simulation

# 21

Dieter Geckler, Holger Fliege, Joachim Nagel, Uwe Bracht,  
Marco Seewaldt und Daniel Wolff

---

## 21.1 Einleitung

Kurz nach der Jahrtausendwende begann die Industrie das Thema Energieeffizienz neu zu fokussieren. Die Anstöße dazu kamen aus mehreren Richtungen. Zum einen machen es die steigenden Energiepreise wirtschaftlich interessant, weniger Energie bei den Herstellungsprozessen einzusetzen. Zum anderen verstärkt die Regierung mit der Energiewende und aufgrund der Erderwärmung in internationaler Abstimmung die Anreize, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu verringern, der mit dem Energieverbrauch eng verknüpft ist. Des Weiteren achten viele Kunden darauf, dass ihre hochwertigen Produkte ein ökologisches Prestige haben.

Dieser Interessenwandel führte in den letzten Jahren national und international sowohl zu geförderten Forschungsprojekten als auch zu Eigeninitiativen der Automobilhersteller und Zulieferer zur Steigerung ihrer Energieeffizienz. Seither arbeiten auch die Hersteller für Betriebsmittel, Anlagen oder Steuerungen intensiv an einer Steigerung der Effizienz ihrer Produkte. Diese Anstrengungen führten bislang zu einer Vielzahl von neuen Ideen,

---

D. Geckler (✉) · H. Fliege  
Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg, Deutschland  
E-Mail: [dieter.geckler@t-online.de](mailto:dieter.geckler@t-online.de)

J. Nagel  
Braunschweig, Deutschland

U. Bracht · M. Seewaldt  
TU Clausthal, IMAB, Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

D. Wolff  
inpro GmbH, Berlin, Deutschland

Grundlagenforschung und Know-how, auf welche Weise eine Produktion unter Berücksichtigung aller weiteren betriebswirtschaftlichen und technischen Faktoren möglichst effizient mit seinem Energieeinsatz umgehen kann. Ein Ende dieser Entwicklung zeichnet sich bis heute noch nicht ab. Die bisher verfolgten Ansätze umfassen die gesamte Bandbreite aller produktionsrelevanten Aspekte, von der Gestaltung der Herstellprozesse über die Steuerung und Auslegung der eingesetzten Maschinen und Anlagen bis hin zur Optimierung der Gebäude und deren Infrastruktur. Einen Überblick über diese neuen Erkenntnisse bieten eine Reihe von branchenübergreifenden Kongressen sowie erste allgemeine Darstellungen des Themas (z. B. Müller et al. 2009; Blesl und Kessler 2013).

Mit zunehmender Erforschung der Möglichkeiten der energieeffizienten Produktion wurde erkannt, dass die auftretende Komplexität zum Teil nur durch Simulationen beherrscht werden kann. Dieser Artikel zeigt den aktuellen Stand der Forschung. Er beginnt mit einer Potenzialbetrachtung, bei der die wesentlichen Energieverbraucher bei der Automobilfertigung vorgestellt werden. Anschließend werden die Handlungsfelder in drei Ebenen dargestellt. Die unterste Ebene betrachtet die Simulation einzelner Prozesse oder Ressourcen. In einer Zwischenebene erfolgt die Simulation übergreifender Prozesse, wie z. B. der Energieverbrauch während der Fertigung einer Produktpalette oder die Heizungs- und Lüftungssituation einer gesamten Produktionshalle. In der obersten Ebene erfolgt die Prognose des Verbrauchs eines gesamten Werkes oder eines Produktes. Das Ziel dieser Gesamtsimulation ist es, verschiedene Fertigungsvarianten, Layout-Konzepte oder Planungsalternativen bezüglich ihres Energieverbrauchs einander gegenüberzustellen.

---

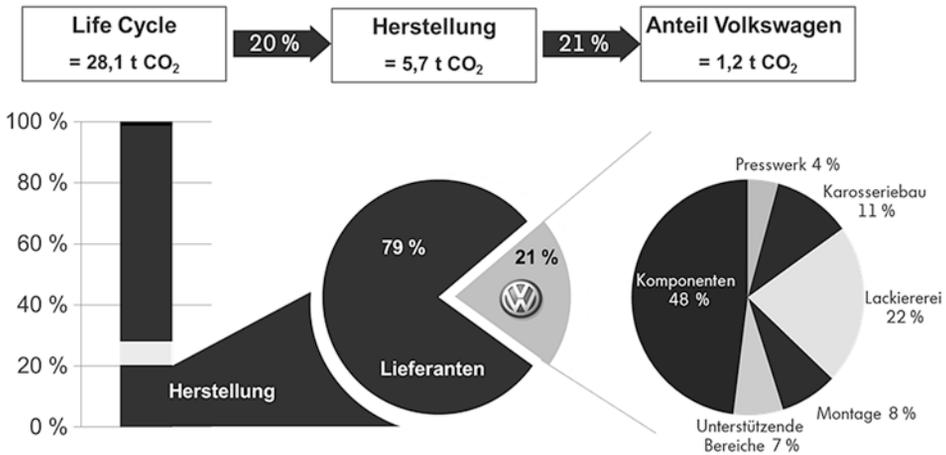
## 21.2 Der Energieverbrauch in der Automobilproduktion

Betrachtet man den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines Golf VII (1,6 TDI, Fahrleistung 200.000 km), der annähernd äquivalent zum Energieverbrauch ist, zeigt Abb. 21.1 mehrere interessante Zusammenhänge.

Der Anteil der Produktion und Logistik beträgt bei der Herstellung des Automobils ca. 20 % und zur Bereitstellung des Treibstoffes ca. 8 %. Die Restlichen 71 % fallen auf die Fahremissionen, also den Verbrauch des Wagens im Betrieb, sowie ca. 1 % auf das Recycling.

Der Verbrauch zur Herstellung wird zum größten Teil von den Lieferanten erbracht (79 %). Darunter fallen energieaufwendige Prozesse wie die Herstellung von Stahl, Gussrohlingen, Aluminium, Kunststoffen, Farben, Reifen oder Fensterscheiben, die allesamt eine hohe Prozesswärme benötigen. Die Erzeugung dieser Wärme zur Fertigung der Rohmaterialien macht einen Großteil der gesamten Herstellenergie aus. Aber auch die Anfertigung kleinerer Bauteile wie Scheinwerferbirnen oder der Elektronik der Steuergeräte erfolgt nicht ohne einen erheblichen Energieaufwand.

Die restlichen 21 % der Herstellenergie verursacht die Volkswagen AG bei der Golf-Produktion im eigenen Hause. Davon entfällt fast die Hälfte (48 %) auf die Komponentenfertigung, in welcher wieder Prozesse wie das Gießen oder Härten hohe Prozesswärme



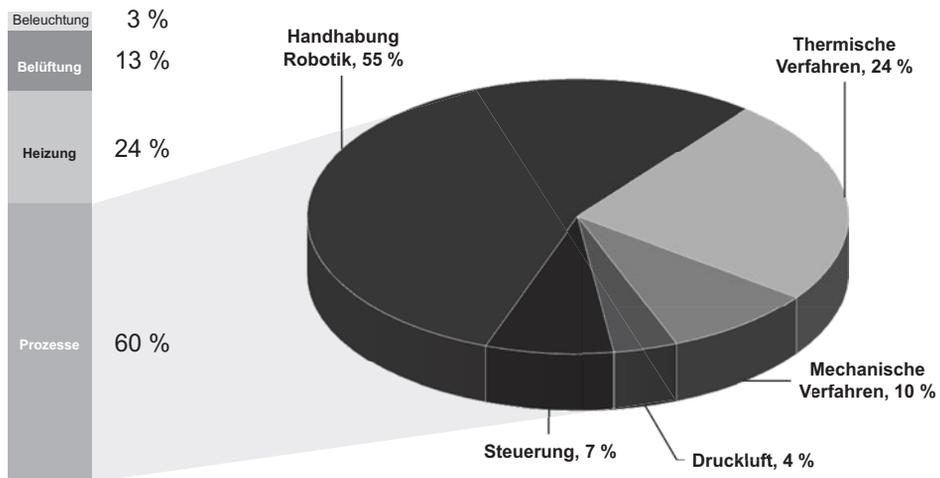
**Abb. 21.1** Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines Volkswagen Golf VII

erfordern. Bei der Fahrzeuganfertigung ist es dann die Lackiererei, die durch die Wärme der Trockner und den hohen Aufwand bei der Lüftung beim Auftrag des Decklacks den größten Energieverbrauch hat. Im Presswerk (4 %) arbeiten zwar die großen Pressen, welche aber nur mechanische Energie aufbringen müssen und daher nur einen geringen Beitrag zum Energieverbrauch haben. Lediglich im Bereich der Warmumformung ist wieder mehr Prozessenergie erforderlich. Die Montage (8 %) verbraucht Energie im Wesentlichen für die Heizung und Lüftung der Hallen. Der Energieverbrauch der Förderbänder, Schrauber oder anderer Fertigungseinrichtungen kann dagegen nahezu vernachlässigt werden. Die unterstützenden Prozesse Verwaltung oder Forschung und Entwicklung benötigen wiederum Energie, um die Gebäude mit Heizung, Lüftung, Licht und Strom zu versorgen. Etwas Prozessenergie verwendet die Entwicklung für den Bau von Prototypen und den Betrieb von Versuchsanlagen.

Mit dem Anteil von 11 % liegt der Karosseriebau im Mittelfeld der Energieverbraucher. Anhand von Abb. 21.2 soll dieses Gewerk weiter aufgelöst werden.

Zum Betrieb der Gebäudetechnik mit Heizung, Lüftung und Beleuchtung wird im Karosseriebau etwa 40 % der Energie eingesetzt. Der Rest teilt sich auf die Prozesse auf. Dabei geht der größte Anteil an die Handhabung (55 %). Das sind im Wesentlichen die Bewegungen der Roboter. Ein Teil entfällt auch auf die Fördertechnik und Mechanik der Spanner und Greifer. Die eigentlichen Fertigungsverfahren mit den thermischen Verfahren aus Punkt- und Bahnschweißen (24 %) sowie den mechanischen Verfahren wie Falzen, Stanzen, Nieten, Clinchen (10 %) benötigen nur gut ein Drittel der Energie. Die Druckluft hat in dem dargestellten Werk nur einen geringen Anteil von 4 %, da die Schweißzangen dort elektrisch angetrieben sind. Auf die Steuerungen und Schaltschränke mit ihren Bildschirmen und Lüftungen entfallen immerhin 7 %.

Eine Analyse des Verbrauchs der Automobilherstellung nach den energieverbrauchenden Einzelkomponenten zeigt, dass ein Großteil der Energie in Öfen genutzt wird. Als



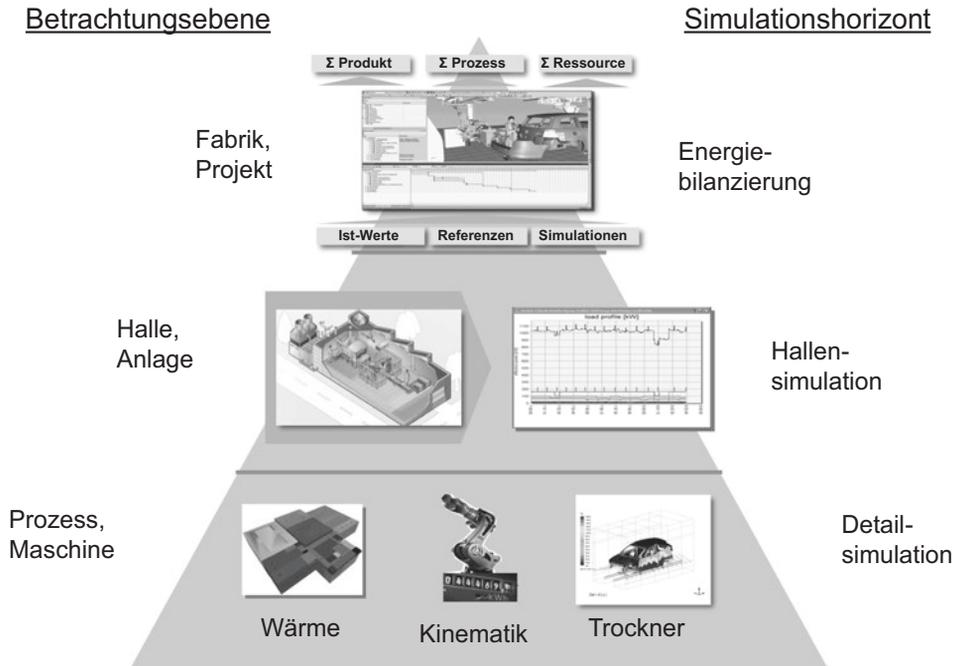
**Abb. 21.2** Energieanteile des Karosseriebaus im Werk Neckarsulm

Brennstoffe dienen Gas, Öl oder elektrische Wärmeerzeugung; das Ziel ist die Erzeugung von Prozessenergie oder auch Heizwärme. Ein zweiter großer Anteil fällt auf die elektrischen Antriebe. Häufig treiben diese Ventilatoren oder Pumpen an, so dass auch diese zu wichtigen Einzelkomponenten werden. Eine effiziente Konstruktion und Gestaltung dieser Komponenten gehören daher zu einem wichtigen Einflussfaktor auf dem Weg zu einer energieeffizienten Produktion. Auch diese Konstruktion kann durch Simulation unterstützt werden, sei es bei der Auslegung von Brennerdüsen für die Hochtemperaturerzeugung, der Optimierung der elektromagnetischen Felder von Motoren oder zur Strömungsanalyse moderner Pumpsysteme. In diesem Feld der Optimierung der Einzelkomponenten kommen viele zum Teil sehr hoch spezialisierte Simulationsprogramme zum Einsatz. Diese werden hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, da sie in Beiträgen zur Simulation bei der Konstruktion behandelt werden und weniger Bestandteil einer produktionsspezifischen Betrachtung sind.

Von den Automobilherstellern kann nur ein Teilbereich des gesamten Produktionsprozesses und der verwendeten Ressourcen direkt durch die Simulation beeinflusst werden. Dieser Bereich lässt sich in drei Ebenen aufteilen (Abb. 21.3). Die Simulation von Einzelkomponenten der Produktionsressourcen befindet sich als weitere Ebene darunter.

Auf der untersten Ebene können die Automobilhersteller Prozesse gestalten und einzelne Ressourcen konfigurieren. Hierbei kann eine Simulation unterstützen, günstige Betriebsparameter zu finden oder den voraussichtlichen Energiebedarf zu prognostizieren. Beispiele sind die Bewegungsbahnen von Robotern oder die Heizkurve eines Trockners in der Lackiererei.

In der zweiten Ebene werden größere Anlagen oder ganze Hallen simuliert. Die Ziele dieser Simulationen sind wieder die Energieprognose, in diesem Fall unter der Berücksichtigung komplexer Fertigungssituationen und Störzeiten. Aber auch die Auswahl und



**Abb. 21.3** Die drei Betrachtungsebenen für Energiesimulationen in der Automobilindustrie

Dimensionierung von Einrichtungen kann durch die Simulation abgesichert werden. Ein weiteres Anwendungsgebiet findet sich bei der Konfiguration von Steuerungen. Ein Beispiel ist die gemeinsame Abstimmung der Fertigungsanlage mit den Heizungs-, Lüftungs- und Beleuchtungseinrichtungen. Weitere Beispiele sind die Analyse alternativer Energieeinspeisungen sowie Rückgewinnungskonzepte durch Simulation.

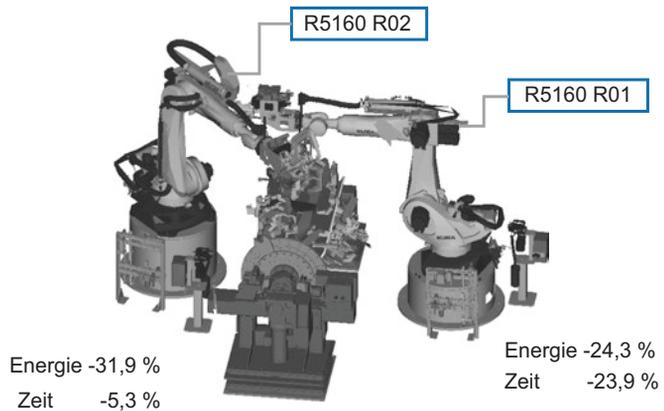
In der obersten Ebene der Pyramide befindet sich die Energiebilanz eines gesamten Werkes oder die Teilbilanz einer Produktlinie, die sich über mehrere Gebäudebereiche eines Werkes erstreckt. Hier ist eine statische Simulation sinnvoll, mit welcher alternative Planungsvorschläge bewertet werden können. Die einzelnen Ebenen werden im Folgenden anhand von Beispielen vorgestellt.

## 21.3 Die Simulationen zur Energieeffizienz der Automobilproduktion

### 21.3.1 Die kinetische Simulation von Robotern

Bislang werden bei der Planung von Robotern kinematische Untersuchungen durchgeführt, mit denen die Abfolge und Erreichbarkeit von Robotertätigkeiten abgesichert werden. Werden zusätzlich die physikalischen Kräfte und Trägheitsmomente der Bewegungen

**Abb. 21.4** Durch iterative Optimierung anhand einer kinematischen Simulation optimierte Position und Bewegungskurve von Robotern



betrachtet, so erfolgt eine kinetische Analyse, welche auch die Energieprognose eines aktuell geplanten Bewegungsablaufes ermitteln kann. Dies ermöglicht iterative Verfahren zur energetischen Optimierung der Roboterposition und seiner Bewegungskurven. Gerade in dem Bereich Handhabung und Robotik wird ein Großteil des Energieverbrauchs einer Karosseriefertigung verbraucht (siehe Abb. 21.2).

Ein Ergebnis einer solchen Optimierung stellt Abb. 21.4 dar. Dabei werden die realen Programme zweier zufällig ausgewählter Roboter aus der Karosseriebaufertigung im Werk Wolfsburg in eine Simulationsumgebung eingespielt und mit iterativen Verfahren schrittweise optimiert. Ergebnis der Analyse ist eine Methodik zur Optimierung sowie ein gefundenes Energieeinsparpotenzial in der Größenordnung von 20 % – 30 % bezogen auf den Energieverbrauch. Dabei sind zusätzlich Einsparungen in der Bearbeitungszeit von 5 % – 25 % zu nennen (Brüggemann et al. 2014). Ein ähnlicher Effekt tritt auf, wenn bei der ergonomischen Optimierung manueller Tätigkeiten Potenziale in der Fertigungszeit gefunden werden.

### 21.3.2 Die Simulation einer Druckluftanlage

Bei der Simulation einer Druckluftanlage wird ein ereignisdiskretes Simulationsverfahren eingesetzt. Das Optimierungspotenzial für den Energietreiber Druckluft liegt deutlich unter dem Optimierungspotenzial der Roboterbewegungen (Abb. 21.2). Die gefundenen Einsparmöglichkeiten zeigen aber, dass sich auch für dieses Einsatzgebiet eine detaillierte Analyse rechnet. Möglichkeiten zum Einsatz der Simulation ergeben sich insbesondere bei der Untersuchung folgender Aspekte:

- Möglichst gute Gesamtauslegung des Druckluftsystems
- Ermittlung des Druckluftprofils in Abhängigkeit von einem definierten Produktionsprogramm unter Berücksichtigung der stochastischen Einflüsse innerhalb eines definierten Druckbandes

- Bewertung von Einsparpotenzialen durch angepasste Steuerungsstrategien für die Druckluftherzeugung, z. B.
  - Übergeordnete Steuerungen (Kaskaden- oder Druckbandregelung)
  - Interne Steuerungen (Volllastregelungen oder Teillastregelungen)
  - Bedarfsgerechte Regelungsstrategie für Kompressoren, abhängig vom gefahrenen Produktionsprogramm in einer Fertigungslinie und dem als bekannt vorausgesetzten Druckluftbedarf je Teil und Arbeitsfolge
- Ermittlung des Einsatzpotenzials für drehzahlvariable Antriebe, abhängig vom simulativ ermittelten Druckluftbedarf (Volumenstrom)
- Dimensionierung des Druckluftherzeugungssystems unter Auslastungsgesichtspunkten

Diese Simulation kann zwar noch der unteren Ebene in der Simulationspyramide zugeordnet werden, da ihr Untersuchungsgegenstand eine einzelne Anlage ist. Da sie jedoch Ergebnisse aus der Simulation des Produktionsprogramms einbezieht, führt sie schon zur mittleren Ebene.

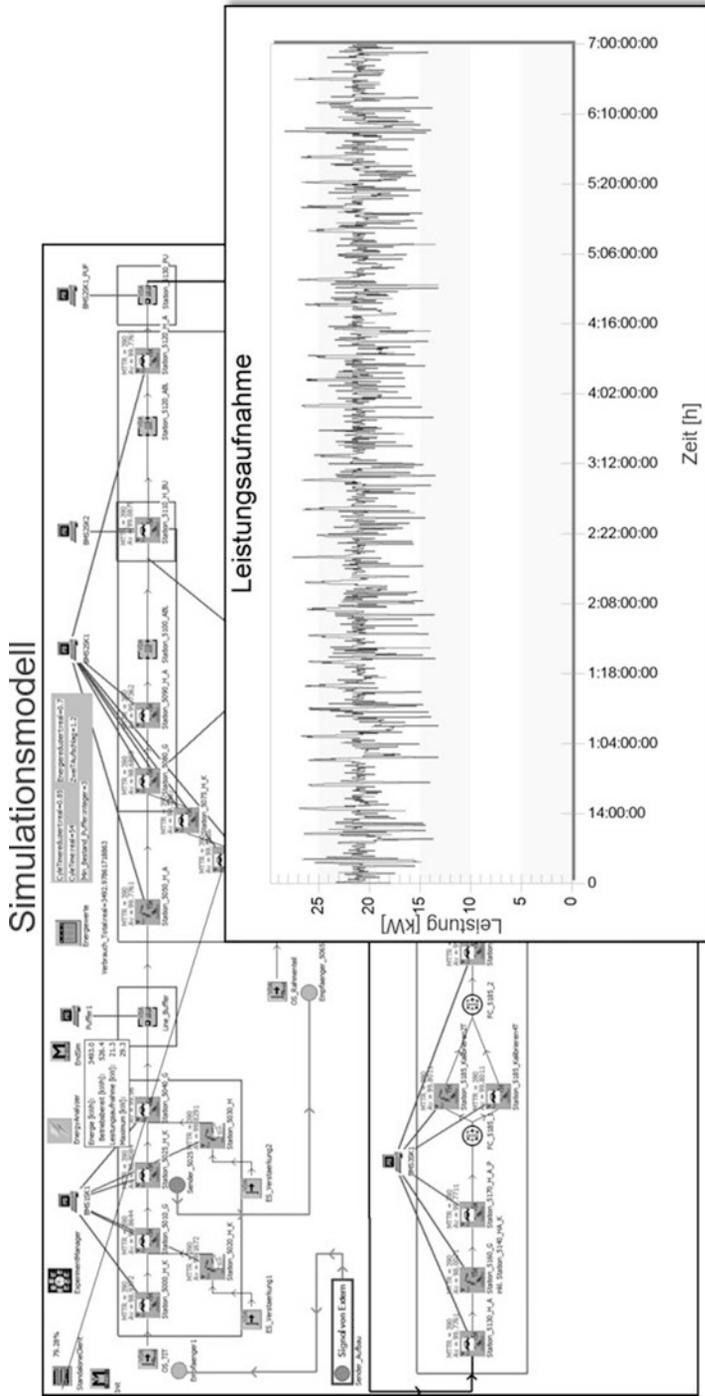
### 21.3.3 Energieprognose mit einer Ablaufsimulation

Im Karosseriebau wird die Ausbringung einer Fertigungsanlage üblicherweise mit einer ereignisdiskreten Simulation abgesichert. Dabei werden die Störzeiten der Anlagen aus Referenzdaten verwendet und als Ergebnisse Puffer, Transportstrecken oder Abkopplungen positioniert und dimensioniert.

In einer internen Untersuchung der Volkswagen AG wird gezeigt, dass ein solches in jedem Projekt vorhandenes Simulationsmodell auch für eine Energieprognose herangezogen werden kann (Abb. 21.5). Mit derartigen Modellen lässt sich unter anderem das Verhalten bei Störfällen verbessern oder eine flexible Reaktion auf ein Stromangebot mit schwankenden Preisen darstellen.

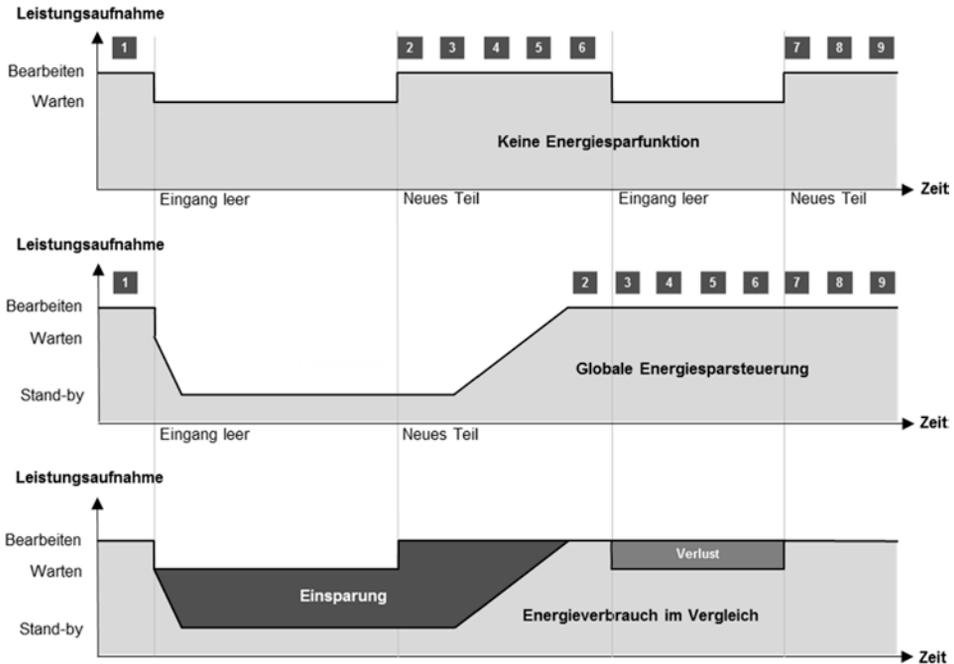
Analoge Untersuchungen bei einer Zylinderkopffertigung (Abb. 21.6) haben ergeben, dass bei gleicher Ausbringung eine gezielte Abschaltung in Produktionslücken ermöglicht werden kann, wenn die Produktion nicht möglichst kontinuierlich erfolgt, sondern die Werkstücke zu Losen zusammengefasst werden (Kulus et al. 2011). Auf der rechten Seite ist in der oberen Darstellung der Ausgangszustand zu sehen, bei der die Werkstücke in zufällig zusammengesetzten Blöcken bearbeitet werden. Eine Abschaltung der Maschine in den Stand-by-Zustand erfolgt nicht. Die mittlere Darstellung zeigt den optimierten Zustand, bei dem die Werkstücke in Losen zu je acht Werkstücken zusammengefasst werden. Nun wird es möglich, in den verbrauchsarmen Stand-by-Zustand abzuschalten. In der unteren Darstellung wird die Einsparung bilanziert und optisch die große Einsparung im Stand-by-Zustand der geringeren Einsparung im Wartezustand gegenübergestellt.

Eine detailliertere Analyse wird möglich, wenn spezifische Modelle für die Energiesimulation von Karosseriebauanlagen aufgebaut werden, die auch das Verhalten der einzelnen Roboter und Anlagenkomponenten berücksichtigen. Schacht und Mantwill (2012)



**Abb. 21.5** Energieprognose auf der Basis einer routinemäßig durchgeführten Simulation der Ausbringung einer Karosseriebauanlage

## Berechnete Einsparpotentiale

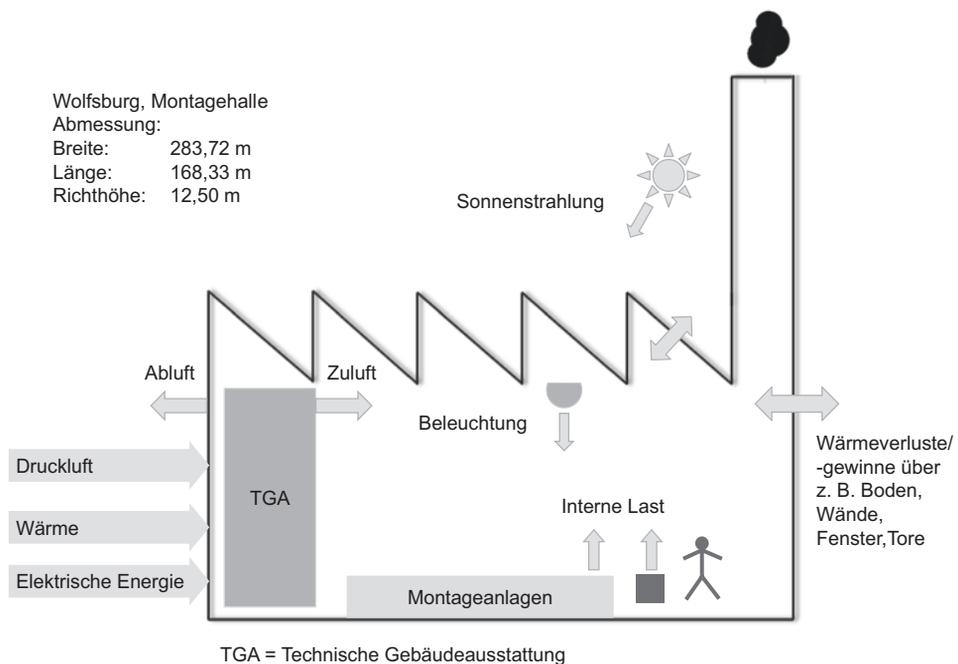


**Abb. 21.6** Simulation einer Zylinderkopffertigung

zeigen, dass durch geeignete stochastische Verfahren eine gute Annäherung an das Realverhalten möglich ist. Putz et al. (2011) nutzen die Methode darüber hinaus zur Absenkung von Leistungsspitzen sowie zu Untersuchungen zur Versorgungsflexibilität.

### 21.3.4 Simulation der Heizung und Lüftungsanlagen

Wie Abb. 21.2 zeigt, wird etwa ein Drittel des Energieverbrauchs eines Karosseriebaus für die Heizung und Lüftung aufgebracht. Nun bietet die moderne Heizungs- und Lüftungstechnik eine Reihe von verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten an. Die Palette der möglichen Komponenten reicht unter anderem von Brenneranlagen mit unterschiedlicher Befuerung über Fußbodenheizungen, Deckenstrahler, Lüftungsanlagen in unterschiedlichen Gestaltungsvarianten, Wärmetauschern, Wärmeräder, Wärmespeicher, Wärmepumpen bis hin zu Fenstern mit unterschiedlichem Reflexionsverhalten. Unter all diesen Möglichkeiten die beste in der richtigen Dimensionierung und mit dem richtigen Steuerungsverhalten zu finden, ist eine sehr komplexe Aufgabe, welche durch eine Simulation wesentlich unterstützt werden kann.



**Abb. 21.7** Einflussfaktoren einer Simulation der Heizung und Lüftungsanlagen einer Fertigungshalle unter Berücksichtigung des lokalen Klimas sowie der Wärmelasten der Produktionsprozesse

Abb. 21.7 zeigt schematisch die zu berücksichtigenden Einflussfaktoren einer solchen Simulation. Das lokale Klima wird anhand von Wetterdaten mit einem stündlichen Verlauf von Temperatur, Wind und Sonneneinstrahlung abgebildet. Extreme Wettersituationen können dabei modelliert werden, indem die Daten eines extrem kalten Winters mit denen eines besonders warmen Sommers gemischt werden. Damit lässt sich das Verhalten der untersuchten Halle in diesen extremen Situationen recht gut darstellen, und Aussagen, ob das Gebäude im Sommer stark überhitzt oder wann in den Winterferien die Aufwärmphase beginnen muss, werden möglich. Die Fragestellungen an ein solches Simulationsmodell sind sehr vielfältig und umfassen die Potenziale eines Erdwärmespeichers ebenso wie den Einfluss einer isolierten oder spiegelnden Fensterfläche.

### 21.3.5 Kombination der Ablaufsimulation mit der Simulation der Heizung und Lüftung

Eine weitere Stufe der realitätsnahen Abbildung wird erreicht, wenn das oben beschriebene Modell der Heizung und Lüftungssituation (siehe Abb. 21.7) mit dem Prozessmodell der Ablaufsimulation (siehe Abb. 21.6) gekoppelt wird. Dabei tauschen die beiden

Simulationsmodelle über eine neutrale Interoperabilitätsplattform auf der Basis gemeinsamer Regeln und einer gemeinsamen Ontologie Ereignisse und Informationen aus und werden in geeigneter Weise zeitlich synchronisiert (Wenzel et al. 2013).

Damit wird vermieden, dass bei der Energieauslegung der Halle und der technischen Gebäudeausstattung widersprüchliche lokale Optima ermittelt werden. Das Ziel dieser gekoppelten Simulation ist es, in einem ganzheitlichen Ansatz den produktiven Betrieb wie auch den erforderlichen Komfort in der Fabrikhalle gemeinsam energieeffizient abzusichern.

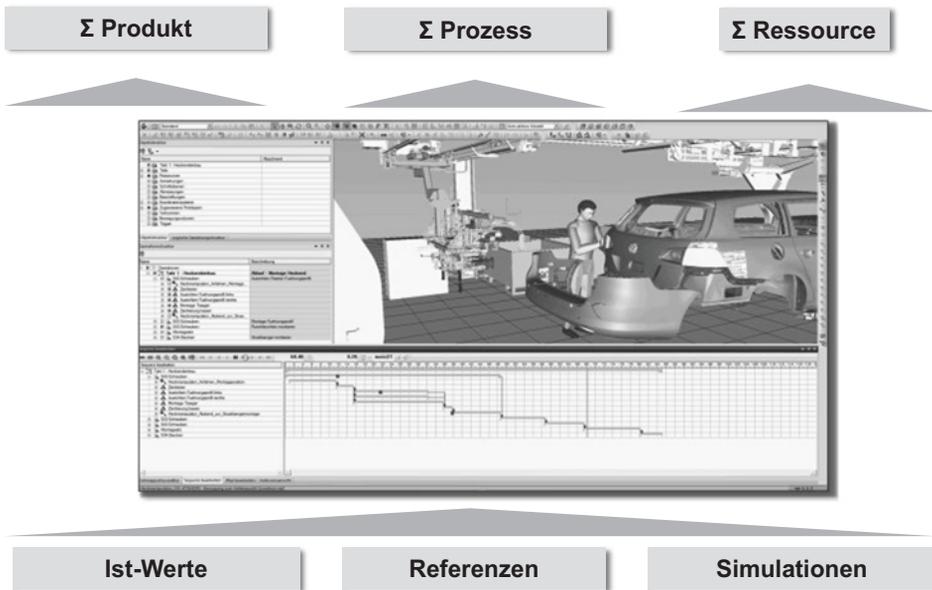
Ein Problem der Kopplung sind die unterschiedlichen zeitlichen Maßstäbe. Während die Ablaufsimulationen sich an der Taktzeit im Minutenbereich orientiert, ist das Verhalten der Raumluft so träge, dass dort eine zeitliche Auflösung im Bereich einer Stunde meist hinreichend ist. Nur in seltenen Fällen wird diese Simulation auf ein Viertelstunden-Raster herabgebrochen. Die dagegen hochfrequenten Ereignisse des Produktionsablaufs wirken sich nur bei größeren Änderungen auf das Verhalten der Heizung- und Lüftungsanlagen aus.

### 21.3.6 Die Energiebilanz eines Produkt- oder Strukturprojektes

Die Kostenoptimierung bei der Automobilherstellung erfolgt in Produkt- oder Strukturprojekten. Wird ein neues Werk erstellt, ein bestehendes umgebaut oder um Gebäude erweitert, so handelt es sich um ein Strukturprojekt. Wenn ein neues Fahrzeug oder eine neuere Produktgeneration in ein bestehendes Werk eingeplant werden, so wird dieses als ein Produktprojekt bezeichnet. Die Automobilwerke sind meist nach den Gewerken aufgebaut, daher gibt es in der Regel unterschiedliche Gebäude für das Presswerk, den Karosseriebau, die Lackiererei oder die Endmontage. Aus diesem Grund sind bei einem Produktprojekt in der Regel mehrere Gebäude betroffen und bei einer Strukturmaßnahme mehrere Produktlinien.

Die Energiesimulation, die in den oben beschriebenen Beispielen auf eine Halle bezogen wird, ist daher meist nicht unmittelbar im Fokus einer Projektleitung. So kann es vorkommen, dass in einer Karosseriebauhalle ein Projekt zur Integration einer neuen Fahrzeuggeneration gerade mit der Konzeptplanung beginnt, während ein anderes Produkt sich in der Hochlaufkurve des Anlaufs befindet. Für die Projektkalkulation wird damit die Frage, welcher Anteil der Energiekosten auf welches Projekt zu verrechnen ist, zu einer komplexen Aufgabe. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, ist eine Bilanzierungsmethode sinnvoll, welche die Energieanteile nach unterschiedlichen Gesichtspunkten aggregieren kann (vgl. Abb. 21.8).

Kern der Methode ist eine Datenbank, in der alle realen und geplanten Fertigungsschritte und Ressourcen einer Werkshalle abgebildet sind. Dabei ist jedem Element zugeordnet, welches Produkt damit gefertigt wird und zu welchem Strukturprojekt es gehört. Besteht keine direkte Relation, werden die Energiewerte über Verteilungsschlüssel auf die verschiedenen Produkt- und Strukturprojekte aufgeteilt.



**Abb. 21.8** Die Energieprognose in einem Bilanzwerkzeug nach unterschiedlichen Gesichtspunkten aufgrund von Basisdaten mit verschiedenem Reifegrad im Planungsprozess

Die Daten bezieht die Methode zum einen aus schon bekannten Ist-Daten, falls vorhanden aus den Ergebnissen von Simulationen oder aus Referenzdaten, die aus ähnlichen Projekten bekannt sind.

Mit der geeigneten Strukturierung einer solchen Datenbank lässt sich ermitteln, welchen Einfluss eine Veränderung des Fertigungsprozesses eines bestimmten Produktes auf den Gesamtenergieverbrauch einer Fertigungshalle und damit auch eines gesamten Werkes hat. Auf der anderen Seite kann mit Hilfe der Daten auch eine Prognose durchgeführt und ermittelt werden, wie sich die Kosten der Produkte ändern, wenn an der Lüftungsanlage der Halle Optimierungen für einen energieeffizienten Betrieb durchgeführt werden.

## 21.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die steigenden Energiepreise, der politische Entschluss zur Energiewende sowie auch die internationalen Bestrebungen zur Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes machen Energie zunehmend zu einem Gestaltungsfaktor der Produktionsplanung. Dies führt zu zunehmenden Anstrengungen in der Automobilindustrie. Beispielsweise kommt von Volkswagen im Rahmen des Programms „Think Blue Factory“ der Anstoß, Energie als neuen Parameter in die Funktionen ihrer Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik aufzunehmen. Ein Schwerpunkt der heutigen Aktivitäten ist die Simulation der Roboterkinetik zur Planung einer energieeffizienten Roboterpositionierung und Gestaltung der Bewegungsabläufe von Robotern. Ein weiteres Handlungsfeld ist die Simulation des Fertigungsablaufs mit

integrierter Energieprognose. Bei dieser Methode werden sowohl der Strom- als auch der Druckluftverbrauch betrachtet. Das Verhalten der Heizung und Lüftung der Werkshallen im Zusammenspiel mit der Produktion ist ein wesentliches Element einer ganzheitlichen Simulationsbetrachtung. Auf allen Gebieten zeigt sich die Eignung der Simulation von Energie als Werkzeug zur Erreichung der ökologischen und ökonomischen Ziele bei der Herstellung von Fahrzeugen.

Damit ist abzusehen, dass die Energiesimulation zu einem elementaren Bestandteil der Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik (Bracht et al. 2018) wird. In dieser Umgebung finden sich schon viele Daten, Funktionen und etablierte Planungsprozesse, welche die Energiesimulation unterstützen.

Dabei nutzt die Energiesimulation die gesamte Palette der Möglichkeiten der Digitalen Fabrik. Sie benötigt die Strukturen der Produkt-, Prozess- und Ressourcenbäume, die 3D-Geometrien der Produktdaten sowie der Fabrik, die Kinematik von bewegten Vorgängen wie auch die Finite-Elemente-Simulation (FEM) von Fertigungsprozessen. Die Energiesimulation stützt sich, je nach Untersuchungsgegenstand, auf die gesamte Bandbreite der zur Verfügung stehenden Simulationsmethoden. Diese erstreckt sich von der kinetischen Simulation über ereignisdiskrete Simulation, FEM-Simulation, einfache Verhaltensmodelle bis zur statischen Analyse von Energieprognosen.

Die Anwendung der Energiesimulation ist aber noch neu. Weitere Grundlagen müssen erforscht werden, um sie vollständig umzusetzen. Ferner sind noch die erforderlichen Stammdaten wie z. B. die Gebäude mit ihren Wärmeübergangskennwerten zu erheben, Programme zu erweitern, neu zu entwickeln und mit Schnittstellen an die bestehenden Werkzeuge der Digitalen Fabrik zu adaptieren. Hinzu kommt die große Aufgabe, die neuen Funktionen in die Planungsprozesse zu integrieren und zum täglichen Planungswerkzeug zu machen. Mit der routinemäßigen Nutzung wird aber die Energiesimulation ihren Beitrag dazu leisten, die Produktion der Automobile und ihrer Komponenten wirtschaftlicher und ökologischer zu gestalten.

---

## Literatur

- Blesl M, Kessler A (2013) Energieeffizienz in der Industrie. Springer, Heidelberg
- Bracht U, Geckler D, Wenzel S (2018) Die Digitale Fabrik, Methoden und Praxisbeispiele, 2. Aufl. Springer, Heidelberg
- Brüggemann H, Geckler D, Laumeyer M (2014) Energieeffizienz bei Industrierobotern. VDI-Z Integr Prod 6:55–57
- Kulus D, Wolff D, Ungerland S, Dreher S (2011) Energieverbrauchssimulation als Werkzeug der Digitalen Fabrik. ZWF 106:585–589
- Müller E, Engelmann J, Löffler T, Strauch J (2009) Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Springer, Heidelberg
- Putz M, Schlegel A, Lorenz S, Franz E, Schulz S (2011) Gekoppelte Simulation von Material- und Energieflüssen in der Automobilfertigung. In: Müller E, Spanner-Ulmer B (Hrsg) Nachhaltigkeit in Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: TBI' 11 – 14. Tage des Betriebs- und Systemingenieurs, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Sonderheft, Bd 17. Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Chemnitz, S 135–144

Schacht M, Mantwill F (2012) Unterstützung des Planungsprozesses im Karosseriebau. ZWF 107:207–211

Wenzel S, Junge M, Pöge C, Spieckermann S (2013) Energieeffizienz in der Automobilindustrie – Ganzheitliche simulationsgestützte Planung und Bewertung. Product Manag 18:21–24



**Dr.-Ing. Dieter Geckler** Studium Maschinenbau an der Universität Hannover. Ab 1986 Projektleiter (CAD, PPS, Logistik) bei der Space GmbH in Hannover. Seit 1991 in der Planung der Volkswagen AG, Wolfsburg. Mitarbeit bei Fabrik- und Fahrzeugprojekten. Koordinator des IT-Arbeitskreises der Planung. Mitwirkung in den Großprojekten TI-Syncro (Stückliste) und Digitale Fabrik. Mitglied im Ausschuss 205 Digitale Fabrik im Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Seit 2010 Teilprojektleiter für das Thema Energieeffizienz in der Digitalen Fabrik.



**Holger Fliege** Studium Maschinenbau im Praxisverbund an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Kooperation mit der Volkswagen AG in Wolfsburg. Im Anschluss wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik an der Ostfalia. Betreuung des Themenbereiches Energieeffizienz in der Produktion. Berufsbegleitender Masterstudiengang Energiesystemtechnik mit dem Schwerpunkt Energie- und Gebäudetechnik. Seit 2013 in der Konzernforschung der Volkswagen AG im Bereich Umwelt Produktion – Zentrales Energiemanagement tätig.



**Joachim Nagel** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Diplomarbeit zum Thema Flussorientierte Energiesparsteuerung von Fertigungsanlagen. Seit 2013 Programmverantwortlicher am Institut für Produktion, Logistik und Komponente, Volkswagen AG, AutoUni, Wolfsburg.



**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht** Studium Maschinenbau an der Universität Hannover. Nach der Promotion am dortigen Institut für Fabrikanlagen und Logistik Wechsel zu Daimler mit leitenden Funktionen in der Technischen Planung. 1996 erfolgte der Ruf auf die Professur für Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik der TU Clausthal. Gründungsmitglied des Arbeitskreises Rechnergestützte Fabrikplanung im Verband der Automobilindustrie (VDA). Mitglied Fachbeirat in der Gesellschaft für Produktion und Logistik des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI-GPL). Gründer und langjähriger Leiter des VDI-Fachausschusses 205 Digitale Fabrik.



**Marco Seewaldt** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der TU Clausthal. Seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, Abteilung für Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik. Mitglied im Fachausschuss 205 Digitale Fabrik des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI).



**Daniel Wolff** Studium Maschinenbau mit den Schwerpunkten Fabrikplanung und Arbeitswissenschaften an der TU Chemnitz. 2003–2004 Materialflusssimulation in Industrieprojekten. Seit 2004 als Projektmitarbeiter bei inpro, Berlin, mit den Schwerpunkten Digitale Fabrik, Informations- und Wissensmanagement, Energieeffizienz. Seit 2009 Guest Lecturer im Fach Logistikmanagement an der SRH Hochschule Berlin. 2011–2014 Koordination des Clusters Energieoptimierende Planung bei inpro. Mitglied im Fachausschuss 146 Energiemanagement mit MES im Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Seit 2014 Leitung des Bereichs Produktionssysteme & Informationsprozesse bei inpro.



# Bereitstellung und Verwaltung von Simulationseingangsdaten

# 22

Marielouise Mieschner und Gottfried Mayer

## 22.1 Einleitung

Daten bilden die Grundlage für jede Art der Simulation und somit auch für die Ablaufsimulation. Ist die Qualität der bereitgestellten Daten unzureichend, so kann kein gutes und aussagekräftiges Ergebnis von der Simulation erwartet werden (vgl. VDI 2014). Plakativ wird in diesem Zusammenhang auch von „garbage in, garbage out“ gesprochen.

Die benötigten Eingangsdaten für Untersuchungen der Ablaufsimulation liegen oft in unterschiedlichen Quellsystemen vor. Meist erfolgt die Datenbereitstellung dezentral, d. h., die Daten müssen seitens der Simulation separat und explizit angefordert werden. Viele Daten können nicht direkt abgefragt werden und sind aus diesem Grund manuell oder teilautomatisiert in die Simulationsmodelle zu übertragen.

Eine wichtige Rolle bei der Übernahme von Daten aus Drittsystemen spielen die Validierung und Verifikation der Daten (vgl. Rabe et al. 2008). Hier muss vor allem geklärt sein, ob es sich um die richtigen Daten für die Fragestellung handelt und ob die Daten selbst richtig und reproduzierbar sind. Darüber hinaus ist die Vollständigkeit der Daten innerhalb eines Datensatzes erforderlich. Ist diese nicht gegeben, sind oft alle Daten des Datensatzes für die Ablaufsimulation unbrauchbar.

Sind die benötigten Eingangsdaten jedoch in der richtigen Qualität (vgl. Wenzel et al. 2008; VDA 2013) vorhanden, minimiert sich der Aufwand für die Modellparametrierung. Das Simulationsmodell kann dann gegebenenfalls (teil-)automatisch erstellt werden.

---

M. Mieschner  
BMW AG, München, Deutschland

G. Mayer (✉)  
BMW AG, München, Deutschland  
E-Mail: [gottfried.mayer@bmw.de](mailto:gottfried.mayer@bmw.de)

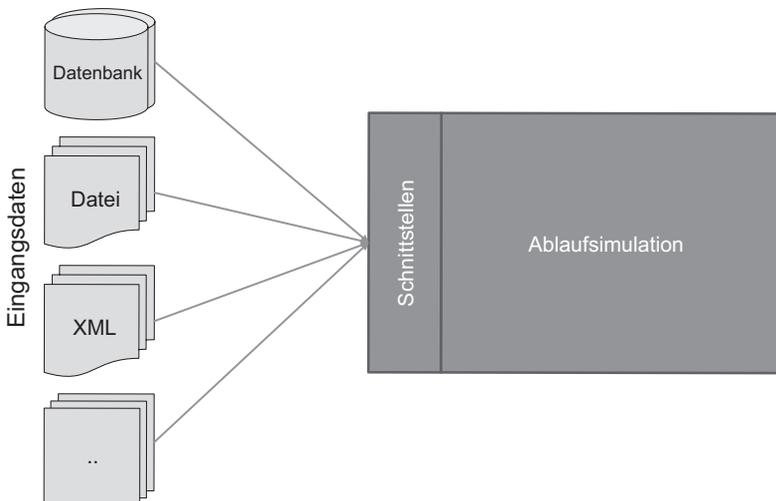
Dieser Beitrag beschreibt unterschiedliche Herangehensweisen für die Datenbereitstellung, erörtert Möglichkeiten der Datenhaltung und beschreibt typische Datenquellen in der Automobilindustrie.

## 22.2 Datenbereitstellung

Für die Bereitstellung der Daten gibt es unterschiedliche Möglichkeiten (Abb. 22.1). Die fehleranfälligste ist die manuelle Bereitstellung bzw. die händische Datenübertragung. Als zuverlässiger hat sich die automatisierte Datenbereitstellung und -übernahme erwiesen.

Die manuelle Datenbereitstellung ist aufwändig und bedingt durch mehrere durchzuführende Zwischenschritte oft fehleranfällig. Als Beispiel kann hier die Übertragung von Anlagen- oder Mengengerüsten in das Simulationsmodell angeführt werden. Dies kann durch das Zählen der Komponenten im Anlagenlayout erfolgen. Um aus diesen Mengengerüsten verwendbare Verfügbarkeitswerte zu erhalten, müssen diese mit spezifischen Verfügbarkeitswerten je Komponente ergänzt und mathematisch verarbeitet werden. Dazu wird in vielen Fällen eine Tabellenkalkulation verwendet. Werden diese Schritte nicht durch spezielle Werkzeuge unterstützt, erfolgt in diesem Beispiel die Übertragung der Daten zweimal manuell.

Um den Aufwand und die Fehleranfälligkeit solcher Datenübertragungen zu minimieren, werden diese bei wiederkehrenden Aufgaben oft automatisiert. Die beiden gängigsten Arten der automatisierten Datenbereitstellung sind der direkte Datenzugriff auf die Basisdaten und der indirekte Datenzugriff über Hilfsformate wie XML (Extensible Markup Language). Die Art des Zugriffs wird durch die Datenhaltung des Quellsystems und seine Zugangsberechtigungen definiert.



**Abb. 22.1** Einfache Datenanbindung an die Ablaufsimulation

Liegen die benötigten Daten des Quellsystems in einer Datenbank vor, ist der einfachste Weg des Datenzugriffs der direkte Zugriff auf die Datenbank selbst. Dieser sollte über einen Datenbankbenutzer erfolgen, der speziell für die Daten der Simulation angelegt wird. In der Regel wird ein solcher Zugriff über eine schriftliche Schnittstellenvereinbarung geregelt, in der genau festgehalten wird, welche Daten benötigt werden. Dadurch wird gewährleistet, dass die Ablaufsimulation nur auf die Daten zugreifen kann, die auch benötigt werden („Need-to-know“-Prinzip). Des Weiteren kann darin auch geregelt werden, zu welchem Zeitpunkt die Daten zur Verfügung gestellt werden oder ob die Daten lediglich zur Auswertung oder zur Übernahme ins Simulationsmodell bereitgestellt werden. Ein weiterer Vorteil einer Schnittstellenvereinbarung ist, dass diese auch bei Änderungen des Quellsystems eingehalten werden muss. Sollte dies nicht möglich sein, ist es notwendig, eine neue Vereinbarung zu treffen.

Liegen die erforderlichen Daten nicht in einer Datenbank vor oder ist es aus sicherheitstechnischen Gründen nicht möglich, die Daten direkt aus der Datenbank zu lesen, kann ein Datenaustausch über Dateischnittstellen zum Einsatz kommen. Dieser kann auf zwei Arten erfolgen: Zum einen über eine flache Datei (Flatfile), in welcher die Daten einfach strukturiert und separiert durch definierte Trennzeichen abgelegt werden, zum anderen über XML, in der die Strukturierung über verschachtelbare Bezeichner (Tags) erfolgt. Ist ein regelmäßiger Austausch angestrebt, so empfiehlt sich der Austausch über ein XML-Format, das abhängig von den Anforderungen definiert werden kann, oder es wird ein bekanntes XML-Schema verwendet.

Eine weitere Möglichkeit stellt der Austausch von Daten über eine Socket-Schnittstelle dar. In diesem Fall werden Daten bidirektional über das Internetprotokoll TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) ausgetauscht. Diese Form des Datenaustausches wird beispielsweise benötigt, wenn Telegramme aus dem Simulationsmodell an eine übergeordnete Steuerung gesandt werden. Sie wird hauptsächlich bei der virtuellen Inbetriebnahme oder der Emulation eingesetzt (vgl. Grillitsch und Mayer 2010).

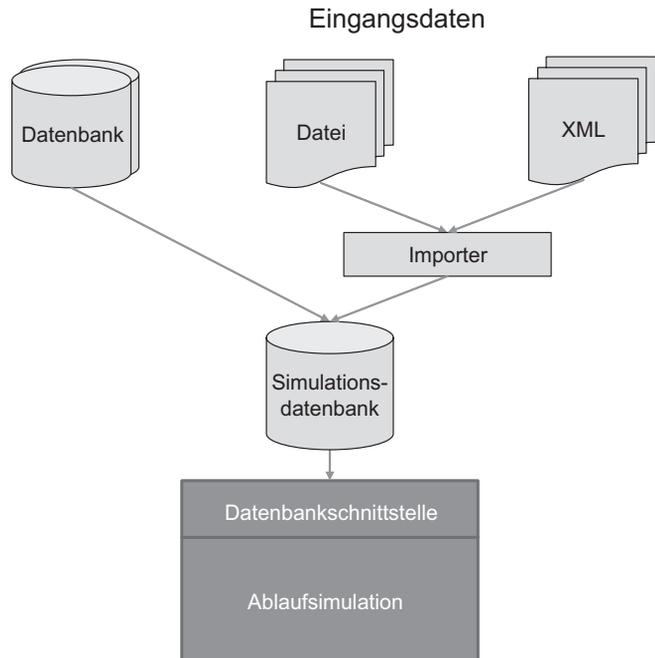
Darüber hinaus existieren noch weitere Datenschnittstellen für die Ablaufsimulation beispielsweise zu Tabellenkalkulationssystemen oder über die individuelle Programmierung mittels Programmiersprachen, auf die aber hier nicht näher eingegangen werden soll.

---

### 22.3 Datenhaltung

Zur Haltung der simulationsrelevanten Daten gibt es unterschiedliche Konzepte. Das einfachste Konzept ist die Sammlung der Daten in einem Dateisystem des Betriebssystems oder auf einem Server-Laufwerk. Diese Möglichkeit ist in der Regel immer gegeben. Sie hat aber den Nachteil, dass über diese Schnittstelle keine Datenbankquellen angebunden werden können (außer durch Kopie der Datenbank in eine einfache dateibasierte Datenbank wie z. B. Microsoft Access oder SQLite) und dass eine Versionsverwaltung der Daten ohne weitere Hilfsmittel nicht automatisiert möglich ist.

**Abb. 22.2** Datenanbindung über eine zentrale Simulationsdatenbank



Sollen Daten in einem Dateisystem gehalten werden (Abb. 22.2), so ist es ratsam, dies nicht unternehmensindividuell, sondern über ein Versionsverwaltungswerkzeug umzusetzen. Ein solches Werkzeug ermöglicht die Haltung der Daten in sogenannten Archiven, inklusive einer Versionshistorie, d. h., eine Version wird nicht direkt überschrieben, sondern als neue Datei abgelegt, sodass alte Dateien reproduzierbar sind. Hierfür existieren unterschiedliche Lösungen auch im Open-Source-Umfeld wie z. B. Apache Subversion oder CVS (Concurrent Versions System).

Eine weitere Möglichkeit ist die Datenhaltung in einer eigenen Simulationsdatenbank. Hier können sowohl Verweise auf andere Datenbanksysteme bereitgestellt als auch Daten selbst in unterschiedlichen Versionen gehalten werden. In den meisten Datenbanksystemen ist es auch möglich, Dateien in sogenannten BLOBs (Binary Large Objects) oder CLOBs (Character Large Objects) zu halten, was ein explizites Einlesen und Wandeln von Daten, die über flache oder strukturierte Dateien bereitgestellt werden, überflüssig macht.

Des Weiteren existieren auf dem Markt Datenbanksysteme, die Dateien im XML-Format einlesen können. Die Dateien werden intern in eine relationale Datenbankstruktur gewandelt und können dann über Datenbanksprachen wie SQL (Structured Query Language) abgefragt werden. Dafür muss die Struktur der XML-Datei über ein XML-Schema (\*.xsd Datei) definiert sein. Dieses Schema benötigt die Datenbank, um aus der XML-Struktur eine Datenbankstruktur ableiten zu können. Eine Datei, die eingelesen werden soll, muss sich deshalb strikt an das XML-Schema halten.

Ist eine Anbindung von Dateien über die oben genannten Optionen nicht möglich, so ist es erforderlich, die Daten über spezielle Programme in die Datenbank einzulesen. Dies kann über gezielt für diesen Anwendungsfall entwickelte Programme oder aber über Simulationsassistenzsysteme erfolgen.

Das Halten der Daten in einer Datenbank kann über eine explizite oder eine generische Datenbankstruktur erfolgen. Eine explizite Struktur in der Datenbank bildet die Tabellenstruktur analog den Eingangsdaten bzw. der Struktur der Quelldaten ab. Dies hat den Vorteil, dass die Datenbankstruktur einfach zu lesen ist, diese aber mit jeder Änderung am Quell- oder Zielsystem angepasst werden muss. Des Weiteren wächst die Datenbankstruktur mit den Anforderungen und wird schnell unübersichtlich. Auch sind Verknüpfungen zwischen den Daten zwar möglich, diese werden aber mit zunehmender Anzahl an Tabellen auch komplexer. Änderungen an solchen verknüpften Datenstrukturen sind dadurch häufig nur schwer möglich.

Sind die Eingangsdaten unterschiedlich und über viele Systeme verteilt, so empfiehlt es sich, die Datenbankstruktur nicht explizit, sondern generisch zu erstellen.

Der Vorteil einer generischen Struktur ist, dass diese unabhängig von wachsenden Anforderungen gleich bleibt. Die Tabellenstruktur ist einfach, dafür sind die Daten aber verschachtelt, sodass komplexe Abfragen erforderlich werden. Da hier die Daten aller Systeme in wenigen Tabellen gehalten werden, ist es unabdingbar, die Tabellen für Abfragen richtig zu indizieren, da sonst das Antwortzeitverhalten bei Abfragen mit steigender Tabellengröße länger wird. Mit einer generischen Struktur ist es möglich, beliebige Datenquellen anzubinden, ohne bei jeder neuen Datenquelle die Datenbankstruktur ändern zu müssen.

Eine Lösung für die Problematik der komplexen Abfragbarkeit der Daten ist eine Ansichtsstruktur über sogenannte Datenbanksichten (Views), die aus der generischen Struktur wieder eine explizite Struktur machen. Diese Views können entweder explizit direkt abgelegt werden oder aber indirekt über separat in Tabellen gespeicherte SQL-Abfragen umgesetzt werden.

Ein entscheidender Punkt bei der Gestaltung einer Simulationsdatenbank ist die Frage, welche Daten überhaupt in dieser gehalten und welche nur bereitgestellt werden müssen. Vor allem bei Produktionssystemen muss genau hinterfragt werden, welche Daten wirklich in der Datenbank gehalten werden müssen. Produktionssysteme sind bei Automobilherstellern oft als eine Instanz pro Produktionsstandort vorhanden, somit addieren sich die Daten über die Standorte. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, alle möglichen Daten in der Simulationsdatenbank zu halten, sondern nur die Daten, die wirklich über einen längeren Zeitraum historisiert gebraucht werden.

Werden z. B. Daten nur temporär für eine Simulationsstudie benötigt, so können diese im Quellsystem verbleiben und nur über eine Datenbankverbindung zur Simulationsdatenbank abgefragt werden. Eine Übertragung der Daten kann nötig sein, wenn z. B. statistische Größen wie Verwirbelungshistogramme erstellt werden müssen, das Quellsystem aber keine Historisierung für den benötigten Zeitraum bietet.

Die Gestaltung einer Datenablage ist, wie beschrieben, von einer Vielzahl an Parametern abhängig. Die wichtigste Frage, die im Vorfeld geklärt werden muss, ist immer, welche Systeme angebunden werden sollen. Einen Überblick dazu geben die nächsten Abschnitte.

### 22.3.1 Planungssysteme

In der Automobilindustrie werden unterschiedliche Planungssysteme in den einzelnen Unternehmensbereichen eingesetzt. Auf die für die Ablaufsimulation relevanten Planungssysteme wird im Folgenden eingegangen.

#### Prozessplanungssysteme

Für die Planung von Produktionsanlagen kommen verschiedene Systeme zum Einsatz. Als erstes sind hier Prozessplanungssysteme zu nennen. In diesen werden Anlagen und Fertigungsstationen mechanisch geplant. Dies geschieht häufig in Form von 3D-Layouts und Zellen. Aus diesen Systemen lassen sich üblicherweise technische und monetäre Eingangsdaten für die Ablaufsimulation ableiten. Diese enthalten:

- Genaue Information zu den Mengengerüsten, Anzahl und Art der Ausstattung,
- Verfügbarkeitsdaten der Einzelkomponenten: MTTR (Mean Time To Repair, mittlere Stördauer), MTBF (Mean Time Between Failure, mittlere Zeit zwischen zwei Störungen), eventuell Angaben zum Formfaktor bei Verwendung von statischen Verteilungen,
- Taktzeitinformationen, Taktungsdiagramme,
- logische Zusammengehörigkeit von Anlagenteilen, sogenannte Schutzkreise,
- Anzahl von Ablagen und Puffern,
- Kostengerüste als Grundlage für betriebswirtschaftliche Aspekte in der Ablaufsimulation,
- geometrische Informationen, Koordinaten für die 3D Simulation,
- Teile- und Verbauminformationen.

Die Art der Speicherung dieser Daten ist vom jeweiligen System abhängig. Liegen die Daten in einer zentralen Datenbank vor, können sie auf direktem Weg bereitgestellt werden. Andernfalls empfiehlt sich der Datenaustausch über XML-Dateien.

Aus diesen Daten lassen sich alle benötigten Informationen für die Abbildung und Erstellung von Anlagen und Schutzkreisen in einem Simulationsmodell ableiten. Als eine erste Plausibilitätsrechnung unabhängig von der Simulation sollte hier die theoretische Maximalausbringung je Schutzkreis ermittelt werden. Liegt diese für mindestens einen der Schutzkreise unter der geplanten Ausbringung abzüglich der Systemverluste (Verkettungsverluste), kann die gewünschte Ausbringung nicht erreicht werden.

Sind die Daten in den Produktionsplanungssystemen vollständig vorhanden, ist es möglich, daraus komplette Anlagensimulationen abzuleiten oder auch automatisch zu er-

stellen. Auch für Gewerke (z. B. einen gesamten Karosseriebau) sind hier wichtige Informationen wie die Verbauminformationen der Teile oder die geplante Gesamtauslegung des Gewerkes oder Werkes enthalten.

### **CAD-Systeme**

Eine weitere Datenquelle in der Produktionsvorbereitung sind CAD (Computer Aided Design) Planungsdaten. Diese dienen z. B. als Quellen für Streckeninformationen. Als Beispiele seien hier die Fördertechnikplanung oder die Hallenplanung für logistische Bewegungen genannt. Da CAD-Systeme meist nicht in relationaler Struktur aufgebaut sind, werden die Daten hier in der Regel über Dateien ausgetauscht.

Aus Anlagenlayouts lassen sich ähnliche, aber weniger detaillierte Informationen als aus Produktionsplanungssystemen gewinnen. Mengengerüste, die Anzahl von Ablagen und Puffern sowie Schutzkreise sind als Information ableitbar. Informationen wie Kosten oder Verfügbarkeiten sind häufig nicht im CAD-Layout enthalten. Im Gegensatz zum Prozessplanungssystem enthält das CAD-System die genauen Koordinaten, die idealerweise im Weltkoordinatensystem für die 3D-Anordnung vorliegen. Im besten Fall existiert eine Verknüpfung zwischen Prozessplanungssystem und CAD-System, sodass die Informationen aus beiden Systemen ausgelesen werden können. Leider ist aber oft die Datenkonsistenz beider Systeme nicht gegeben, sodass man entscheiden muss, welches der beiden Systeme als Datenquelle angezogen werden kann.

Fördertechniklayouts enthalten alle Komponenten der Fördertechnik wie Weichen, Rollenbänder oder Lifte. Da CAD-Systeme oft nicht richtungsorientiert sind, fehlen nur die Informationen des Förderflusses. Werden diese Information ergänzt und die Objekte um Verfügbarkeitsinformationen angereichert, so existiert eine gute Basis zur Datenübergabe an die Ablaufsimulation.

Hallenlayouts enthalten neben den Anlagenlayouts und den Fördertechnikinformationen auch Informationen zu den Wegen und Straßen innerhalb der Halle. Diese Informationen sind für die Logistiksimulation hilfreich. Werkspläne enthalten Wegeinformationen, die benötigt werden, um den Werksverkehr zwischen und zu den Hallen simulieren zu können.

Zur Prüfung der Daten aus CAD-Systemen existieren unterschiedliche Methoden. Die einfachste ist die Prüfung der Vollständigkeit der Parameter. Existieren z. B. Fördertechnikelemente, denen ein Vorgänger oder Nachfolger fehlt, ist kein durchgängiger Materialfluss möglich.

### **Logistikplanungssysteme**

Für die Planung logistischer Abläufe existieren zumeist eigenständige Planungssysteme. Diese Systeme unterscheiden sich in der Orientierung am Layout und der Granularität der zu planenden Teile. Für die Planung der Logistik und Bereitstellung in der Montage ist die Anzahl der Teile so groß, dass hier oft auf Teilefamilien- und nicht auf Sachnummernbasis geplant wird. Jedoch sind diese in den Planungssystemen gehaltenen Daten für die Ablaufsimulation relevant, wenn z. B. Routenzüge oder Staplerbewegungen simuliert werden sollen.

Da die meisten Logistikplanungssysteme selbst Auslastungen oder Lagergrößen berechnen können, sind die Daten aus diesen Systemen meist durchgängig und komplett und somit hervorragend als Quelle für die Ablaufsimulation geeignet. Sind im Quellsystem auch Wegeinformationen enthalten, wie z. B. bei layoutbasierter Planung, ist es möglich, aus den Daten ein komplett lauffähiges, aber nicht vollständiges Simulationsmodell zu erzeugen. Nicht vorhanden sind Informationen über Steuerungslogiken.

### Systeme zur Auftragsdatenverwaltung

Auch für die Ablaufsimulation sind Auftragsdaten eine signifikante Eingangsgröße. Die Komplexität der Erzeugung von Auftragsdaten im Simulationsmodell pendelt zwischen einfach, z. B. für Karosseriebausimulationen, bis hin zu komplex, z. B. für die Montagesimulationen. Jedoch erfordern Simulationsstudien, die in unterschiedlichen Detaillierungsstufen und für verschiedene Gewerke durchgeführt werden, einheitliche und verlässliche Planauftragsdaten. Da die Ablaufsimulation nicht die einzige Planungsinstanz ist, die diese Daten benötigt, existieren oft Werkzeuge zur Planauftragsdatengenerierung. Diese eignen sich auch gut als Datenquelle für die Ablaufsimulation, jedoch ist es ratsam, diese Daten zu vereinfachen, da sie häufig wesentlich mehr Informationen beinhalten, als für die Ablaufsimulation benötigt werden.

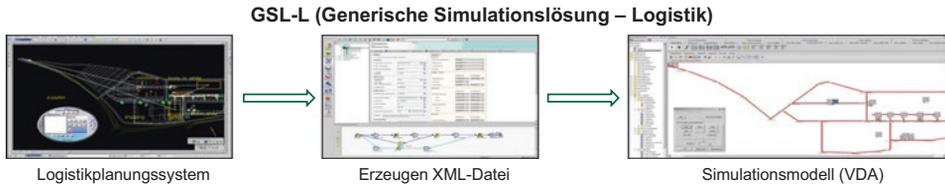
Insgesamt existieren weitaus mehr Planungssysteme als die bisher beschriebenen. Da eine Auflistung nicht vollständig sein kann, wird diese im Folgenden nicht weiter ergänzt, sondern es wird auf einige Beispiele im Detail eingegangen:

Als Beispiel für vorhandene Schnittstellen zu Planungssystemen ist die Generische Simulationslösung GSL der VDA (Verband der Automobilindustrie) Arbeitsgruppe Ablaufsimulation zu nennen. Diese besteht derzeit aus drei Modulen:

- **GSL-FT (Generische Simulationslösung Fördertechnik):** Fördertechnikdaten werden, nachdem die Förderrichtung festgelegt ist, aus einem CAD-Werkzeug durch die Erweiterung mit VDA-Bibliotheken in ein XML-Format geschrieben. Über ein spezifisches Werkzeug lassen sich die Daten wie Bahngeschwindigkeit oder Verfügbarkeit noch ändern. Aus der eingelesenen XML-Datei wird ein Simulationsmodell auf Basis des VDA Automotive Bausteinkastens erzeugt [Abb. 22.3](#).



**Abb. 22.3** Schnittstelle GSL-FT: Übergabe der Daten aus dem CAD-System über eine Oberfläche in das Simulationssystem



**Abb. 22.4** Schnittstelle GSL-L: Übergabe der Daten aus dem CAD-System in ein Logistikplanungssystem, dann in das Simulationssystem

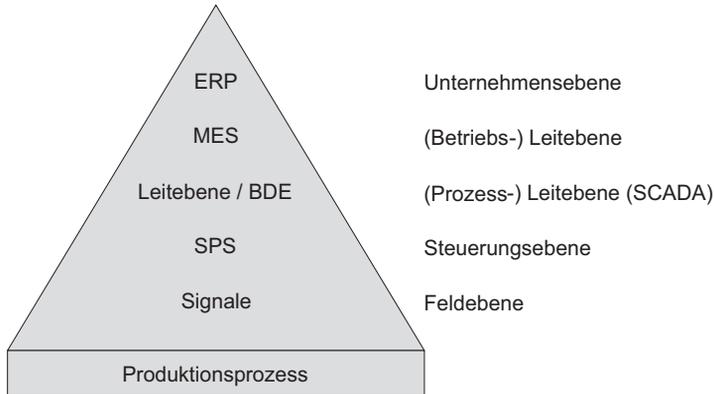


**Abb. 22.5** VDB-Schnittstelle: Übergabe der Daten aus dem mechanischen Planungssystem in die VDB (Mitte) und dann in das Simulationssystem

- **GSL-L (Generische Simulationslösung Logistik):** Logistikdaten werden aus einem Logistikplanungssystem in eine XML-Datei geschrieben. Sind die Daten im Logistikplanungssystem vollständig vorhanden, ist es möglich, ein lauffähiges Modell inklusive der Modelllogik zu erzeugen (vgl. Abb. 22.4).
- **VDB (Verfügbarkeitsdatenbank):** Aus dem mechanischen Planungssystem werden Mengengerüste abgeleitet und über ein spezifisches Werkzeug mit allen simulationsrelevanten Daten wie z. B. den Verfügbarkeitsdaten pro Einzelkomponente ergänzt. Die VDB errechnet dann aus den Einzelwerten der Komponente eine Gesamtverfügbarkeit für jede Station oder Anlage und prägt diese direkt im Simulationsmodell auf (vgl. Abb. 22.5).

### 22.3.2 Produktionsnahe IT-Systeme

Nicht nur in den Softwaresystemen zur Planungsunterstützung sondern auch in den produktionsnahen IT-Systemen finden sich relevante Daten für die Ablaufsimulation. Um die Ebene der produktionsnahen IT-Systeme einzuteilen, wird die Automatisierungspyramide (vgl. Abb. 22.6) (vgl. Polke 1994) zugrunde gelegt. Sie zeigt für einen Produktionsprozess mit seinen Elementen alle Ebenen von der Unternehmensebene (ERP: Enterprise Resource Planning), über die Betriebsleitebene (MES: Manufacturing Execution System) und die Prozessleitebene (BDE: Betriebsdatenerfassung, SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition) bis zur Steuerungsebene (SPS: Speicherprogrammierbare Steuerung) und Feldebene.



**Abb. 22.6** Automatisierungspyramide nach Polke (1994)

### ERP-Systeme

Auf Unternehmensebene werden mittels ERP-Systemen neben den betriebswirtschaftlichen Vorgängen auch die Produktionsauslastung und die Verteilung auf die Standorte geplant. Die geplanten Produktionszahlen sind, genauso wie Stücklisten, wichtige Eingabedaten für die Ablaufsimulation. Nicht selten sind hier auch Produktinformationen wie die Verbaureihenfolge oder die eindeutigen Teilenummern abgelegt. Meist werden die Daten für die Logistiksimulation oder die Belieferungssimulation verwendet (vgl. VDA 2011).

### MES-Systeme

MES sind meist direkt an die ERP-Systeme angebunden und stellen die Informationstechnik für die Aufträge zwischen unternehmensweiter Einplanung und der Produktion dar. Für die Ablaufsimulation relevante Daten sind hier:

- Auftragsdaten, allgemein und pro Produktionseinheit sowie pro Zeiteinheit wie Tag oder Schicht,
- geplante und historisierte Arbeitszeitmodelle,
- Zählpunktinformationen, d. h. Informationen zu den Teilen oder Aufträgen an bestimmten Punkten im Produktionssystem,
- Lagerbestände,
- Abrufreihenfolgen,
- Produktionsstruktur.

Da es sich bei diesen Daten in der Regel um große Datenmengen handelt, empfiehlt sich eine Kopplung zum MES direkt unter Verwendung einer Auskunftsdatenbank. Auskunftsdatenbanken sind Spiegelungsdatenbanken der Produktivdatenbanken, um Auskünfte und produktive Prozesse zu entkoppeln. Dies ist nötig, da sonst eine unglücklich formulierte Abfrage eines Produktivsystems Auswirkungen auf die Produktion oder im schlimmsten Falle sogar einen Produktionsstillstand zur Folge haben könnte. Diese Auskunftsdaten-

banken übernehmen die Daten aus den Produktivsystemen zwar mit einem gewissen Zeitversatz, was aber für Auswertungen in der Regel keine Rolle spielt. Sollten die Daten in einem MES nur eine limitierte Zeit gehalten werden können, kann es notwendig sein, die Daten langfristig in der Simulationsdatenbank oder ein Zwischenformat zu speichern. Dies ist vor allem dann nötig, wenn statistische Größen, wie Verfügbarkeitswerte von Anlagenkomponenten oder Histogramme von z. B. Durchlaufzeiten oder Verwirbelungen abgeleitet werden sollen. Wichtig bei der Langzeitarchivierung der Daten ist, dass die Dauer der Archivierung genau festgelegt wird, da es ansonsten zu großen Datensammlungen kommt, deren Abfrage viel Zeit in Anspruch nimmt. Die Datenbereitstellung ist hier analog zu den BDE-Systemen zu sehen. Meistens sind die Tabellenstruktur sowie die Datenmengen in MES hier sogar noch größer (vgl. Thiel et al. 2008).

Aus Zählpunktinformationen des MES lassen sich einfach Informationen über die Verwirbelung von Teilen oder Aufträgen in einzelnen Produktionsabschnitten auswerten. Auch die Validierung der Simulationsmodelle ist so gut möglich, indem eine bereits vergangene Zeitscheibe simuliert wird und die Verwirbelungsinformationen aus dem Modell mit denen des MES verglichen werden.

Werden jedoch genauere Informationen wie z. B. Nacharbeiterraten oder Informationen zu geplanten Prüfvorgängen benötigt, so liegen diese Angaben in den Qualitätssystemen. Qualitätssysteme sind spezielle Ausprägungen der MES und dienen zur Nachverfolgung der Qualitätsprüfungen und ihrer Ergebnisse. Neben der erfolgten Nacharbeit werden hier auch Verschrottungen erfasst. Vor allem bei nicht linearen Prozessen wie dem Lackierprozess oder der mechanischen Fertigung im Motorenbau ergeben sich die Informationen über den genauen Ablauf der Teile oder Aufträge aus diesen Systemen.

Informationen aus Qualitätssystemen sind für die Auslegung von Gewerken wie dem Karosseriebau entscheidend. Durch die Verwendung dieser Informationen in die Ablaufsimulation ergeben sich die Verwirbelungen und die daraus resultierenden Größen von Resortierspeichern.

### **Leitebene/BDE**

Auf der Prozessleitebene befinden sich die sogenannten SCADA-Systeme. Diese dienen der Datenerfassung und der Detailsteuerung der Produktion. Als Beispiel für die Datenerfassung seien hier BDE-Systeme genannt. In diesen Systemen werden alle Produktionsdaten gesammelt, visualisiert und ausgewertet. Bei den Daten handelt es sich um:

- Stördaten einzeln und kumuliert,
- Produktionsstückzahlen und Stückzahlverläufe,
- Speicherfüllungen und Speicherverläufe,
- Arbeitszeitmodelle,
- Kennzahlen (KPI, Key Performance Indicator).

Im BDE-System laufen alle Informationen aus der Prozessebene zusammen. Da hier mehrere Millionen Datensätze pro Tag erfasst werden, ist die Validierung und Verifizierung der

Daten unumgänglich. So kann zum Beispiel eine falsch aufgelegte Störmeldung alle Kennzahlen für eine Anlage verfälschen. Wenn hier seitens der Anlage eine technische Störung gemeldet wird, obwohl die Anlage läuft, werden die Verfügbarkeit oder auch die OEE (Overall Equipment Effectiveness) verfälscht. Für die Daten im BDE-System gelten dieselben Voraussetzungen wie bei einem MES. Auch hier kann es nötig sein, Daten länger zu archivieren, als es im Quellsystem möglich ist. Dies trifft vor allem bei der Ableitung von Kennzahlen für Komponenten zu.

Als Beispiel für die Detailsteuerungsfunktionen seien hier Steuerungssysteme genannt, die zwischen der Betriebsleitebene und der Steuerungsebene angesiedelt sind. Da es nicht immer möglich ist, die komplette Produktionssteuerung in den beiden vorher genannten Systemen abzubilden, existieren diverse Steuerungssysteme, die von der einfachen Steuerung eines Teilespeichers bis hin zur Verwaltung von kompletten Produktionsbereichen gehen können.

Je nach Art des Systems sind hier mehr oder weniger relevante Daten für die Ablaufsimulation enthalten. Auch die Anbindung der Systeme ist mannigfaltig, da sie auf unterschiedlichen Plattformen verwirklicht werden. Dies geht von Systemen auf Basis von SPS-Steuerungen bis hin zu großen prozess- und datenbankgebundenen Lösungen.

### **Steuerungs- und Signalebene**

Informationen aus der Steuerungs- und Signalebene finden selten Eingang in die Ablaufsimulation, sie sind aber eine wichtige Eingangsgröße für die virtuelle Inbetriebnahme (vgl. Kövari 2011). Die meisten relevanten Daten aus diesen Ebenen sind im BDE-System erfasst und werden dort kumuliert, so dass die Daten besser abgefragt werden können. Werden allerdings Daten für die virtuelle Inbetriebnahme benötigt, erfordert dies häufig eigene Schnittstellen und Protokolle. Für SPS gibt es hierfür den Standard OPC (Object Linking and Embedding for Process Control) oder auch Shared-Memory-Ansätze. Durch diese Protokolle kann direkt auf die Signale der Steuerungen zugegriffen oder Ausgangssignale können gesetzt und beeinflusst werden.

---

## **22.4 Ausblick**

Ist die Möglichkeit gegeben, alle simulationsrelevanten Daten direkt oder indirekt in der benötigten Qualität über Schnittstellen für die Simulation zu nutzen, ist der Aufbau und die Parametrierung eines Simulationsmodells oft ein einfacher Vorgang. In der Praxis scheidet es jedoch häufig an der Durchgängigkeit der Systeme sowie der Datenqualität. An diesem Punkt setzen auch die Methoden der digitalen Fabrik (vgl. Bracht et al. 2018) an, die einen Befähiger für die Ziele von Industrie 4.0 darstellen. Die durchgängige Haltung der Daten in den dafür konzipierten Systemen und mit einheitlichen Schnittstellen sind Grundlage einer Digitalisierung der Fabriken. Diese Voraussetzung gilt genauso für die Ablaufsimulation. Mit dem weiteren Ausbau der digitalen Fabrik wird sich auch die Ablaufsimulation verbessern können.

Industrie 4.0 hat sich zum Ziel gesetzt, die Vernetzung in der Produktion weiter auszubauen und die Automatisierung voranzutreiben. Dies bedingt auch, dass Daten durchgängig bereitgestellt und ausgetauscht werden müssen. Davon wird die Ablaufsimulation profitieren können, da höhere Automatisierung meist höhere Komplexität bedingt und dadurch die Ablaufsimulation an Bedeutung gewinnen wird.

Ein weiterer Punkt im Umfeld von Industrie 4.0 ist der Umgang mit großen und unstrukturierten Datenmengen (Big Data). Eine bessere Verwaltung der Produktions- und Planungsdaten sowie explizite Auswertungen (Data Mining) werden allen Simulationsanwendungen weiterhelfen.

Eine Verbesserung könnte auch die Einführung von AutomationML (vgl. Drath 2010; IEC 62714-1 2014) als Datenaustauschformat darstellen. Durch Nutzung dieses Formats soll jedes System nur noch über eine Import- und Export-Schnittstelle auf Basis von AutomationML verfügen. Durch einen strikt standardisierten Aufbau und der Möglichkeit, die exportierten Daten an mehrere Zielsysteme gleichzeitig weiterzugeben, wird durch AutomationML der Aufwand für die Einhaltung von Schnittstellen reduziert.

---

## Literatur

- Bracht U, Geckler D, Wenzel S (2018) Digitale Fabrik, 2. Aufl. Springer, Berlin
- Drath R (2010) Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Springer, Berlin
- Grillitsch U, Mayer G (2010) Auf dem Weg zum Standard – Virtuelle Inbetriebnahme von IT-Steuerungssystemen in der Produktionssteuerung. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 591–598
- IEC 62714-1 (2014) Ed. 1.0. Engineering data exchange format for use in industrial automation systems engineering – Automation markup language – Part 1: Architecture and general requirements
- Kövari L (2011) Konzeption und Realisierung eines neuen Systems zur produktbegleitenden virtuellen Inbetriebnahme komplexer Förderanlagen. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
- Polke M (1994) Prozessleittechnik. Oldenbourg, München
- Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S (2008) Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Springer, Berlin
- Thiel K, Meyer H, Fuchs F (2008) MES – Grundlage der Produktion von morgen. Oldenbourg, München
- VDA (2011) VDA-Empfehlung 4810 Ausprägung der Logistiksimulationen. Resource document, Verband der Automobilindustrie. [https://www.vda.de/dam/vda/publications/Ausprägung%20der%20Logistiksimulationen/1311851683\\_de\\_1583075918.pdf](https://www.vda.de/dam/vda/publications/Ausprägung%20der%20Logistiksimulationen/1311851683_de_1583075918.pdf). Zugegriffen am 03.12.2018
- VDA (2013) VDA-Empfehlung 4811 Qualitätskriterien für Simulationsstudien der Ablaufsimulation. Resource document, Verband der Automobilindustrie. [https://www.vda.de/dam/vda/publications/4811%20Qualitätskriterien%20für%20Simulationsstudien%20der%20Ablaufsimulation/1395759260\\_de\\_358330402.pdf](https://www.vda.de/dam/vda/publications/4811%20Qualitätskriterien%20für%20Simulationsstudien%20der%20Ablaufsimulation/1395759260_de_358330402.pdf). Zugegriffen am 03.12.2018
- VDI (2014) VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Beuth, Berlin
- Wenzel S, Weiß M, Collisi-Böhmer S, Pitsch H, Rose O (2008) Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Springer, Berlin



**Marielouise Mieschner** Nach dem Maschinenbaustudium an der Leibniz Universität Hannover (2004–2010) tätig als Produktionsplanerin im Bereich Materialflusssimulation bei der MBtech Group GmbH & Co. KGaA. Seit Ende 2011 Mitarbeiterin der BMW AG. Von 2011–2018 im Fachbereich Ablaufsimulation und Mitglied der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation des VDA. Seit 2018 im Prozessmanagement Order-to-Delivery.



**Gottfried Mayer** Seit 1990 Mitarbeiter der BMW AG. Nach einer Ausbildung zum Industrieelektroniker Fachbereich Produktionstechnik folgte die Instandhaltung im Karosseriebau. Von 1994–1997 nebenberufliche Ausbildung zum Techniker der Elektronik mit Fachbereich Datenverarbeitungstechnik. 1996 Wechsel zur übergeordneten Steuerungstechnik mit Schwerpunkt BDE-Systeme. Seit 1999 im Bereich der Ablaufsimulation, zuerst Karosseriebau Werk München, danach Karosseriebauten weltweit bis hin zur Verantwortung über alle Gewerke. Seit 2011 in der BMW Group IT verantwortlich für die Themenfelder Simulation, virtuelle Produktion und Digitale Fabrik. Seit 2018 IT Projektleiter Additive Manufacturing.



# Automatische Modellgenerierung – Stand, Klassifizierung und ein Anwendungsbeispiel

# 23

Sören Bergmann und Steffen Straßburger

## 23.1 Motivation

Simulation ist in verschiedenen Disziplinen und Branchen eine anerkannte Methode, die bei einer Vielzahl von Fragestellungen genutzt werden kann. In der Automobilindustrie wird im Kontext von Produktion und Logistik insbesondere die Materialflusssimulation auf Basis diskret-ereignisgesteuerter Simulationsverfahren genutzt. Der Einsatz reicht von der Planung bis hin zur Steuerung von Fertigungssystemen (Bracht et al. 2011). Dem mitunter schwer quantifizierbaren Nutzen stehen in der Praxis erhebliche Aufwände, u. a. zur Modellerstellung, gegenüber (VDI 2014, S. 21 f.). Für die Erstellung von Simulationsmodellen werden in der Regel stark interdisziplinär ausgerichtete Simulationsexperten mit vielfältigen Wissen aus den Bereichen Informatik, Statistik und je nach Anwendungsfall zusätzlich Betriebswirtschaftslehre, Ingenieurwissenschaften, Maschinenbau o. ä. benötigt (Eckardt 2002, S. 20; Bergmann 2011, S. 9). Diese skizzierten ökonomischen, organisatorischen aber auch technischen Barrieren bei der Simulationsanwendung verhindern bzw. hemmen einen vermehrten Einsatz der Simulation in der Praxis bzw. verteuern diesen (Johansson et al. 2007, S. 1673 f.; Bracht et al. 2011, S. 112). So stellt eine Studie des Fraunhofer IFF dar, dass Simulation selbst in Großunternehmen nicht durchgängig für alle potenziellen Fragestellungen, sondern sehr gezielt für dedizierte Einsatzzwecke eingesetzt wird (Straßburger et al. 2006, S. 391–395). Vor diesen Hintergrund werden u. a. von Fowler und Rose (2004) eine Verringerung von Zeit und Aufwand als eine der großen Herausforderungen im Kontext der Simulation benannt.

Ein in den letzten Jahren immer wieder diskutierter Ansatz, um eine Aufwandsreduktion bei der Modellerstellung zu erreichen, besteht in der automatischen Generierung der

---

S. Bergmann · S. Straßburger (✉)  
Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Deutschland  
E-Mail: [soeren.bergmann@tu-ilmenau.de](mailto:soeren.bergmann@tu-ilmenau.de); [steffen.strassburger@tu-ilmenau.de](mailto:steffen.strassburger@tu-ilmenau.de)

benötigten Simulationsmodelle (Bergmann und Straßburger 2010; Bergmann 2014). So gab es im Zuge der Einführung der Digitalen Fabrik in der Automobilindustrie verschiedene Bestrebungen, Simulationsmodelle aus Planungsdaten der Digitalen Fabrik zu generieren (z. B. Jensen 2007; Wurdig und Wacker 2008).

Diese Ansätze sind prinzipiell geeignet, für spezielle Anwendungsszenarien eine Modellerstellung zu automatisieren. Für eine größere Verbreitung und Wiederverwendbarkeit solcher Ansätze bedarf es jedoch standardisierter Schnittstellen und Dateiformate, die von heutigen Werkzeugen der Digitalen Fabrik nur mangelhaft unterstützt werden.

Neben einer automatisierten Modellerstellung lassen sich weitere Verbesserungen bzw. Einsparungen erzielen, wenn die automatische Modellgenerierung mit weiterführenden Konzepten, wie einer automatischen Modellinitialisierung (Bergmann et al. 2011) oder einer verteilten Experimentausführung und -auswertung (Bergmann et al. 2012a), gekoppelt wird. Weitere positive Effekte der Automatisierung der Modellerstellung lassen sich in den Bereichen Modellqualität, Wiederholbarkeit und Modellstandardisierung erwarten.

Im Folgenden wird zunächst der Begriff Modellgenerierung eingeführt sowie eine mögliche Klassifizierung von automatischen Modellgenerierungsansätzen vorgenommen. Im Abschn. 23.3 werden mögliche Schnittstellen, Standards für den Datenaustausch sowie unterschiedliche Architektur- und Entwicklungsansätze für Modellgeneratoren vorgestellt sowie deren Anforderungen an ein Simulationswerkzeug diskutiert. Bevor im letzten Abschnitt ein Fazit gezogen wird, wird in Abschn. 23.4 ein standardbasiertes Framework zur automatische Modellgenerierung (AMG) vorgestellt.

---

## 23.2 Was ist automatische Modellgenerierung? – Eine Definition und Klassifizierungsansätze

Unter dem Begriff der (teil-)automatischen Modellgenerierung werden im Kontext der Simulation Ansätze verstanden, bei denen das Simulationsmodell nicht (rein) manuell unter Nutzung der Modellierungswerkzeuge bzw. der Programmierumgebung eines Simulationswerkzeugs erstellt wird, sondern vielmehr auf Basis externer Datenquellen, mittels Schnittstellen und Algorithmen, generiert wird. Im engeren Sinn wird daher auch von datengetriebener Modellgenerierung gesprochen (Bergmann und Straßburger 2010; Straßburger et al. 2010; Eckardt 2002).

Es gibt ein breites Spektrum an Klassifikationsmöglichkeiten für Ansätze zur Modellgenerierung. Eckardt (2002, S. 39) unterscheidet insgesamt vier Ansätze der Modellgenerierung, wobei der mathematisch-statistische Ansatz im Kontext der ereignisdiskreten Simulation kaum Anwendung findet, die folgenden drei Ansätze jedoch praktische Relevanz haben:

1. *Parametrische Ansätze*: Diesen Ansatz kennzeichnet, dass Modelle auf Basis existierender Simulationsbausteine, welche in Bibliotheken gespeichert sind, generiert werden. Hierzu werden durch den Modellgenerator entsprechende Bausteine auf Basis von Parametern selektiert und konfiguriert.

2. *Strukturbasierte Ansätze*: Ausgangspunkt dieses Ansatzes sind Daten, die die Struktur des abzubildenden Systems beschreiben. Hierzu zählen laut Eckardt (2002) insbesondere Fabriklayoutdaten aus entsprechenden Computer Aided Design (CAD)-Systemen.
3. *Hybrid-wissensbasierte Ansätze*: Diese Ansätze kombinieren Verfahren der künstlichen Intelligenz (Expertensysteme, neuronale Netze u. ä.) mit den beiden bisher dargestellten Verfahren.

Neben dieser groben Einteilung, die zudem in heutigen Ansätzen ggf. nicht trennscharf anwendbar ist, lassen sich AMG-Ansätze nach einer Vielzahl von Merkmalen klassifizieren. Eine Übersicht möglicher Klassifizierungsansätze gibt Tab. 23.1 in Form eines morphologischen Kastens wieder. Die Vielfalt möglicher Ausprägungen der AMG erlaubt es, auf konkrete Projektanforderungen zugeschnittene Ansätze zu wählen bzw. den Fokus der Anwendung auf einzelne bzw. Gruppen von Merkmalen zu lenken. Unabhängig von konkreten Projektrahmenbedingungen lassen sich grundlegende Anforderungen, welche durch AMG-Ansätze erfüllt werden sollten, festhalten. So nennt Bergmann (2014, S. 26) aufbauend auf Eckardt (2002) vor allem folgende Anforderungen an die AMG:

- Flexibilität bezüglich der abzubildenden (Produktions-)Systeme, d. h., eine möglichst breite Palette verschiedener Produktionssysteme (technisch, organisatorisch, strukturell und dispositiv) ist zu unterstützen,
- Flexibilität bezüglich des Abstraktionslevels bzw. Detaillierungsgrades, d. h., der Level der Abstraktion sollte an die Aufgabe anpassbar sein und ggf. in einzelnen Subsystemen variieren können,
- Flexibilität bezüglich der Simulationsanwendung (planungs- versus betriebsbegleitend),
- Erweiterungsfähigkeit des Ansatzes, d. h., Prozess- und Unternehmensspezifika sollten jederzeit implementierbar und geeignet in den automatischen Modellaufbau integrierbar sein,
- Hoher Automatisierungsgrad mit der Möglichkeit persistenter „manueller“ Ergänzungen/Modifikationen (insbesondere bei wiederholt durchzuführender AMG),
- Flexibilität bezüglich der Datenquellen, d. h., es sollte eine prinzipiell von der technischen, konkreten Datenquelle unabhängige Lösung entstehen,
- Unterstützung der Grundsätze der ordnungsmäßigen Modellierung (GoM), d. h., die Forderung nach Richtigkeit, Relevanz, Wirtschaftlichkeit, Klarheit, Vergleichbarkeit sowie an einen systematischen Aufbau von Modelle sollten unterstützt werden (vgl. Becker 1998, S. 4–7).

Neben diesen allgemeinen Anforderungen sind immer wieder spezielle Anforderungen bzw. Herausforderungen der Anwendung der AMG von besonderem Interesse (Bergmann und Strassburger 2010). So hat die AMG noch stärker als die manuelle Modellierung mit fehlenden, fehlerhaften und inkonsistenten Daten in den betrieblichen Informationssystemen, welche als Datenquellen genutzt werden sollen, zu kämpfen. Je nach

**Tab. 23.1** Klassifikationsmöglichkeiten von Modellgenerierungsansätzen (Straßburger et al. 2010, S. 37)

Kriterium	Ausprägung				
Einsatzfall der generierten Simulationsmodelle	planungsbegleitend			betriebsbegleitend	hybrid
	strategisch (z. B. Standort)	taktisch (z. B. Layout, Puffergrößen)			
Fertigungstyp	Job-Shop		Flow-Shop		Open-Shop
Fokussiertes Gewerk	Montage	Lackiererei	Logistik	Förder-technik	andere
Nutzergruppe	Fachabteilung		Simulationsexperte		jeder
Grad der Automatisierung der Modellerstellung	keine	teilautomatisch			voll automatisch
		Struktur	Verhalten	beides	
Ansatz der Modellerstellung	standardisierte Eingabeformulare	dialoggeführt (Wizzard o. ä.)	Referenzmodelle	direkter generischer Modellaufbau	
				eine Datenquelle	mehrere Datenquellen
Unterstützte Phasen einer Simulationsstudie	Modellerstellung	Verifikation und Validierung	Experiment / Initialisierung	mehrere	
Technische Umsetzung der Schnittstelle	textbasiert (z. B. *.csv)	tabellenbasiert (z. B. Excel)	XML (Extensible Markup Language) (z. B. Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) Information Model)	Datenbank	
Art der fachlichen Schnittstelle	layoutbasiert	produktbasiert	prozessbasiert	sonstige / hybrid	
Wiederverwendung des Modells	keine		mehrmalig		
	keine weiteren Fragestellungen	nicht wirtschaftlich	manuelle Nachbearbeitung	Neuparametrisierung	kontinuierliche Anpassung

Anwendungsfall können z. B. nur grobe Plandaten vorhanden sein, des Weiteren sind simulationspezifische Daten meist nicht direkt verfügbar (z. B. stochastische Verteilungen, Steuerungsregeln).

Insbesondere die Generierung von komplexerem dynamischem Verhalten ist hierbei ein generelles Problem eines jeden Modellgenerierungsansatzes. Das Problemspektrum

beginnt bereits bei der Abbildung von einfachen Steuerstrategien (Pufferstrategien, Routingsentscheidungen u. ä.). Diese sind zwar simulationsseitig häufig noch recht gut durch einfache Parametrisierung von Bausteinen abbildbar, vielfach fehlen entsprechende Informationen jedoch in den Ausgangssystemen (Prozessplanungswerkzeuge, Fabriklayout-Tools, Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme).

Mögliche Lösungsansätze basieren z. B. auf der Auswertung von Daten der Betriebsdatenerfassung (BDE). So hat Selke (2005) eine Methode entwickelt, um „Orte“, an denen eine Steuerung erfolgt, automatisch zu erkennen sowie das beobachtete Verhalten mit dem vordefinierter Regeln abzugleichen, die dann in der Simulation zu nutzen sind. Bergmann et al. (2014a) erweitern diesen Ansatz, indem nicht nur vordefinierte Regeln erkannt werden, sondern Verhalten durch künstliche neuronale Netze approximiert und nutzbar gemacht wird.

Im Fall fehlender BDE-Daten sind diese Ansätze nicht anwendbar. In diesem Falle wird vielfach auf einfache Default-Logiken zurückgegriffen (z. B. Teile werden nach einer First In First Out (FIFO) Strategie aus einem Puffer entnommen). Je nach Anwendungsfall kann jedoch auch eine manuelle Modellierung der Logik im Simulator oder einer geeigneten Beschreibungssprache nötig werden. Hierbei ist es wichtig, dass die Möglichkeit der teilautomatischen Generierung von Modellteilen (z. B. Struktur des Produktionssystems, Produkt- und Prozesspläne) und manuelle Ergänzung von komplexerem Verhalten sinnvoll kombinierbar bleiben.

---

### 23.3 Schnittstellen, Datenstandards und Implementierungsansätze

Im Folgenden werden zunächst Datenquellen und deren Schnittstellen und Datenaustauschstandards, welche einen Beitrag im Kontext der AMG leisten können, vorgestellt. Im zweiten Teil des Abschnittes werden zwei mögliche Implementierungsansätze bzw. Architekturen gegenüber gestellt.

Notwendige Eingangsdaten für Simulationsstudien werden nach VDI (2014, S. 12 f.) prinzipiell zunächst in technischen Daten, Organisationsdaten und Systemlastdaten unterschieden. In der betrieblichen Praxis kommt daher eine Vielzahl möglicher Datenquellen für eine automatische Generierung von Simulationsmodellen in Frage. Der Spielraum reicht hierbei von Systemen der Digitalen Fabrik, z. B. Werkzeuge der digitalen Prozessplanung, CAD-Systemen mit Produkt- und Layoutinformationen bis hin zu operativen Systemen wie z. B. ERP und Manufacturing Execution Systems (MES).

Ebenfalls mögliche Datenquellen sind System- bzw. Prozessmodelle, welche in entsprechenden Werkzeugen modelliert wurden und in Beschreibungsformen wie der Business Process Model and Notation (BPMN), als Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) oder in der Systems Modeling Language (SysML) vorliegen. Derartige Datenquellen werden im Folgenden ausgeklammert, da der Fokus hier auf existierenden betrieblichen Datenquellen ohne direkten Simulationsbezug liegen soll. Ausführungen zur AMG aus derartigen Modellbeschreibungssprachen sind z. B. bei Schönherr und Rose (2011), die

SysML als Unified Modeling Language (UML)-basierte Systembeschreibungssprache nutzen, oder Kloos (2013), der Prozessmodelle wie EPK oder BPMN anwendet, zu finden.

Trotz der Einschränkung ist die verbleibende Zahl der Datenquellen groß und heterogen. Diesem Umstand geschuldet wurden verschiedene Schnittstellen und Datenformate analysiert und eine Vielzahl erprobt. Die Spanne reicht hierbei von selbst definierten Formaten bis hin zur Nutzung von standardisierten Datenformaten, wobei die Anzahl zur Verfügung stehender geeigneter Standards jedoch generell als gering einzustufen ist.

Während in frühen Arbeiten zur AMG proprietäre Datenformate dominieren, ist in den letzten Jahren ein Trend zu XML-basierten Dateiformaten, deren Beschreibung in Form von XML-Schemata erfolgen kann, festzustellen (z. B. Jensen 2007).

Die Schwäche der proprietären Ansätze ist die meist starke Fokussierung auf ein spezielles Produktionssystem und Softwareprodukt. Verstärkt wird diese Problematik dadurch, dass kaum weitere Forscher bzw. Entwickler diese Formatentwürfe validieren, ergänzen und weiterentwickeln.

Generell ist daher eine offene Standardisierung der Datenformate vorzuziehen. Da im Kontext der Materialflusssimulation jedoch keine Austauschformate für Modelle bzw. Teilmodelle existieren, ist die Auswahl eines für AMG-Zwecke geeigneten Datenstandards kein triviales Problem. Kein bestehender Standard unterstützt nativ alle für die Simulation nötigen Daten. Dies führt schnell zu entweder lückenhafter Beschreibung oder Zweckentfremdung von für die Simulation nicht anderweitig genutzten Teilen eines Standards und widerspricht somit per se dem Standardisierungsgedanken.

Frühe Arbeiten zur AMG fokussierten auf die Nutzung von CAD-Daten (Lorenz und Schulze 1995), die z. B. in der Initial Graphics Exchange Specification (IGES) vorlagen. Während derartige Formate das Layout zwar sehr gut beschreiben, weisen sie aber erhebliche Schwäche in allen anderen Bereichen, z. B. der Abbildung der Produkte und Arbeitspläne auf. Geeignet zur Abbildung von Produktionsprozessen sind z. B. Formate zur Produktdatenbeschreibung wie der Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP) (vgl. Splanemann 1995). Naturgemäß zeigten diese Formate aber erhebliche Schwächen bei für die Simulation essenziellen Informationen, wie stochastischen Verteilungsfunktionen oder der Abbildung dynamischen Verhaltens.

Das schon ältere Simulation Data Exchange (SDX) Format stellte einen Versuch der Standardisierung eines Formates zum Austausch von Layoutdaten zwischen CAD-Systemen und Simulatoren dar (Moorthy 2006). Der Ansatz basiert dabei auf der Anreicherung von Objekten im CAD-System, sogenannten „smart objects“, um simulationsrelevante Informationen. Hauptkritikpunkt an SDX ist jedoch, dass es sich um einen proprietären Industriestandard der Firma Siemens PLM Software handelt, der zwar durch einige Simulationswerkzeuge unterstützt wird, aber allein auf das Fabriklayout-Werkzeug FactoryCAD als Datenquelle fokussiert. Weitere Schwächen sind in der Abbildung von spezielleren Steuerungslogiken und nicht layoutbezogenen Daten (z. B. Lastdaten, Zustandsdaten) zu sehen.

Den angerissenen Problemen geschuldet, welche bei der Nutzung bestehender Standards auftreten, wurde von der Simulation Interoperability Standards Organization (SISO)

unter Führung des National Institute of Standards and Technology (NIST) eine Initiative gestartet, um ein allgemeingültiges Datenformat zum Austausch von Daten zur Modellgenerierung im Kontext der Produktionssimulation zu schaffen. Dieses sogenannte Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) Information Model stellt eine solide Basis für AMG-Zwecke im Bereich der Produktionssimulation dar und soll im Folgenden exemplarisch als nahezu idealtypisches Datenformat näher diskutiert werden.

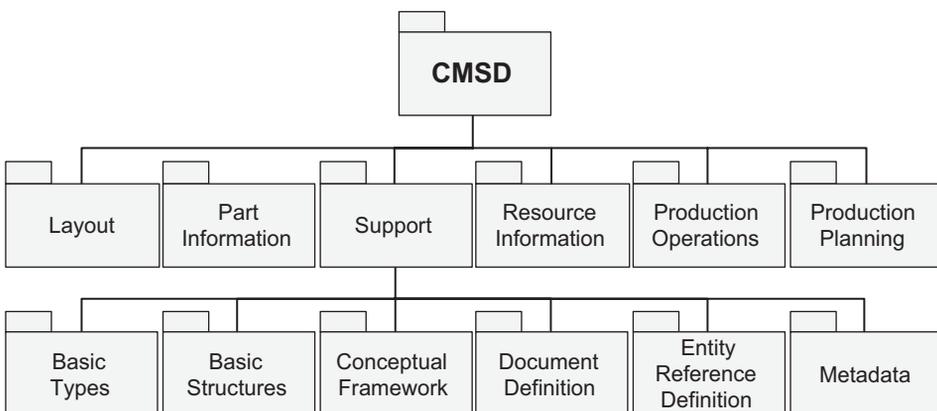
Der CMSD-Standard ist ein offenes, erweiterbares XML-basiertes Datenformat, welches durch die SISO im Jahre 2010 standardisiert wurde. Hierbei wurden von vornherein die Ziele

- Unterstützung bzw. Förderung der Entwicklung und Nutzung von Simulation im produzierenden Gewerbe,
- Erleichterung des Datenaustauschs zwischen Simulation und anderen Anwendungen im Kontext der Fertigung,
- das Ermöglichen bzw. die Verbesserung von Tests und Bewertungen von Software im Fertigungsbereich sowie
- die Verbesserung der Interoperabilität zwischen Simulationsanwendungen und betrieblichen Systemen der Fertigung bzw. zwischen verschiedenen Anwendungen im Kontext der Fertigung, z. B. ERP, MES, CAD, Simulationsumgebungen u. v. m.

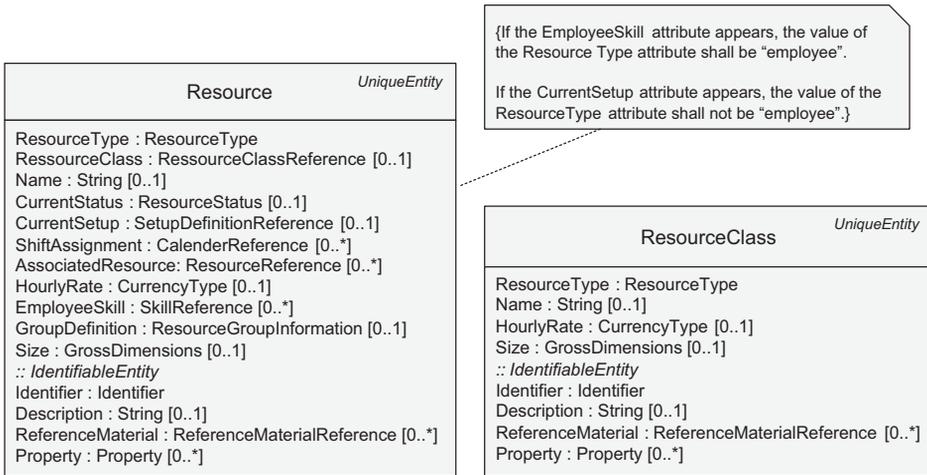
verfolgt (SISO 2010).

Der Standard selbst gliedert sich in zwei Teile: Teil 1 enthält die grafische und ergänzende textuelle Darstellung des Informationsmodells in Form von UML-Klassen- und Paketdiagrammen (SISO 2010), Teil 2 umfasst die auf Basis des ersten Teils erstellten XML-Schemata, welche die einzelnen XML-Datenstrukturen definieren (SISO 2012).

Die in CMSD definierten Entitäten/Klassen sind in 6 Paketen thematisch angeordnet (vgl. Abb. 23.1). Jede Klasse weist ein Vielzahl von Attributen (Beispiel vgl. Abb. 23.2)



**Abb. 23.1** Pakete des CMSD Information Models (nach SISO 2010)



**Abb. 23.2** CMSD-Klassennotation am Beispiel der Resource und ResourceClass Klasse (SISO 2010, S.143)

auf, welche es ermöglicht, ein breites Spektrum von Anwendungsfällen abzudecken. Hierbei wurde vor allem Wert auf die Abbildung simulationsspezifischer Datenstrukturen wie z. B. Verteilungen gelegt. In Summe bietet der CMSD-Standardklassen und -strukturen für alle erdenklichen Arten von Eingangsdaten und ist somit als Datenformat zur strukturierten Extraktion von Daten aus verschiedenen Datenquellen und deren Nutzung in Modellgeneratoren als sehr gut geeignet anzusehen.<sup>1</sup>

Trotzdem bedarf der Standard für die konkrete Anwendung einer Interpretation und ggf. Erweiterungen durch das im Standard dafür vorgesehene „Property“-Konzept. Eine mögliche CMSD-Interpretation wird im folgenden Abschnitt angerissen, nähere Details hierzu finden sich auch in Bergmann (2014).

Nach der Auswahl einer oder mehrerer Datenquellen und dem Festlegen des Datenformates ist der nächste Schritt in der „eigentlichen“ datengetriebenen Simulationsmodellgenerierung zu sehen.

Hierbei hängen die Machbarkeit und der zum Einsatz kommende AMG-Ansatz stark von den Fähigkeiten des verwendeten Simulationswerkzeugs ab. Wünschenswert sind Simulationswerkzeuge mit objektorientierten Modellierungsansätzen, die die Definition von generischen Klassen bzw. Bausteinen erlauben, die dann innerhalb der AMG instanziiert werden können. Ist diese Voraussetzung gegeben, lassen sich zwei prinzipielle Architekturansätze (der „interne“ sowie der „externe“ Ansatz) zur Entwicklung eines Modellgenerators unterscheiden. Beide haben Vor- und Nachteile und stellen einschränkende Randbedingungen an das Werkzeug (Bergmann 2014).

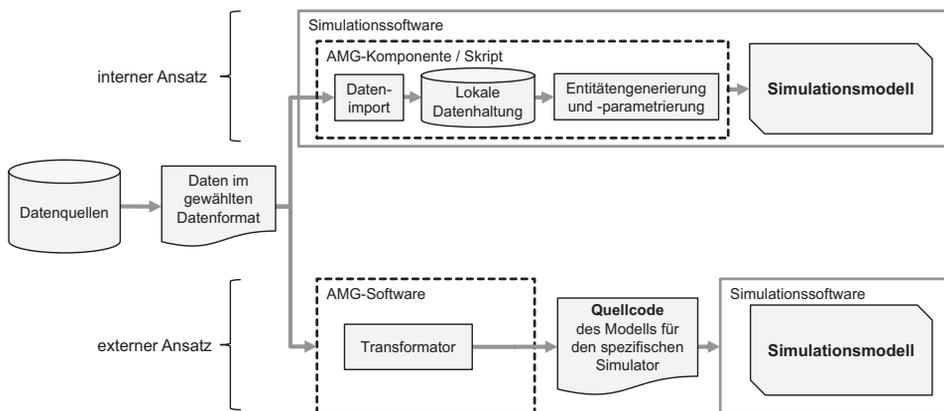
<sup>1</sup>Einschränkend ist anzumerken, dass CMSD kein Format zum Austausch von Geometriedaten ist (Layoutelemente können aber über Koordinaten verortet werden) und keine vollständige Lösung zur Beschreibung von komplexem dynamischem Verhalten bietet.

Im internen Ansatz wird über geeignete, im Simulationswerkzeug ablaufende Skripte aus den Eingangsdaten ein Simulationsmodell erstellt. Dies stellt den „klassischen“ Ansatz der Modellgenerierung dar. Die Grundidee ist, dass im Zuge der internen Modellgenerierung eine im Zielsimulator implementierte Komponente (Skript) o. ä. zum Einsatz kommt, welche die Daten verarbeitet und auf deren Basis entsprechend das Simulationsmodell erzeugt, d. h., die benötigten Entitäten bzw. Modellelemente generiert und parametriert sowie das Modell anschließend ggf. initialisiert und ausführt (vgl. Abb. 23.3 oben). Hierzu muss ein Simulationswerkzeug geeignete Datei- oder Datenbankschnittstellen zum Zugriff auf die Eingangsdaten bereitstellen und konzeptionell erlauben, skriptgesteuert Modellelemente zu erzeugen.

Im externen Ansatz wird der Quellcode des Modells direkt durch ein externes Softwareprodukt erzeugt. Nach der Erzeugung kann ebenfalls die Initialisierung erfolgen, Zusatzfunktionen z. B. zur Ergebnisspeicherung müssen bei der Codeerzeugung entsprechend vorgesehen werden. Der eigentliche Simulationslauf erfolgt im entsprechenden Simulationswerkzeug, dem der erzeugte Quellcode übergeben wird (vgl. Abb. 23.3 unten). Der gesamte Prozess kann hierbei als Transformation von Daten in Quellcode aufgefasst werden. Solche Transformationen werden durch verschiedene Werkzeuge, im Fall von XML-Daten z. B. durch die regelbasierte Transformationsprache eXtensible Stylesheet Language Transformation (XSLT) unterstützt (Bergmann et al. 2012b). Voraussetzung für die Verwendung dieses Ansatzes ist i. A. eine offene und dokumentierte Modellbeschreibungssprache.

Die konkrete Wahl eines Ansatzes ist meist technisch bedingt. Der interne Mechanismus ist üblicherweise für objektorientierte oder bausteinbasierte Simulatoren mit nicht offengelegter Modellbeschreibung zu präferieren. Der externe Ansatz hat sich als gut geeignet für Simulationssprachen bewiesen.

Die konkrete Implementierung des Modellgenerators bleibt für den Anwender im Idealfall weitgehend transparent.



**Abb. 23.3** Der interne versus externe Modellgenerierungsansatz

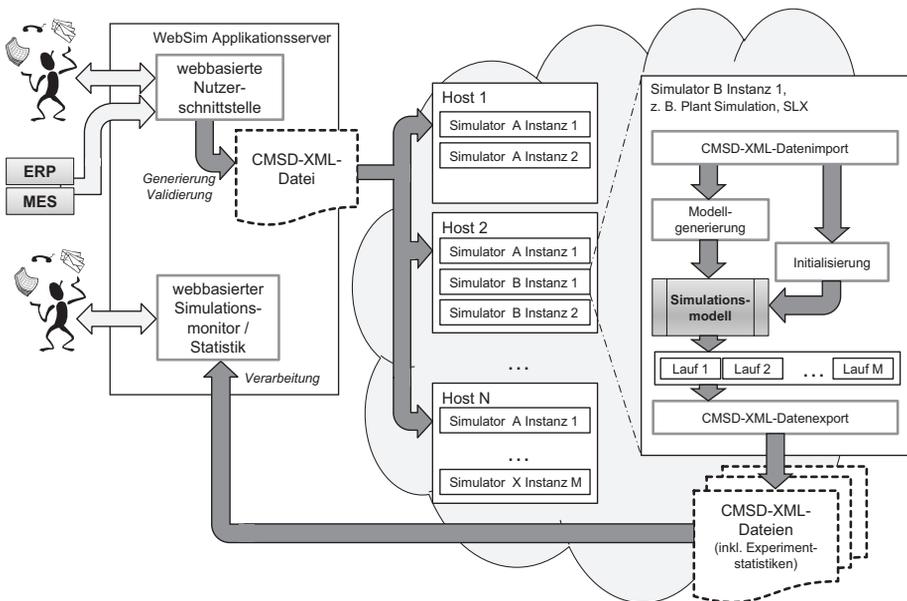
## 23.4 Ein Anwendungsbeispiel – AMG auf Basis des CMSD-Standards

In diesem Abschnitt wird ein Framework vorgestellt, welches CMSD als Datenformat nutzt und sowohl interne als auch externe AMG sowie eine Vielzahl weiterer Phasen/Teilaufgaben, wie z. B. die Initialisierung von Modellen, die Experimentdefinition und -verteilung und die Experimentauswertung, unterstützt. Die grobe Architektur des Frameworks kann Abb. 23.4 entnommen werden, sämtliche Ausführungen basieren auf Bergmann et al. (2012a, b) bzw. Bergmann (2014).

Im hier vorgestellten Framework sind die Bedienoberflächen als reine Webanwendungen realisiert. Dies senkt u. a. den Installationsaufwand beim Endanwender und ermöglicht webbasierte (ggf. cloudbasierte) Simulation. Das Framework unterstützt hierbei prototypisch den gesamten Simulationslebenszyklus von der Datensammlung bis zur Auswertung der Experimente.

Das Web-Frontend nimmt hierbei die zentrale Stelle bei der Steuerung aller Prozesse der AMG ein. So können aus dem Web-Frontend über spezielle Importfunktionen CMSD-Daten aus betrieblichen Informationssystemen, wie z. B. SAP, importiert werden.

Der CMSD-Standard bietet eine Vielzahl von für die AMG potenziell nützlichen Klassen mit definierten spezifischen Attributen, die wichtigsten und hier genutzten sind die folgenden Klassen (Bergmann 2014, S. 94 ff.):



**Abb. 23.4** Architektur eines CMSD-basierten Frameworks zur AMG (Bergmann 2014, S.133)

- *Resource* in Verbindung mit den Klassen *SetupDefinition*, *SetupChangeOver* und *Layout* zur Abbildung von Maschinen- bzw. Anlagendaten (z. B. Name, Rüstzustände, Standort) sowie Puffereigenschaften (z. B. Kapazitäten, Reihenfolgeregeln),
- *Resource* in Verbindung mit der CMSD-Klasse *Skill* zur Abbildung von Werkern und deren Eigenschaften (z. B. Name, Fähigkeiten, Schichtzuordnung),
- *ProcessPlan* und *Process* zur Abbildung von Arbeitsplänen für Produkte inklusive Zeiten und benötigter Rüstzustände an den Maschinen,
- *Calendar* zur Abbildung des Betriebskalenders,
- *Job* zur Darstellung von Aufträgen und deren Parametern (z. B. Art und Menge des Produktes, gewünschtes Fertigstellungsdatum),
- *Event* zur Aufzeichnung von Tracedaten.

Die importierten Daten können im zweiten Schritt im Web-Frontend validiert, auf Vollständigkeit geprüft und ggf. erweitert und korrigiert werden. Alternativ können CMSD-Daten für kleinere Systeme auch vollständig im Web-Frontend über entsprechende Eingabemasken erzeugt werden. Durch Änderung an bestehenden CMSD-Daten können verschiedene Szenarien abgebildet, gespeichert und verwaltet werden. Szenarien erlauben hierbei Variationen an sämtlichen Systementitäten, wie z. B. Regeln, Kapazitäten oder auch Produktionsplänen, und werden als Basis für Experimente genutzt. Ein Replikationsmechanismus des Frameworks erlaubt die Verteilung von Experimenten und Replikationen auf verschiedene Simulatorinstanzen (vgl. Abb. 23.4).

Die Generierung der Modelle basiert allein auf einer CMSD-Datei. Je nach Simulationswerkzeug wird eine interne oder externe Modellgenerierung umgesetzt. Die interne Modellgenerierung nutzt Plant Simulation der Firma Siemens PLM Software. Der externe Ansatz wurde für die Simulationssprache SLX der Firma Wolverine Software mit Hilfe von XSLT, umgesetzt (Bergmann et al. 2012b). Eine Validierung der Ansätze erfolgte durch Vergleich der Modelle beider Ansätze sowie gegen manuell erstellte Modelle. Weiterhin wurde ein Praxistest bei einem Unternehmen der Automobilzulieferindustrie durchgeführt. Neben der eigentlichen Modellgenerierung können aktuelle Zustandsdaten, z. B. Maschinenzustände und angefangene Produktionsprozesse, genutzt werden, um die generierten Modelle vor der Ausführung zu initialisieren.

Im Rahmen der Modellausführungen werden diverse Ereignisse gespeichert und zum definierten Simulationsende zusammen mit dem aktuellen Systemzustand in die CMSD-Beschreibung integriert. Somit existiert eine kompakte Beschreibung der Rohdaten der Simulationsergebnisse, welche an die webbasierte Nutzerschnittstelle zurückgeliefert werden und im sogenannten „WebStatMonitor“ ausgewertet werden können. In diesem lassen sich Kennzahlen einzelner Simulationsläufe und statistische Maße über alle Läufe eines Experiments ermitteln. Diese können entsprechend grafisch visualisiert werden (Bergmann et al. 2012a, b).

Zu bemerken ist, dass die komplette Datenhaltung ausschließlich im CMSD-Datenformat erfolgt, angefangen bei Extraktion der Grunddaten aus betrieblichen Informationssystemen,

z. B. den Arbeitsplänen aus SAP, über die Abbildung der im Web-Frontend vervollständigten Daten, z. B. Ergänzungen bezüglich Steuerungsregeln inklusive der Initialisierungsdaten, bis hin zu den Experimentergebnissen, welche in Form von Ereignislogs/Events (vergleichbar mit BDE-Daten) in CMSD gespeichert werden. Gerade diese komplette Kapslung aller Daten in einer CMSD-Datei ermöglicht eine webbasierte und ggf. parallele/verteilte Ausführung von Experimentläufen in der Cloud sowie das einfache Aggregieren der Ergebnisse als Vorbereitung der Auswertung in einer webbasierten Nutzerschnittstelle. Zusätzlich zu den statischen Auswertungen ist eine nachträgliche ebenfalls webbasierte Animation der Simulationsläufe in 2D möglich (vgl. Bergmann et al. 2014b).

---

## 23.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die automatische Modellgenerierung ist ein erfolgversprechender Ansatz, um dem steigenden Zeit- und Kostendruck, dem sich jede Simulationsstudie stellen muss, zu begegnen. Insbesondere bei einem Vorhandensein von Simulationseingangsdaten in betrieblichen Informationssystemen und bei einem absehbar wiederholten Einsatz von Simulation sollte sich der Praktiker mit Möglichkeit der Automatisierung der Modellerstellung und -initialisierung beschäftigen.

Verschiedene theoretische Ansätze zur Implementierung der AMG wurden in diesem Beitrag untersucht. Die in diversen Veröffentlichungen prognostizierten positiven Effekte der automatischen Modellgenerierung bezogen auf die Aufwände der Simulation konnten durch die prototypische Implementierung bestätigt werden.

Eine Standardisierung der Datenformate, die als Eingangsdaten für eine Modellgenerierung verwendet werden, ist dringend anzunehmen. Hier sind insbesondere die Hersteller von Simulationswerkzeugen in der Pflicht zu sehen. Wie ein geeignetes und standardisiertes Datenformat für Modelle im Bereich der Produktionssimulation aussehen kann, hat die SISO mit dem CMSD-Format vorgelebt. Eine native Unterstützung des CMSD-Formates von einschlägigen Simulationswerkzeugen ist anzustreben.

Ein weiterer Nutzeneffekt einer AMG ist in der verbesserten Automatisierbarkeit weiterer Teilaufgaben/Phasen von Simulationsstudien zu sehen (z. B. Initialisierung und Adaption von Modellen, Experimententwurf und -ausführung).

Nebeneffekt einer rein datengetriebenen AMG ist, dass eine webbasierte oder auch cloudbasierte Simulation ermöglicht wird. Hierbei bleibt der eigentliche Simulator vor dem Endnutzer verborgen. Dies erlaubt nicht nur den Ad-hoc-Wechsel eines Simulationswerkzeugs, sondern eröffnet sogar die Möglichkeit, ohne zusätzliche Aufwände Replikationen eines Experimentes auf verschiedenen Simulatorinstanzen durchzuführen. Hierdurch wird eine optimale Ausnutzung der Ressourcen (inklusive vorhandener Lizenzen von ggf. verschiedenen Simulationswerkzeugen) ermöglicht.

Trotz aller Fortschritte im Bereich der AMG ist jedoch klar zu konstatieren, dass auch weiterhin kein generisches, praxistaugliches Austauschformat für ereignisdiskrete Simulationsmodelle verfügbar ist. Modelle und Modellkomponenten, die in einem Werkzeug manuell implementiert werden, sind auch weiterhin an dieses gebunden. Hier besteht Forschungsbedarf, der sich nicht auf Modellimport und -export beschränkt, sondern auch alternative Lösungsansätze, wie die Kopplung von Simulationsmodellen verschiedener Werkzeuge zur Laufzeit betrachten muss (vgl. Taylor et al. 2012).

Interessant wird weiterhin bleiben, inwiefern sich die AMG allgemein und insbesondere auch der Datenstandard CMSD in der Praxis etablieren wird.

---

## Literatur

- Becker J (1998) Die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung und ihre Einbettung in ein Vorgehensmodell zur Erstellung betrieblicher Informationsmodelle. Fachtagung Modellierung betrieblicher Informationssysteme, Koblenz. <https://www.wi-inf.uni-duisburg-essen.de/MobisPortal/pages/rundbrief/pdf/Beck98.pdf>. Zugegriffen am 30.03.2016
- Bergmann S (2011) Automatische Generierung adaptiver und lernfähiger Modelle. In: Eymann T (Hrsg) Tagungsband zum Doctoral Consortium der WI. Bayreuther Arbeitspapiere zur Wirtschaftsinformatik, Zürich, S 9–16
- Bergmann S (2014) Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen. Dissertation, Technische Universität Ilmenau
- Bergmann S, Strassburger S (2010) Challenges for the automatic generation of simulation models for production systems. In: Society for Computer Simulation International (Hrsg) Proceedings of the 2010 Summer Simulation Multiconference (SummerSim'10). Omni Press, Ottawa, S 545–549
- Bergmann S, Stelzer S, Strassburger S (2011) Initialization of simulation models using CMSD. In: Jain S, Creasey RR, Himmelspach J, White KP, Fu M (Hrsg) Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. IEEE, Piscataway, S 2228–2239
- Bergmann S, Stelzer S, Strassburger S (2012a) A new web based method for distribution of simulation experiments based on the CMSD standard. In: Laroque C, Himmelspach J, Pasupathy R, Rose O, Uhrmacher AM (Hrsg) Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. IEEE, Piscataway, S 3057–3068
- Bergmann S, Stelzer S, Wüstemann S, Strassburger S (2012b) Model generation in SLX using CMSD and XML stylesheet transformations. In: Laroque C, Himmelspach J, Pasupathy R, Rose O, Uhrmacher AM (Hrsg) Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. IEEE, Piscataway, S 3046–3056
- Bergmann S, Stelzer S, Strassburger S (2014a) On the use of artificial neural networks in simulation based manufacturing control. *J Simul* 8:76–90
- Bergmann S, Parzefall F, Straßburger S (2014b) Webbasierte Animation von Simulationsläufen auf Basis des Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) Standards. In: Wittmann J, Deatcu C (Hrsg) Tagungsband des 22. Symposiums der Simulationstechnik – ASIM. ARGESIM/ASIM Pub., Berlin, S 63–70
- Bracht U, Wenzel S, Geckler D (2011) *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*. Springer, Berlin

- Eckardt F (2002) Ein Beitrag zu Theorie und Praxis datengetriebener Modellgeneratoren zur Simulation von Produktionssystemen. Shaker, Aachen
- Fowler JW, Rose O (2004) Grand challenges in modeling and simulation of complex manufacturing systems. *Simulation* 80:469–476
- Jensen S (2007) Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionsdatensystemen am Beispiel einer Job-shop-Fertigung. Dissertation, Universität Kassel
- Johansson M, Johansson B, Skoogh A, Leong S, Riddick F, Lee YT, Shao G, Klingstam P (2007) A test implementation of the core manufacturing simulation data specification. In: Henderson SG, Biller B, Hsieh M-H, Shortle J, Tew JD, Barton RR (Hrsg) *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. IEEE, Piscataway, S 1673–1681
- Kloos O (2013) Generierung von Simulationsmodellen auf der Grundlage von Prozessmodellen – Ein Transformationsmodell Ansatz. Dissertation, Technische Universität Ilmenau
- Lorenz P, Schulze T (1995) Layout based model generation. In: Alexopoulos C, Kang K, Lilegdon WR, Goldsman D (Hrsg) *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*. IEEE, Piscataway, S 728–735
- Moorthy S (2006) Advanced 3D factory design integrated with throughput simulation. In: Manderfield J (Hrsg) *Proceedings of the PLM World 2006*. Long Beach, S 1–44
- Schönherr O, Rose O (2011) A general model description for discrete processes. In: Jain S, Creasey RR, Himmelspach J, White KP, Fu M (Hrsg) *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*. IEEE, Piscataway, S 2206–2218
- Selke C (2005) Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung. Dissertation, Technische Universität München
- SISO (2010) Simulation Interoperability Standards Organization: Standard for Core Manufacturing Simulation Data – UML Model
- SISO (2012) Simulation Interoperability Standards Organization: Standard for Core Manufacturing Simulation Data – XML Representation
- Splanemann R (1995) Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen aus systemneutral definierten Unternehmensdaten. Dissertation, Universität Bremen
- Straßburger S, Seidel H, Schady R, Masik S (2006) Werkzeuge und Trends der digitalen Fabrikplanung – Analyse der Ergebnisse einer Onlinebefragung. In: Wenzel S (Hrsg) *Simulation in Produktion und Logistik 2006*. SCS Publishing House, Erlangen, S 391–402
- Straßburger S, Bergmann S, Müller-Sommer H (2010) Modellgenerierung im Kontext der Digitalen Fabrik – Stand der Technik und Herausforderungen. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 35–42
- Taylor S, Turner S, Straßburger S, Mustafee N (2012) Bridging the gap: a standards-based approach to OR/MS distributed simulation. *ACM Trans Model Comput Simul (TOMACS)* 22:18.1–18.23
- VDI (2014) VDI Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Beuth, Berlin
- Wurdig T, Wacker R (2008) Generische Simulationslösung für Fördertechnik. In: Rabe M (Hrsg) *Advances in simulation for production and logistics applications*. Fraunhofer IRB, Stuttgart, S 11–20



**Dr. Sören Bergmann** Abschluss des Studiums der Wirtschaftsinformatik an der TU Ilmenau 2004. Anschließend Tätigkeit als Berater und Projektleiter insbesondere bei Unternehmen der Energiewirtschaft. 2007–2018 Mitarbeiter am Fachgebiet Wirtschaftsinformatik für Industriebetriebe der TU Ilmenau. Seit August 2018 Mitarbeiter am Fachgebiet Informationstechnik in Produktion und Logistik der TU Ilmenau. 2013 Promotion (Dr. rer. pol.) zum Thema Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen.



**Prof. Dr.-Ing. Steffen Straßburger** Abschlüsse als Dipl.-Inf. (1998) und Dr.-Ing. (2001) der Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg. 2001–2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschung der DaimlerChrysler AG in Ulm. 2003–2007 Abteilungsleiter am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung in Magdeburg. Seit 2007 Universitätsprofessor an der TU Ilmenau und Leiter der Fachgebiete Wirtschaftsinformatik für Industriebetriebe (2007–2018) und Informationstechnik in Produktion und Logistik (seit 08/2018). Seit 2010 stellvertretender Direktor des fakultätsübergreifenden Institutes für Automobil- und Produktionstechnik.



Kristina Sokoll und Matthias Clausing

## 24.1 Einleitung

In der Automobilindustrie ist die Ablaufsimulation ein etabliertes Mittel zur Planung und Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen verschiedenster Art. Die tatsächliche Durchdringung von Planungsanwendungen mit der Methode bleibt jedoch immer noch hinter den Möglichkeiten zurück. Die Ursachen dafür sind vielfältig. So können mangelnde Kenntnisse der Methode Simulation und ihrer Einsatzmöglichkeiten und Potenziale zu Hemmnissen führen. Auch Missverständnisse zwischen Simulationsexperten und Auftraggebern aufgrund von unterschiedlich gebraucht Vokabular und resultierenden Kommunikationslücken sind häufig beobachtbar. Insbesondere bei komplexen Fragestellungen, bei denen sich eine Lösung aus vielen sich wechselseitig beeinflussenden Prozessen ergibt, führt die eingeschränkte Nachvollziehbarkeit von Ergebnissen zu Bedenken und Skepsis (März et al. 2011, S. 5).

Eine Herausforderung bei der Durchführung einer Simulationsstudie liegt in der Beschaffung von Informationen und Daten in der erforderlichen Qualität. Die Anforderungen übersteigen oftmals die vorhandenen Datenbestände im Unternehmen im Hinblick auf Verfügbarkeit, Vollständigkeit und Konsistenz. Es ist jedoch in den vergangenen Jahren durchaus ein Trend zu mehr Datendetaillierung und -vernetzung zwischen unterschiedlichen Produkt- und Produktionsplanungsphasen sowie den dort zum Einsatz kommenden IT-Systemen erkennbar. Aufgrund zunehmend komplexer Fertigungsabläufe, unter anderem bedingt durch die steigende Anzahl an Modellen, durch die neuartige Kombination verschiedener Fertigungstechniken oder auch neue Anforderungen an die Planung, wie z. B. die Berücksichtigung der Energieeffizienz, steigt bei gleichzeitig kürzer werdenden

---

K. Sokoll (✉) · M. Clausing  
AUDI AG, Ingolstadt, Deutschland  
E-Mail: [kristina.sokoll@audi.de](mailto:kristina.sokoll@audi.de); [matthias.clausing@audi.de](mailto:matthias.clausing@audi.de)

Projektzyklen das Arbeitsvolumen für einen Planungsbeauftragten enorm. Das alles kann zur Folge haben, dass die Durchführung einer Simulationsstudie trotz bekannter Potenziale als zusätzliche Last gesehen und auf sie verzichtet wird.

Vor diesem Hintergrund sind die Ergebnisse einer im VDA (Verband der Automobilindustrie) durchgeführten Umfrage interessant. Sie haben gezeigt, dass der erforderliche Zeitraum vom Projektstart bis zur Ergebnisgenerierung mit dem validierten Modell als zu hoch eingeschätzt wird (Huber und Wenzel 2011). Von den befragten Simulationsexperten wurde außerdem angegeben, dass ein Großteil der Arbeitsaufwände auf die Modellerstellung sowie die Datenbeschaffung und -aufbereitung entfällt. Eine Möglichkeit, um diese Aufwände zu reduzieren und damit den Einsatz der Ablaufsimulation zu erleichtern, besteht in der Entwicklung von Methoden und Werkzeugen der Simulationsassistenz.

Auf den folgenden Seiten sollen typische Herausforderungen bei der Durchführung eines Simulationsprojektes und deren Bewältigungsmöglichkeiten beleuchtet werden. Dabei wird sich grundlegend am ASIM-Vorgehensmodell orientiert, welches in einer abgeleiteten Form im Volkswagen Konzern Anwendung findet. Für jede dort vorgesehene Phase werden Beispiele erläutert, bei denen der Einsatz von Simulationsassistenz sinnvoll sein kann und eine Auswahl möglicher Lösungsansätze vorgestellt. Dabei handelt es sich sowohl um allgemein gehaltene Vorgehensweisen als auch bereits in der Praxis eingesetzte Assistenztools, die oftmals für oder innerhalb des in der Automobilindustrie verbreitet eingesetzten Simulationswerkzeuges Plant Simulation entwickelt wurden. Abschließend wird sich ein Abschnitt mit der phasenübergreifenden Dokumentation befassen. Sie hat einen sehr großen Einfluss auf die Interpretierbarkeit und Wiederverwendbarkeit eines Modells und seiner Ergebnisse. Durch eine strukturierte, projektbegleitende Dokumentation werden die Projektqualität verbessert und zukünftige Aufwände verringert.

---

## 24.2 Systemanalyse sowie Datenbeschaffung und -analyse

Nach der Bestätigung eines Projektvorhabens durch eine Simulationswürdigkeitsprüfung sollte jedes Projekt mit einer Zieldefinition beginnen. Dabei formulieren Auftraggeber und Entwickler gemeinsam, welche Ziele mit der Simulation verfolgt und welche Fragestellungen beantwortet werden sollen. Daraufhin ist eine Analyse des abzubildenden Systems durchzuführen, um grundlegende Prozesse und ihre Relevanz einzuordnen, sowie wesentliche Einflussgrößen zu identifizieren. Für diese sind im Anschluss Real- oder Planungsdaten zu beschaffen und zu verarbeiten.

### 24.2.1 Prozesskettendiagramme für die Systemanalyse

Komplexe Systeme beinhalten zahlreiche synchrone und asynchrone Prozesse, die ineinander verschachtelt sein können und sich gegenseitig beeinflussen. Es gibt zahlreiche

Parameter, die Einfluss auf diese Prozesse nehmen und in verschiedenen Ablaufvarianten resultieren. Die Dokumentation muss also nicht nur die strukturierte Beschreibung der relevanten Abläufe enthalten, sondern auch die einflussnehmenden Parameter sowie die für die Erfüllung der Zielsetzung erforderlichen Kennzahlen zur Bewertung des Ergebnisses. Darüber hinaus ist es ebenfalls entscheidend, die zu modellierenden Systemvarianten zu erfassen, um sie bei der Implementierung berücksichtigen zu können. Eine ausführliche Systemanalyse ist für den Modellentwickler eine solide Grundlage für die Entwicklungsarbeit.

Die Dokumentation eines Systems in einer ausreichend genauen Detaillierung ist häufig nicht vorhanden oder erfüllt nicht die Anforderungen an Umfang und Qualität. Allein die unterschiedliche Verwendung von Begrifflichkeiten zwischen den beteiligten Projektpartnern kann zu grundlegenden Missverständnissen führen und damit auch zu Fehlern in der Modellierung und letztlich möglicherweise im Simulationsergebnis. Eine unzureichende oder fehlerhafte Systemanalyse zu Beginn eines Simulationsprojektes kann weitreichende Konsequenzen haben. Je später ein Fehler in der Prozessbeschreibung oder das Fehlen einer zu implementierenden Systemvariante entdeckt wird, desto aufwändiger und damit kostenintensiver ist die Korrektur (Rabe et al. 2008, S. 2). Dies gilt auch für die Parameteridentifikation. Sowohl eine zusätzliche Datensammlung und -analyse als auch eine nachträgliche Anpassung des Simulationsmodells können mit hohem Aufwand verbunden sein.

Bei der Simulation von Produktions- und Logistikprozessen kommt fast ausschließlich die diskrete ereignisorientierte Simulation zum Einsatz (März et al. 2011, S. 14). Dabei werden Modelle entwickelt, bei denen sich der Systemzustand zu diskreten Zeitpunkten ändert. Diese Änderungen werden durch den Eintritt von Ereignissen ausgelöst. Daher bietet sich für eine ausführliche Systemanalyse und die übersichtliche Dokumentation die Verwendung von Verfahrensweisen zur Systemanalyse an, deren Schwerpunkt ebenfalls auf der Abbildung von Ereignissen und auf den Abläufen liegt, die diese Ereignisse auslösen. Prozessmodellierungsparadigmen, welche diese Eigenschaft erfüllen, sind u. a. die Vorgangskettendiagramme, die EPK (Ereignisgesteuerte Prozesskette) oder auch die eEPK (erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette). Letztere ergänzt die EPK unter anderem um Elemente zur Abbildung von Funktionszuordnungen und auch von Daten oder Datenflüssen. Bei einer automatisierten Verarbeitung der Informationen aus dem Prozessmodell, z. B. über eine Schnittstelle zwischen Prozessmodellierungs- und Simulationswerkzeug, kann der Transfer vom Diagramm zum ausführbaren Modell vereinfacht und der Aufwand für den Simulationsingenieur verringert werden.

Je komplexer das System ist, desto mehr sollte auf eine gemeinsame und verbindliche Prozessanalyse und -dokumentation geachtet werden. Nur so können die zu modellierenden Logiken sauber in die Syntax der Simulationssoftware übertragen werden. Die Dokumentation erhöht gleichzeitig die Lesbarkeit der Implementierung und erleichtert die Validierung und Verifikation. In einer eEPK können auch die Daten festgehalten werden, die als relevant erachtet werden und für die eine Datenerhebung erforderlich ist.

### 24.2.2 Zentrale Datenbasis für Simulationen

Auch wenn die Datenquellen und -strukturen vielfältig und oft projektspezifisch sind, gibt es dennoch Informationen, die für zahlreiche Simulationsprojekte – auch unternehmensübergreifend – immer wieder von Bedeutung sind. Indem diese Informationen zentral zugänglich gemacht werden, wird das grundsätzliche Problem der Datenverfügbarkeit gemindert.

Ein Anwendungsfall ist die Strukturplanung eines Karosseriebaus, bei der die Fertigungsanlagen und deren Entkopplung ausgeplant werden. Maßgeblich hierbei sind die Verfügbarkeiten der technischen Ressourcen, wie Roboter, Haltevorrichtungen oder Fördererelemente. Für die Gesamtverfügbarkeit gleichartiger Roboterzellen, einem Verbund aus mehreren Robotern und Vorrichtungen in einem Schutzkreis, gibt es häufig keine realen Messdaten. Aber sie ergibt sich unter gewissen Voraussetzungen aus den technischen Einzelverfügbarkeiten jeder Ressource in der Zelle. Diese Einzelverfügbarkeiten variieren in Abhängigkeit von Hersteller, Typ und Ausstattungsmerkmalen, sind aber unabhängig von der Struktur der Roboterzelle. Auch wenn die Kombinationen innerhalb eines Schutzkreises vielfältig sind, so liegen doch immer dieselben Einzelverfügbarkeiten zugrunde.

Damit diese Daten nicht für jedes Projekt neu beschafft werden müssen, kann eine zentrale Datenbank die erforderliche technische Unterstützung bieten. Im Volkswagen Konzern kommt dafür die VDB (Verfügbarkeitsdatenbank) zum Einsatz, die für alle Simulationsexperten zur Verfügung steht. Sie berechnet die Gesamtverfügbarkeit von Roboterzellen anhand einer umfassenden Bibliothek mit Betriebsmitteln, deren Einzelverfügbarkeiten sowie einem Mengengerüst für jede Zelle. Darüber hinaus bietet die VDB eine Schnittstelle zu dem im Konzern eingesetzten Simulationstool, welche eine Übertragung der Verfügbarkeiten auf die im Modell verwendeten Bausteine ermöglicht. Bei einer Änderung der zugrunde liegenden Struktur der Roboterzelle kann ein Update der für die Simulation verwendeten Parameter über diese Schnittstelle einfach und schnell erfolgen. Durch die Automatisierung dieses Vorganges verringern sich die Fehleranfälligkeit der Parametrierung und der Aufwand für die Modellpflege im Verlauf des Planungsprojektes.

### 24.2.3 Automatische Datenkonsolidierung

Im Umgang mit den Daten für Modellentwicklung sowie Verifikation und Validierung ist oftmals eine unzureichende Sensibilität zu beobachten. Der erforderliche Datenumfang und die Anforderungen an die Qualität werden unterschätzt, insbesondere wenn die Ablaufsimulation zum ersten Mal zum Einsatz kommt. Oftmals ergeben sich Probleme dadurch, dass die Daten aus unterschiedlichen IT-Systemen zu beziehen sind. Bei der Konsolidierung der Informationen, die in vielen Fällen manuell erfolgt, kommt es zu Fehlern, die im Nachhinein schwer aufzudecken und zu korrigieren sind.

Bei der AUDI AG ist eine unternehmensinterne Entwicklung im Einsatz, welche die Verwendung verschiedener Datenquellen für den Import in das Simulationsmodell

vereinfacht. Da die häufigsten Fehler bereits bei der Konsolidierung dieser Quellen entstehen, ist es sinnvoll, direkt an diesem Punkt anzusetzen. Es wurde eine Anwendung implementiert, die es ermöglicht, mehrere Datenquellen zu öffnen und aus ihnen die jeweils relevanten Informationen zu kopieren, um diese in einer neuen Datendatei zusammenzufassen. Diese Datei kann dann direkt für den Import in die Simulationssoftware verwendet werden. Durch die automatische Datenkonsolidierung entfällt der Aufwand für das manuelle Kopieren und anwenderseitige Fehler werden vermieden. Gleichzeitig kann eine Prüfung der Daten auf Vollständigkeit, Konsistenz und Korrektheit vorgenommen werden. Viele der so identifizierten Fehler werden oftmals erst dann sichtbar, wenn die Daten miteinander kombiniert werden. Die Automatisierung bietet darüber hinaus die Möglichkeit, den Datensatz mithilfe vordefinierter Informationen zu vervollständigen oder für die Anforderungen der Simulationssoftware anzupassen, indem Daten beispielsweise umformatiert oder umgerechnet werden.

Die aufgedeckten Datenlücken und -inkonsistenzen werden bei der Konsolidierung durch das Tool hervorgehoben und mit einem entsprechenden Fehlertext versehen. Mit diesen zusätzlichen Informationen kann das Ergebnis der Konsolidierung und Analyse an die jeweiligen Datenverantwortlichen zurückgegeben werden, um die Quellen zu überprüfen und gegebenenfalls korrigieren zu können. Es hat sich gezeigt, dass diese zurzeit durch den Simulationsingenieur ausgeführte Anwendung häufig die einzige Möglichkeit für den Fachbereich darstellt, die ursprünglichen Daten automatisiert zu kontrollieren. Nach einer weiteren Testphase mit dem Einsatz in verschiedenen Projekten ist angedacht, diese Anwendung direkt den Datenverantwortlichen zu übergeben, sodass die Datenhoheit wieder vollständig beim Fachbereich liegt.

---

### 24.3 Modellformalisierung und Implementierung

Für die Modellformalisierung gibt es vielfältige Möglichkeiten. Das Ergebnis der Formalisierung sollte eine systemunabhängige Beschreibung des zu implementierenden Simulationsmodells einschließlich Steuerungslogik und erforderlicher Datenstrukturen sein (Wenzel et al. 2008, S. 28–29). Dazu eignen sich u. a. stochastische Petri-Netze oder die in Abschn. 24.2.1 erwähnten Prozesskettendiagramme. Die Implementierung überführt das formale Modell in ein ausführbares Modell im festgelegten Simulationswerkzeug. In der Praxis ist häufig zu beobachten, dass die Phase der Formalisierung mit der Phase der Systemanalyse gleichgesetzt und auf die Dokumentation eines vollständigen formalen Modells verzichtet wird. Weil darüber hinaus gerade die Implementierung für gewöhnlich den größten Teil der Entwicklungsarbeit ausmacht, werden im Folgenden ausschließlich Assistenzmethoden für die Modellimplementierung vorgestellt. Die Verwendung von Standards, wie z. B. Bausteinbibliotheken für die einfache Modellierung wiederkehrender Bestandteile, ist grundsätzlich ebenfalls als Simulationsassistenz zu verstehen. Auf diesen Aspekt soll hier aber nicht weiter eingegangen werden.

Aufgrund der steigenden Komplexität der Prozesse und deren vielfache Modifikation während der Planung ist eine manuelle Modellimplementierung und -aktualisierung oftmals sehr aufwändig. In Abhängigkeit des Anwendungsfalls können ganz unterschiedliche Abschnitte der Modellentwicklung mit besonders hohem Aufwand verbunden sein. Häufige simulationsrelevante Änderungen in dem jeweiligen Bereich führen dann dazu, dass die Kosten für die Implementierung signifikant steigen. Immer dann, wenn sich durch die Anpassung der zur Verfügung gestellten Informationen ein großer Teil der Modellstruktur ändert, seien es Objekte oder Logiken, kann der Aufwand für die Entwicklung einer AMG (automatischen Modellgenerierung) zeit- und kostengünstiger sein als die wiederholte Anpassung des Simulationsmodells. Dabei ist der Nutzen einer AMG gegenüber den Kosten für Konzeption und Implementierung sorgfältig abzuwägen. Im Folgenden sollen Assistenzwerkzeuge vorgestellt werden, die den spezifischen Anforderungen unterschiedlicher Anwendungsfälle Rechnung tragen und die entweder vollständig lauffähige Modelle oder aber Teile eines Modells erzeugen.

### **24.3.1 Automatische Modellgenerierung für Taktzeitdiagramme**

Die Detailplanung der Arbeitsfolgen robotergesteuerter Fertigungsanlagen im Karosseriebau erfolgte im hier vorgestellten Anwendungsfall ausschließlich auf statischer Basis mithilfe von Ablaufplänen und unter Berücksichtigung der Ressourcenverfügbarkeiten sowie deren mathematischer Kombination zu einer Gesamtverfügbarkeit analog der in Abschn. 24.2.2 beschriebenen Berechnungsmechanismen der VDB. Da die Komplexität der Anlagen stetig steigt, der verfügbare Platz für die Installationen jedoch zugleich sinkt, kommt es vermehrt zu ausgeprägten Wechselwirkungen zwischen den Ressourcen einer Roboterzelle, was ein erhöhtes Risiko für gegenseitige Aussperrungen zur Folge hat (Dammasch et al. 2010). Im Resultat kann die reale Gesamtverfügbarkeit der Zelle deutlich unter dem auf Basis der Einzelverfügbarkeiten berechneten Wert liegen. Das endgültige Ausmaß zeigt sich erst während der Inbetriebnahmephase, weshalb eine simulative Prüfung der Prozesse beschlossen wurde. Da die zugrunde liegenden Taktzeitdiagramme sehr umfangreich sind und während der Planungsphase häufigen Modifikationen unterliegen, wurde die manuelle Entwicklung und Pflege eines Simulationsmodells als zu aufwändig eingeschätzt.

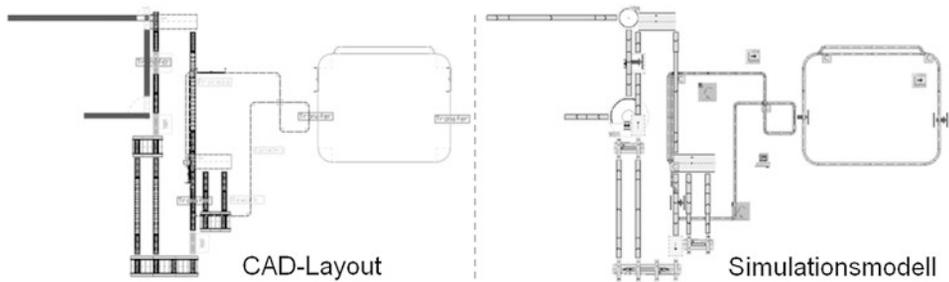
Aus diesen Gründen wurde eine AMG entwickelt, die es ermöglicht, auf Basis des Taktzeitdiagrammes aus dem Simulator heraus ein lauffähiges Simulationsmodell zu erzeugen, welches die Anforderung an Detaillierungsgrad sowie Beobachtbarkeit von Verriegelungen und Abhängigkeiten erfüllt. Für jeden Prozessschritt wird durch die AMG ein Objekt im Modell erzeugt und mit Dauer und Verfügbarkeit parametrisiert. In Abhängigkeit der im Taktzeitdiagramm definierten Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen können die Prozessobjekte automatisch miteinander verbunden werden und ergeben so ein simulationsfähiges Ablaufdiagramm der Arbeitsfolgen. Das entwickelte Modell bildet dabei einen Container, der nicht nur die Methoden für den Import und die Verarbeitung des

Taktzeitdiagrammes enthält, sondern auch die Steuerungen zur korrekten Abarbeitung der Arbeitsfolgen. Dies ist möglich, da die Abarbeitungslogik für das Diagramm unabhängig vom Prozess stets dieselbe ist. So kann die Modelldatei ohne Anpassungen weitergegeben und beliebig mit einem Prozessabbild gefüllt werden. Bei einer entsprechenden Aufbereitung der Eingabedaten sind keine Modellierungskenntnisse erforderlich, um das Simulationsmodell zu generieren. Das ermöglicht dem Prozessplaner während der Entwicklung des Taktzeitdiagrammes, weitestgehend eigenständig verschiedene Prozessabläufe und Wechselwirkungen zu untersuchen. Die Prüfung des Modells und die statistische Auswertung der Prozessleistung sollten jedoch durch einen Simulationsexperten erfolgen oder begleitet werden.

### 24.3.2 Automatische Generierung von Layoutstrukturen

Im Gegensatz zum vorangegangenen Lösungsansatz, bei dem vollautomatisch ein funktionsfähiges Simulationsmodell erzeugt werden kann, ist dies in einem Großteil der Anwendungsfälle nicht möglich, da die abzubildenden Steuerungen komplexer oder im Quellsystem nicht hinterlegt sind. Das gilt auch für den Einsatz der Ablaufsimulation im Rahmen der Fördertechnikplanung. Hier ist ein layoutgetreues Modell zu implementieren, bei dem jedes Fördertechnikelement durch einen Materialflussbaustein abgebildet wird. Ist die Anzahl der Elemente sehr groß, führt das zu einem hohen manuellen Aufwand für die Entwicklung, da viele – nicht selten mehrere hundert – einzelne Bausteine positioniert und parametrisiert werden müssen. In diesem Anwendungsgebiet nimmt die layoutgetreue Abbildung der Fertigungsstruktur mit Rollenbahnen, Drehtischen, Hebern etc. den größten Teil der Arbeit ein. Eine Änderung dieser Struktur hat entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. Die Logiken zur Steuerung des Materialflusses über die Elemente sind hingegen vergleichsweise einfach und in der grundlegenden Funktionsweise ähnlich. Insbesondere wenn vordefinierte Bausteine für die Abbildung der unterschiedlichen Förderelemente und deren Steuerungsprinzipien zur Verfügung stehen, ist der zusätzliche Programmieraufwand für die meisten Fördertechnikelemente gering.

Eine gute Grundlage für die Simulation bildet ein digitales Hallen- und Anlagenlayout des Fördertechniksystems, welches in der Regel im Laufe der Planung in einer CAD-Software erstellt wird. Mithilfe einer Schnittstelle zwischen dieser Software und einem Simulationswerkzeug ist es möglich, die benötigten Daten über Fördertechnikelemente und ihre Eigenschaften zu übertragen, um eine automatische Generierung der Materialflussstruktur in einem Modell zu ermöglichen. Da die Regeln zur Steuerung des Materialflusses über die Fördertechnik für gewöhnlich im CAD-Layout nicht zur Verfügung stehen, können sie dementsprechend nicht mit übertragen werden. Die Modellierung dieser Logiken bleibt im Verantwortungsbereich des Simulationsingenieurs. Eine solche Schnittstelle erlaubt darüber hinaus Layoutupdates unter Beibehaltung von Modellanpassungen und -erweiterungen.



**Abb. 24.1** Vergleich zwischen CAD-Layout und dem über GSL-FT generierten Modell

Ein bereits im Einsatz befindliches Beispiel ist GSL-FT (Generische Simulationslösung Fördertechnik) als Teil des VDA Automotive Bausteinkastens. Sie ermöglicht den Export von Strukturinformationen aus der CAD-Software MicroStation sowie deren Import in Plant Simulation. Übertragen werden dabei nicht nur die Fördertechnikelemente und deren Position, Orientierung und Maße, sondern auch verschiedene weiterführende Eigenschaften wie z. B. Fördergeschwindigkeit, Beschleunigung oder Stauverhalten. Eine Gegenüberstellung eines CAD-Layouts und der daraus resultierenden, sehr ähnlichen Materialflussstruktur im Simulator ist in Abb. 24.1 dargestellt.

Neben der automatischen Generierung von Fördertechnik gibt es vergleichbare und auf denselben Prinzipien beruhende Assistenztools, welche die automatische Generierung von Wegenetzen und deren Parametrierung ermöglichen. Interessant ist das vor allem für Verkehrs- oder Logistiksimulationen, bei denen in Abhängigkeit von der Fragestellung oftmals auf eine maßstabsgetreue Abbildung von Straßen und den sich darauf bewegendem Transportressourcen Wert gelegt wird. Dazu gehört auch das Identifizieren von Kreuzungsbereichen im CAD-Layout und deren Abbildung im Simulationsmodell nach festgelegten Regeln. Obwohl durch diese Generierungsmechanismen lediglich der im Vergleich kleinere Teil des Modells automatisch generiert werden kann, stellt eine solche Schnittstelle eine sinnvolle und hilfreiche Unterstützung für den Implementierungsprozess dar.

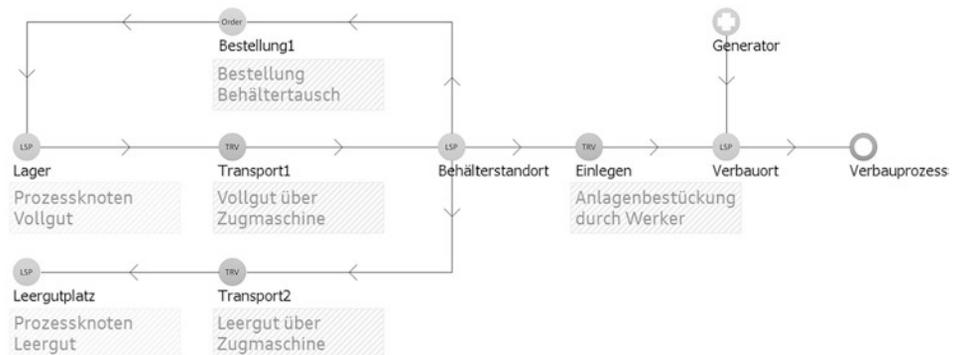
### 24.3.3 Automatische Generierung von Prozessinformationen

Im Vergleich zur Fördertechnikplanung ist die Sensitivität einer Logistikplanung gegenüber Umgestaltungen des Layouts geringer. Stattdessen wird das Ergebnis maßgeblich von den Abläufen in der Logistikkette bestimmt, also der Steuerung der einzelnen Transporte von einem Quell- zu einem Zielort. Die Umsetzung dieser Prozessbeschreibung im Simulationsmodell ist für gewöhnlich sehr aufwändig und weniger standardisiert. Änderungen von Steuerungen, Regeln und Logiken ziehen oft umfangreiche Anpassungen der Quellcodes nach sich. Aus diesem Grund liegt es nahe, auch für diese Umfänge Assistenztools zu entwickeln und einzusetzen.

Das im Folgenden beschriebene Vorgehen entspricht grundsätzlich der Vorgehensweise für die AMG zur Strukturgenerierung: Sofern technisch realisierbar, wird eine Schnittstelle zwischen der bereits für die Prozessplanung existierenden Software und dem Simulator geschaffen. So sind keine zusätzlichen Arbeiten für den planenden Fachbereich erforderlich. Analog zu GSL-FT wurde im VDA die GSL-L (Generische Simulationslösung Logistik) entwickelt, welche den Export von Informationen aus dem Logistikplanungstool MALAGA und deren Import in Plant Simulation anbietet. Über diese Schnittstelle werden zwei Datenpakete übertragen. Das erste Paket umfasst Strukturinformationen bzgl. des Straßennetzes sowie die Position von Haltepunkten innerhalb des Systems. Das zweite Paket beinhaltet die für den Betrieb des Modells notwendigen Prozessinformationen. Dabei werden durchzuführende Transporte vordefinierten Transporttypen (z. B. Stapler- oder Routenzugtransporten) zugeordnet. Für diese Transporttypen stehen im Simulationswerkzeug vorimplementierte Steuerungen zur Verfügung. Gemeinsam enthalten beide Pakete alle Informationen, um automatisch ein lauffähiges Modell zu erzeugen. Experimente und die Weiterentwicklung des Modells erfolgen dann analog zu einem manuell erstellten Modell durch den Simulationsexperten in Abstimmung mit der Fachabteilung.

Nicht immer kommt jedoch für die Planung von Logistikketten eine speziell dafür ausgelegte Software zum Einsatz. Für diese Fälle ermöglicht der Prozessgenerator im Modul Logistik aus dem VDA Automotive Bausteinkasten eine teilautomatische Generierung von Prozessinformationen. Grundlage ist eine grafische Modellierung der Transportarten in Plant Simulation. Ein Beispiel für ein solches Konzeptmodell ist in Abb. 24.2 dargestellt. Es enthält Prozessknotenpunkte (LSP), Transportvarianten (TRV) und Lieferaufträge (Order), die mit Kanten verbunden sind. Darüber hinaus gibt es einen Verbauprozess, der den Lieferbedarf erzeugt, sowie einen Generator als Taktgeber. Im Beispiel werden von einem Mitarbeiter Teile aus einem Behälter in eine Anlage eingelegt. Ist der Behälter geleert, wird der Leergut-Vollgut-Tausch durch eine Zugmaschine beauftragt.

Im Prozessgenerator können alle Prozessabläufe einfach grafisch modelliert werden. Die Informationen über die so angelegten Transporte werden in die Modellstrukturen übertragen und füllen zentrale Tabellen.



**Abb. 24.2** Mit dem Prozessgenerator erstelltes Konzeptmodell eines Logistikprozesses

## 24.4 Experimente und Analyse

Das Ziel der Experimentphase ist es, die zu Beginn der Simulationsstudie definierten Fragestellungen zu beantworten, indem die durch die Experimente generierten Daten analysiert werden. So sollen Erkenntnisse über Leistung und Verhalten des untersuchten Systems unter verschiedenen Bedingungen gewonnen oder verschiedene Systemalternativen miteinander verglichen werden (Banks et al. 2005, S. 383). Abschließend sind die quantitativen Ergebnisse zu interpretieren, um Erkenntnisse daraus zu gewinnen und diese auf das abgebildete System zu übertragen.

### 24.4.1 Erfassung von Statuspunktmeldungen im Simulationsmodell

Die Grundlage für ein Experimentergebnis, welches die Anforderungen des Auftraggebers erfüllt, ist eine saubere Zieldefinition und Systemanalyse. So kann sichergestellt werden, dass im Modell auch die Ausgabeparameter erfasst werden, die für die Beantwortung der definierten Fragestellungen benötigt werden. Jedoch macht die steigende Komplexität der untersuchten Systeme eine vollständige Definition der für die Bewertung des Systems zu erfassenden Kennzahlen zunehmend schwieriger. Bewertung und Interpretation einzelner Parameter können Fragen über andere Systemkomponenten zur Folge haben, die für die Erfassung ursprünglich nicht vorgesehen wurden.

Aus der Automobilherstellung ist das Konzept von Statuspunkten bekannt. Dabei lösen Fahrzeugkarossen an bestimmten Stellen im Fertigungsprozess Meldungen an ein übergeordnetes IT-System aus. In diesem werden die Meldungen, bestehend aus Zeitstempel, Karossen-ID, Meldepunkt sowie verschiedenen Karosseeigenschaften, gesammelt. Eine solche Datenbasis kann den Zustand einer Fabrik oder eines Fertigungsabschnittes zu beliebigen Zeitpunkten beschreiben. Um im Simulationsmodell die Wahrscheinlichkeit für eine nachträglich erforderliche Datenerfassung zu verringern, kann das Konzept der Statuspunktmeldungen auf die Simulation übertragen werden.

Dazu wurde ein Baustein für Plant Simulation entwickelt, der in ein Modell eingesetzt werden kann, um dort das Auslösen von Statuspunktmeldungen durch die beweglichen Elemente zu steuern. An welchen Positionen die Meldungen erfolgen und welchen Inhalt sie haben ist konfigurierbar. Die Daten werden während des Simulationslaufes gesammelt und am Ende für eine Weiterverwendung zur Verfügung gestellt. Die Verarbeitung kann in einer Datenverarbeitungssoftware erfolgen, um z. B. grundlegende Aussagen zum Durchsatz oder auch zu Durchlaufzeit und Füllstand zwischen zwei Meldepunkten zu erhalten. Weiterführende Auswertungen können, analog der in der Realität erfolgenden Analysen, Erkenntnisse z. B. über die Farbblockgröße in der Lackiererei oder auch Kennzahlen zur Sequenzstabilität der Fahrzeugaufträge liefern.

So steht schon bei der Modellbetriebnahme eine Vielzahl von Informationen bzgl. des Systemverhaltens zur Verfügung, ohne dass eine umfangreiche Integration von Statistikfunktionen erforderlich ist. Die Verwendung von Statuspunkten im Modell verbessert in vielen Fällen die Reaktionszeit bei sich kurzfristig ergebenden Fragen im

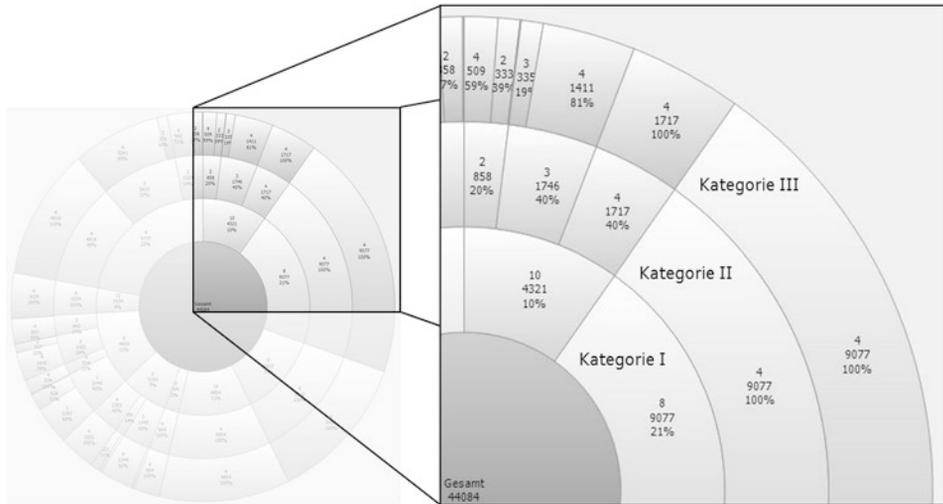
Projektablauf, da keine Wiederholung von Simulationsläufen erforderlich ist. Sofern eine Assistenzsoftware für die Datenauswertung verwendet wird, ist auch eine manuelle Analyse der Datensätze nicht mehr erforderlich. Ein Beispiel für ein solches Tool ist SimAssist, welches im folgenden Abschn. 24.4.2 näher erläutert wird. Für diese Software steht ein sogenanntes Plug-In zur Verfügung, mit dem die generierten Statuspunktmeldungen importiert, im Detail ausgewertet und Ergebnisse visualisiert werden können.

### 24.4.2 Die Assistenzsoftware SimAssist

Bei detaillierten und komplexen Modellen können im Laufe eines Experiments oder einer Experimentserie große Datenmengen anfallen. Bei stochastischen Einflussgrößen sind mehrere Replikationen desselben Experimentes erforderlich, die statistisch ausgewertet werden müssen. Dies erhöht den Datenumfang und somit den Aufwand für die Analyse zusätzlich. Eine manuelle Datenauswertung, z. B. in Microsoft Excel, ist selbst bei der Verwendung vordefinierter Statistikfunktionen nicht nur zeitaufwändig, sondern auch fehleranfällig. Dabei lassen sich mathematische Auswertungsprozesse sehr gut automatisieren. Eine Unterstützung bietet dabei Microsoft Excel selbst, indem dort über Makros die gewünschten Funktionsumfänge zusammengefasst ausgeführt werden können. Auch wenn die erforderliche Rechenleistung für eine Auswertung durch ein Makro nicht verringert werden kann, so lassen sich so doch selbst komplexe Ergebnisanalysen einfach durchführen. Darüber hinaus bleibt die beschränkte Visualisierbarkeit in Excel oftmals hinter den Anforderungen an eine intuitive und informative Ergebnisdarstellung zurück.

In den in der Automobilindustrie gebräuchlichsten Simulationstools sind für einzelne Zielgrößen automatische Statistikanalysen möglich. Für die Auswertung umfangreicher Kennzahlmengen sind diese Funktionen unzureichend, vor allem dann, wenn die Informationen zueinander in Beziehung gesetzt werden müssen. Insbesondere bei Systemen, in denen viele unterschiedliche Prozesselemente zu betrachten sind, wie es beispielsweise oft bei Logistikplanungen der Fall ist, besteht die Herausforderung darin, aus der Vielzahl von Informationen über einzelne Elemente Rückschlüsse auf das Gesamtsystem zu ziehen.

Zusätzliche Assistenztools können hier zum Einsatz gebracht werden. Eine umfangreiche Unterstützung wird durch die Software SimAssist bereitgestellt, welche auf Basis der Forschungsprojekte AssistSim und EDA-Sim entstanden ist (Mayer et al. 2012). SimAssist bietet Funktionsumfänge an, die nicht nur die Experimentauswertung unterstützen, sondern auch in der Phase der Datenanalyse und beim Reporting die manuellen Aufwände für den Simulationsingenieur reduzieren können. Dazu gehören u. a. Funktionen zur Kategorisierung von Daten, zur Bestimmung von Verteilungsfunktionen oder auch die Berechnung von Konfidenzintervallen. Darüber hinaus stehen für die Visualisierung von Daten verschiedene Funktionen zur Verfügung, die auch die Aggregation von Informationen erlauben. Ein Beispiel dafür ist SimPie, eine Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeit von Daten unterteilt nach Kategorien. In Abb. 24.3 ist das Ergebnis dieser Funktionalität exemplarisch dargestellt.



**Abb. 24.3** SimPie für die Auswertung einer Datenquelle nach Kategorien und Ausprägungshäufigkeiten

Im Zentrum steht die Gesamtmenge an Daten, jeder Ring um das Zentrum steht für eine Auswertungskategorie, wie etwa Derivat, Karossenfarbe oder Getriebeart. In jedem Segment einer Kategorie steht zuerst die Werteausprägung, darunter die Anzahl an Datensätzen, die diesen Wert haben, und zuletzt der Anteil dieser Datensätze an der zugrunde gelegten Gesamtmenge. Diese Menge wird durch die Anzahl an Daten der übergeordneten Kategorie bestimmt, also dem nächsten Ring in Richtung des Zentrums. Die Reihenfolge der Ringe kann beliebig getauscht werden, um auf diese Weise ganz neue Einblicke in einen bekannten Datensatz zu erhalten.

Eine Besonderheit von SimAssist ist, dass alle für die Auswertung und Visualisierung notwendigen Einstellungen, Filter und Parameter in einem SimAssist-Projekt gespeichert werden können. Sie sind auf diese Weise immer verfügbar, im Nachhinein erweiterbar und jederzeit auf eine neue Datenquelle, z. B. aus einer zusätzlichen Experimentserie, anwendbar. Damit ist es auch möglich, Standards für die Auswertung ausgewählter Anwendungsfälle zu entwickeln und anzuwenden, was zukünftige Simulationsprojekte zusätzlich vereinfachen und beschleunigen kann.

## 24.5 Dokumentation

Neben methodischen und technischen Standards für die Durchführung von Simulationsprojekten bildet die konsequente, umfassende Dokumentation das dritte Standbein eines effizienten Einsatzes der Ablaufsimulation. Sie ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal und es hat sich gezeigt, dass die sorgfältige Dokumentation entscheidend ist für die Wiederverwendbarkeit und Nachvollziehbarkeit auch über mehrere Jahre hinweg.

### 24.5.1 Standardisierte Dokumententemplates

Eine der größten Herausforderungen in einem Simulationsprojekt besteht darin, auch und gerade unter Zeitdruck alle Informationen und Aktivitäten konsequent zu dokumentieren. In Anbetracht der hohen Anzahl an Informationen, die zu liefern sind, scheint der zusätzliche Zeitaufwand verglichen mit dem zu erwartenden Nutzen dafür enorm. Dabei wird aus den Augen gelassen, dass die Dokumentation nicht nur für das zukünftige Arbeiten mit dem Modell wesentlich ist. Sie hat bereits auf Projektverlauf und Ergebnis einen entscheidenden Einfluss, da sie wichtige Grundlage für eine sorgfältige Verifikation und Validierung ist.

Eine hilfreiche Unterstützung für den Dokumentationsprozess ist die Berücksichtigung eines über Projekte oder auch Unternehmensgrenzen hinweg geltenden Standards, z. B. in Form eines einheitlichen Projektlogbuches. Dafür hat sich die Verwendung eines Dokumententemplates bewährt, welches die Ergebnisse aus den einzelnen Phasen des Vorgehensmodells zur Durchführung von Simulationsstudien beinhaltet. Die Dokumentstruktur gliedert sich entsprechend wie folgt:

- Ziel- und Aufgabendefinition einschließlich verbindlicher Meilensteine für die Terminierung der Phasen und die Definition von Verantwortlichkeiten
- Systemdokumentation einschließlich Prozess- und Datenbeschreibung
- Modelldokumentation für das ausführbare, valide und verifizierte Modell
- Experimentbeschreibung und -ergebnisse
- Ergebnisdokumentation einschließlich abgeleiteter Maßnahmen und Empfehlungen

Darüber hinaus ist das Führen einer Projektverlaufsdokumentation in diesem Logbuch sinnvoll. Dort können sowohl Ergebnisse und Entscheidungen aus Besprechungen und Workshops festgehalten als auch Deadlines fixiert und Verantwortliche für offene Punkte benannt werden. Oftmals ist es wichtig, auch im Nachhinein noch nachvollziehen zu können, wie es zur Entscheidungsfindung kam. Auch wenn die Führung all dieser Informationen in einem Dokument in Abhängigkeit vom Projektumfang auch Nachteile bezüglich Dateigröße und damit auch bezüglich der Austauschbarkeit mit sich bringen kann, so überwiegen die Vorteile. Alle relevanten Inhalte sind stets verfügbar und es kann innerhalb des Dokumentes mit Querverweisen und der Suchfunktion gearbeitet werden. Für den Projektabschluss oder Zwischenpräsentationen ist es möglich, über zu implementierende Mechanismen eine Zusammenfassung des Logbuchs in Teilen automatisch zu generieren und in ein Präsentationsformat zu überführen.

Ein genereller Vorteil bei der Verwendung von Templates liegt darin, dass der Aufwand für die Konzeption eines geeigneten Dokumentes und seiner Struktur entfällt. Es wird abgesichert, dass keine grundlegenden Informationen zum Projekt vergessen werden. Eine Garantie auf Vollständigkeit kann es jedoch auch mit einem Template nicht geben. Die einfachste und auch zugänglichste Form für ein Logbuch ist die Implementierung in Microsoft Word oder PowerPoint. Vor- und Nachteil in einem ist jedoch, dass Office Lösungen

noch zahlreiche Freiräume zur Anpassung des Dokumentes bieten. Aus diesem Grund sollte das Logbuch Vorgaben für seine Befüllung beinhalten, wie etwa Regeln für die Abbildung eines Modellausschnittes und die Einbindung von Grafiken. Bei der standardisierten Darstellung von Datenauswertungen kann die zusätzliche Verwendung von Reporting Tools eine sinnvolle Ergänzung darstellen.

### **24.5.2 Berichtsfunktionen (Reporting)**

Neben der zuvor erläuterten Organisation von Berichten gibt es Assistenzmethoden und -werkzeuge, die die Zusammenstellung der Informationen für einzelne Berichte (Reports) unterstützen. Zum einen ist das sinnvoll, wenn eine manuelle Übertragung aller relevanten Informationen aus der Simulationssoftware in geeignete Aufbereitungs- und Analysetools mehrere Arbeitsschritte erfordert und somit fehleranfällig ist. Zum anderen ist es oftmals erforderlich, für die Datenauswertung eine andere Software zu verwenden als für die Visualisierung der Analyseergebnisse. Hier ist es sinnvoll, die benötigten Funktionalitäten in einer Anwendung zu kombinieren, um die Bewertung und Darstellung zu beschleunigen und mögliche Datenverluste zu vermeiden. Eine heterogene Systemumgebung für die Analyse der Eingabedaten, der Experimentergebnisse sowie für die Visualisierung erhöht den Aufwand für die Dokumentation und birgt Gefahren von Inkonsistenzen bei der Beschreibung von Daten und Erkenntnissen. Die Zusammenführung von Funktionen, die in den unterschiedlichen Phasen zum Einsatz kommen können, vereinfacht und stabilisiert den Dokumentationsprozess und das Ergebnis und schafft eine gemeinsame Informationsbasis über Ein- und Ausgaben des Modells.

Auch hier kann SimAssist als Beispiel für eine verfügbare Assistenzsoftware genannt werden. Es dient als Plattform für die Auswertung und Darstellung aller Daten und bietet Funktionen zur Gestaltung von Reports an. Darüber ist eine Schnittstelle implementiert, über welche diese Berichte in Microsoft PowerPoint exportiert werden können, um Teile einer Experiment- oder Projektpräsentation automatisch zu generieren. Über die Möglichkeit zur Speicherung von Analyseroutinen können mit SimAssist standardisierte Reports erstellt werden. Um die Projektinformationen zu vervollständigen, kann ergänzend zu den Ein- und Ausgabedaten eines Projektes auch eine schriftliche Dokumentation erfolgen, um so einen umfassenden Projektbericht über SimAssist zu generieren. Die Software bietet damit ein umfassendes und jederzeit erweiterbares Funktionspaket für die Simulationsassistentz.

---

## **24.6 Zusammenfassung**

Die Ablaufsimulation leistet in der Automobilindustrie einen wichtigen Beitrag zur Auslegung von Produktions- und Logistikprozessen. Die frühzeitige Optimierung von Ressourcen, wie z. B. Personal, Anlagen- und Fördertechnik oder Fläche, verringert die

Investitions- und Betriebskosten, was im Resultat die Wettbewerbsfähigkeit des Herstellers steigert. Assistenzmethoden und -werkzeuge beschleunigen die Durchführung einer Simulationsstudie, indem sie die Ausführung komplexer Tätigkeiten erleichtern. Darüber hinaus lassen sich dabei sonst häufig auftretende Fehler vermeiden, wodurch die Planungsqualität verbessert wird. Auf den vorangegangenen Seiten wurde ein Überblick über grundsätzliche Ideen für Simulationsassistentz und bereits im Einsatz befindliche Werkzeuge gegeben.

Simulationsassistentz bietet in den verschiedenen Phasen eines Projektes wertvolle Unterstützung. In dieser Ausführung wird deutlich, dass es zwar oftmals mehrere Herausforderungen innerhalb eines Aufgabenschwerpunktes einer Phase gibt, trotzdem aber viele Methoden und Werkzeuge existieren, die ganz gezielt für eine dieser Aufgaben entwickelt wurden. Eine Software, die mehrere Funktionalitäten vereint und über verschiedene Phasen hinweg eingesetzt werden kann, verringert die Arbeitsaufwände und erhöht die Konsistenz von Informationen. Doch die Erschließung neuer Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsfälle für die Simulation, z. B. die durchgehende Abbildung von Medien wie Energie, Druckluft oder Wasser, bringt neue Herausforderungen mit sich und erfordert eine konsequente Weiterentwicklung der Assistenzfunktionen.

Mithilfe von Methoden und Werkzeugen für die Simulationsassistentz kann die Ablaufsimulation noch strukturierter und effizienter eingesetzt werden, um so auch zukünftig ihre Akzeptanz als fester Bestandteil der Planung weiter zu steigern.

---

## Literatur

- Banks J, Carson J, Nelson B, Nicol D (2005) *Discrete-event system simulation*, 4. Aufl. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River
- Dammasch K, Kaupp H, Rabuser M (2010) Eine Automatische Modellgenerierung zur simulationsgestützten Planung und Optimierung von robotergesteuerten Fertigungsprozessen. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 53–60
- Huber L, Wenzel S (2011) Trends und Handlungsbedarfe der Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. *Ind Manag* 27:27–30
- März L, Krug W, Rose O, Weigert G (2011) *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik – Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Springer, Berlin/Heidelberg
- Mayer G, Spieckermann S, Wenzel S (2012) Steigerung der Produktivität in Simulationsstudien mit Assistenzwerkzeugen. *Z wirtsch Fabrikbetr* 107:174–177
- Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S (2008) *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Springer, Berlin/Heidelberg
- Wenzel S, Weiß M, Collisi-Böhmer S, Pitsch H, Rose O (2008) *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik – Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Springer, Berlin/Heidelberg



**Kristina Sokoll** Studium der Computervisualistik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. 2006–2008 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Simulation der Universität Magdeburg in Forschung und Lehre tätig. Seit 2008 als Simulationsingenieurin im SimOffice der AUDI AG in Ingolstadt verantwortlich für die Betreuung und Durchführung von Produktions- und Logistiksimulationen und die Weiterentwicklung der Methode Ablaufsimulation.



**Matthias Clausing** Studium der Wirtschaftsinformatik an der TU Darmstadt. 2008 Einstieg bei der AUDI AG in Ingolstadt in das Team SimOffice, einer internen, zentralen Anlaufstelle für das Thema Ablaufsimulation. 2009–2013 Sprecher des Gewerketeams Ablaufsimulation im Rahmen des Konzernprojektes Digitale Fabrik des Volkswagen Konzerns. Von 2009 bis 2018 Vertreter der AUDI AG in der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation im Verband der Automobilindustrie (VDA).



# Einsatzmöglichkeiten von Simulation und Optimierung in der Planung der Automobilindustrie

# 25

Lothar März

## 25.1 Einführung

Die Methodik Simulation zur Planung von Produktions- und Logistiksystemen wird im deutschsprachigen Raum seit mehr als 40 Jahren verwendet. Eine bedeutende Vorreiterrolle spielt seit jeher die Automobilindustrie, die im Bereich der Logistik und Lieferketten aufgrund des globalen Wettbewerbs um Kunden und Märkte sich aus Kosten- und Servicegesichtspunkten konsequent dem Management der Wertschöpfungs-systeme widmet. Der Anspruch, Lieferkettenaufträge termingerecht, serviceorientiert und in hoher Qualität zu realisieren, ließ die Planer sich schon früh mit Methoden des Operations Research (OR) beschäftigen.

Die Anfänge des Einsatzes von Simulationssystemen wurde von Programmierexperten geprägt, die mit der Unterstützung von Planern aus dem Produktions- und Logistikbereich versuchten, bessere Planungslösungen durch Änderungen der Modellparameter zu erreichen. Diese Vorgehensweise folgte zumeist weniger einer systematischen Logik, sondern entsprach eher einem intuitiven Versuch-und-Irrtum-Vorgehen, das umgangssprachlich oftmals als Optimierung bezeichnet wird. Diese im Sprachgebrauch häufig anzutreffende Bezeichnung für die mehr oder weniger systematisch angewandten Versuchsreihen von Simulationsexperimenten entspricht nicht dem Verständnis des Begriffes „Optimierung“, wie er im Sinne des OR gemeint ist. Unter Optimierung versteht man hierbei ein Vorgehen zur Erreichung eines Optimums. Unter einem Optimum versteht man das beste erreichbare Resultat im mathematischen Sinne bezogen auf ein Ziel oder mehrere Ziele. Welches Ziel beziehungsweise welches Zielsystem aus mehreren Einzelzielen erreicht werden soll, ist somit im Vorfeld einer Optimierung festzulegen. Analytische (Optimierungs-)Verfahren

---

L. März (✉)  
STREMLER AG Supply Chain Engineering, Lindau, Deutschland  
E-Mail: [lothar.maerz@strempler.de](mailto:lothar.maerz@strempler.de)

finden ihre Grenzen in der Abbildung komplexer Produktions- und Logistikanwendungen, wenn die Anzahl der Variablen und Gleichungen überhandnimmt. Es sind schlichtweg zu viele unterschiedliche Konfigurationen möglich, die sich beispielsweise bei der Auslegung einer Endmontagelinie bei wechselndem Produktionsprogramm ergeben, als dass analytische Verfahren noch in vertretbarer Rechenzeit eine optimale Lösung ermitteln könnten. Der im Rahmen dieses Beitrages verwendete Begriff der Optimierung zielt auf solche Verbesserungen unter der Verwendung mathematischer Optimierungsverfahren in Kombination mit der Simulation ab.

Zur Prognose des zeitdynamischen Verhaltens hat sich die Simulation bewährt. Sie ist ab einer bestimmten Komplexität der betrachteten Strukturen und Prozesse die einzige Methode, welche es erlaubt, dynamische und stochastische Systeme schnell zu analysieren und eine gute Lösung durch Variation der Einflussgrößen auf das Produktionssystem zu ermitteln. Die Simulation bildet die systemimmanenten Wirkzusammenhänge ab und berechnet zeitbezogen die logistischen Ergebnisgrößen aufgrund des dynamischen Ablaufverhaltens. Die Simulationsergebnisse sind das Resultat einer vorgegebenen System- und Systemlastkonfiguration und müssen interpretiert werden, d. h., es muss ein Vergleich gezogen werden zwischen den Ergebnisdaten und den Zielvorgaben. Um eine optimierte Konfiguration des Systems zu erhalten, müssen die Struktur-, Ressourcen- und Prozessparameter dergestalt angepasst werden, dass eine möglichst gute Zielerfüllung erreicht wird. Aufgrund des gegenläufigen Verhaltens der logistischen Zielgrößen (Beispiel Auslastung versus Durchlaufzeit) ist nicht unmittelbar klar, wie die Stellgrößen zu parametrisieren sind, um die Zielvorgaben zu erreichen. Je komplexer das Simulationsmodell, desto schwieriger ist dieses Unterfangen. Hierbei kann nun wiederum die Optimierung helfen.

Die Optimierung unterstützt den Planer beim Auffinden guter Lösungen. Aufgrund der vielfältigen Zielvorgaben manifestiert sich die Entscheidungsunterstützung durch Optimierung zumeist durch das Aufzeigen von Kompromisslösungen. Dabei wird solange nach Alternativen gesucht, bis eine möglichst gute (beste) Lösung für ein Problem gefunden wird.

Anhand von zwei Praxisbeispielen wird am Ende dieses Beitrages aufgezeigt, wie in der Planung in der Automobilindustrie Methoden zur simulationsgestützten Optimierung sinnvoll eingesetzt werden können (Abschn. 25.4). Zur Einordnung werden zunächst die Kombinationsmöglichkeiten von Simulation und Optimierung vorgestellt (Abschn. 25.2), bevor die grundlegenden Anforderungen an die Planung beleuchtet werden (Abschn. 25.3).

---

## 25.2 Kopplungsarten von Simulation und Optimierung

### 25.2.1 Simulationsbasierte Optimierung

Die ereignisdiskrete Simulation ist ein mächtiges Werkzeug zur Analyse und Bewertung von produktionslogistischen Systemen (VDI 2014; Wenzel 2010). Die Abbildung der

zeitdynamischen Wirkzusammenhänge durch die Berechnung von Zustandsfolgen ermöglicht die Vorhersage des Verhaltens solcher Systeme unter einer definierten Auftragslast. Dies gilt auch für komplexe und stochastische Systeme.

Optimierungsmethoden im Produktionsumfeld hingegen werden überwiegend bei deterministischen Systemen eingesetzt, oder wenn es beispielsweise nicht erforderlich ist, förder technische Details in Materialflusssystemen zu betrachten. In der linearen und nicht linearen Optimierung geht es darum, geeignete mathematische Ansätze zu finden, die möglichst effizient neue Suchschritte in Richtung der Lösung des vorgegebenen analytischen Ziels mit Nebenbedingungen ermitteln. Zudem sollte nach möglichst wenigen Suchschritten das globale Optimum mit einem hinreichend kleinen Fehlermaß gefunden sein (Pinter 1996; Luenberger 2003).

Die Vorteile von Simulation und Optimierung können kombiniert werden (VDI 2016). Die Simulation dient zur Bewertung einer Systemkonfiguration, während die Optimierung die Aufgabe übernimmt, die beste Parameterauswahl für eine optimale Zielerreichung zu finden. Die jeweiligen Vorteile von Simulation und Optimierung können in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung und der Zielsetzung durch eine geschickte Verknüpfung beider Methoden nutzbringend eingesetzt werden (vgl. van Dijk und van der Sluis 2008). Vorteile der Simulation sind insbesondere die Berücksichtigung praxisrelevanter Komplexitäten sowie die Berücksichtigung von stochastischen Zufallsereignissen (Mengen- und Zeitschwankungen, Ausfälle). Besondere Vorteile der Optimierung sind die Fähigkeit, bessere (im Idealfall: optimale) Lösungen zu finden und Einblick in die Lösungsfindung zu ermöglichen.

Mit der simulationsgestützten Optimierung werden in der Regel Aufgabenstellungen untersucht, bei denen eine analytische Ermittlung von Zielfunktionswerten nicht möglich ist. Verbunden mit dem Umstand, dass oft mehrere Ziele gleichzeitig zu erreichen sind, eignen sich bei der Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik überwiegend heuristische Optimierungsverfahren bzw. -algorithmen (Rose und Krug 2010).

Die Ablaufreihenfolge von Simulation und Optimierung kann je Anwendungsfall unterschiedlich sein. Entscheidend für die Kopplungsart sind die gegenseitigen Abhängigkeiten der verwendeten Simulations- und Optimierungsprozeduren, die Relation von Unter- bzw. Überordnung zwischen Simulation und Optimierung sowie die zeitliche Abfolge der Berechnungen (März und Krug 2010; VDI 2016). Grundsätzlich lassen sich folgende Varianten von Verknüpfungen unterscheiden:

- Hierarchisch
- Sequentiell

Daraus ergeben sich grundsätzlich vier Arten, die Methoden von Simulation und Optimierung zu koppeln. Selbstverständlich sind auch Kombinationen der genannten Architekturen möglich und, wie anhand eines Praxisbeispiels in Abschn. 25.4 aufgezeigt, auch üblich.

### 25.2.2 Die Optimierung ist in die Simulation integriert

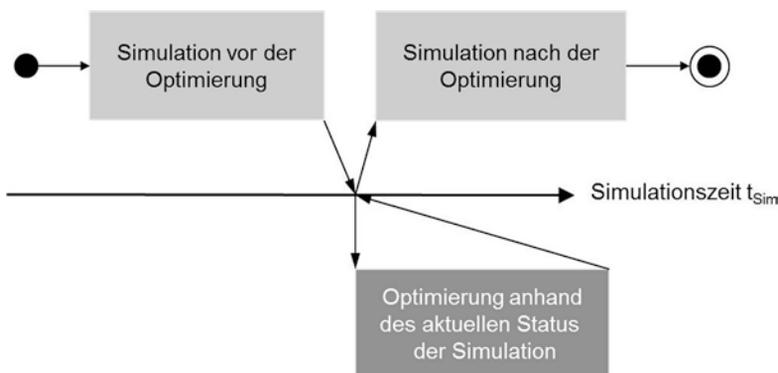
Bei der hierarchischen Architektur ist eine Methode dominant und steuert die andere Methode. Im Falle, dass die Simulation das führende System ist, löst die Optimierung in Abhängigkeit des aktuellen Status des Simulationsmodells die ihm übertragende Aufgabenstellung und spielt die Ergebnisse an die Simulation zurück. In Abb. 25.1 wird deutlich, dass während der Optimierung die Simulationszeit pausiert.

Ein praktisches Beispiel hierzu ist die Überprüfung einer operativ eingesetzten Reihenfolgeoptimierung vor einer Engpassmaschine oder die Optimierung einer Auftragszusammenstellung von einer Ofenbeschickung (Batch-Prozess). In diesen Beispielen wird die Optimierungslogik im Simulator nachgebildet oder die Simulation steuert die operativ eingesetzte Optimierungssoftware in einer Art parallelen Plansystemumgebung an.

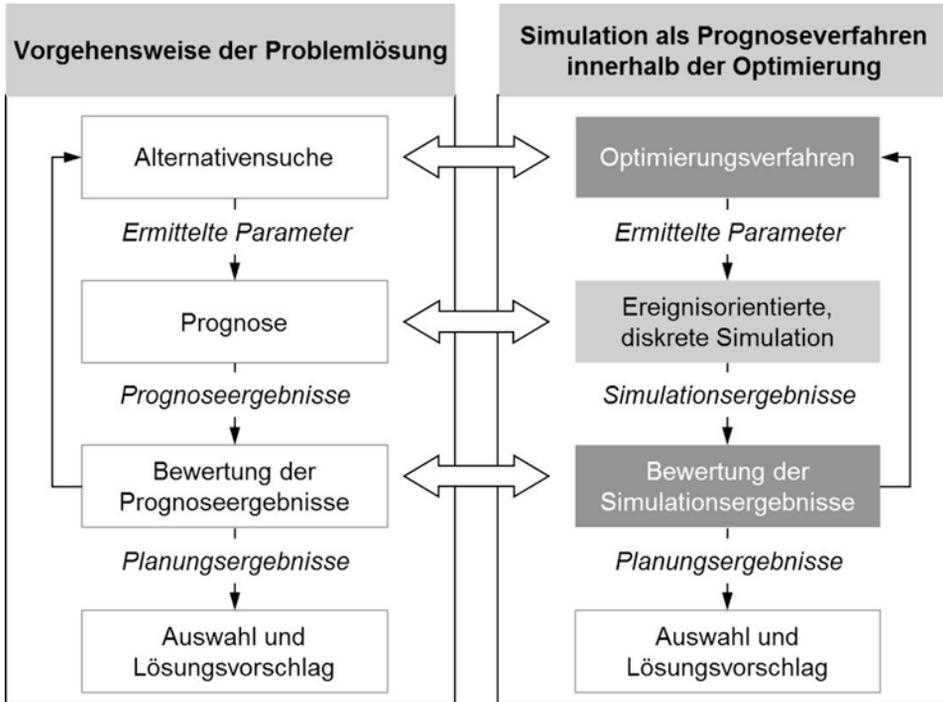
### 25.2.3 Die Simulation dient zur Bewertung der Optimierung

Eine weitere hierarchische Kopplung liegt vor, wenn die Simulation durch die Optimierung gesteuert wird. In diesem Falle stellt die Simulation in Form der Ergebnisdaten die Grundlage für eine Bewertung des dynamischen Verhaltens der von der Optimierung vorgegebenen Produktionssystemkonfiguration dar. Wie in Abb. 25.2 dargestellt, entspricht die Simulation der Prognosefunktion im Rahmen des allgemeinen Ablaufs einer Problemlösung, während das Optimierungsverfahren die Suche nach Alternativen repräsentiert.

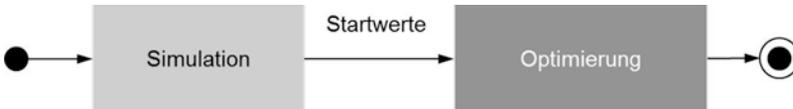
Ein Beispiel hierzu ist die Überprüfung durch die Simulation, ob die durch den Optimierer vorgeschlagene Auftragsreihenfolge die erwarteten Zielvorgaben erreicht oder nicht. Diese Kopplungsart ist mit Abstand am häufigsten anzutreffen (vgl. März und Krug 2010).



**Abb. 25.1** Die Optimierung als emulierte Lösungsfunktion innerhalb einer Simulation



**Abb. 25.2** Die Simulation als Bewertungskomponente der Optimierung

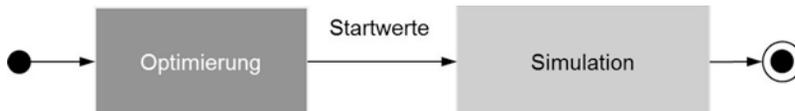


**Abb. 25.3** Simulation zur Eingrenzung des Suchraumes der Optimierung

### 25.2.4 Die Simulation ermittelt Startwerte für die Optimierung

Bei der sequentiellen Architektur wird gemäß Abb. 25.3 zunächst ein (Simulations- oder Optimierungs-)Ergebnis ermittelt, bevor die andere Methode zum Zuge kommt. So wird bei der Kopplungsfolge Simulation – Optimierung zunächst über den Gesamtbetrachtungsumfang simuliert und die Ergebnisse in der Optimierung als Eingangsgröße verwendet.

Diese Architektur dient beispielsweise dazu, mit der Simulation die notwendigen Kapazitätsanforderungen zu ermitteln, um im Nachgang durch die Optimierung diese Kapazitätsbedarfe konkreten Produktionsressourcen zuzuordnen.



**Abb. 25.4** Optimierung zur Parametrierung der Startwerte der Simulation

### 25.2.5 Die Optimierung konfiguriert das Simulationsmodell

Im Falle der gegensätzlichen Kopplung, wie in Abb. 25.4 aufgezeigt, kann die Optimierung dafür eingesetzt werden, Konfigurationen vorzuschlagen, die dann in einem zweiten Schritt durch die Simulation auf Machbarkeit überprüft werden. Oftmals ist es nicht möglich (und wenig sinnvoll), die kausalen Zusammenhänge einer Produktion vollständig analytisch in Form von Bedingungen und Restriktionen zu formulieren. Daher erscheint es sinnvoll, die mathematische Formulierung auf die elementaren Kriterien zu beschränken und eine erste Lösung zu generieren, die bezogen auf das mathematische Modell gültig ist (vgl. VDI 2016). Mit Hilfe der Simulation, die implizit die Wirkzusammenhänge durch Abbildung der relevanten Verhaltensregeln erfasst, kann die Optimierungslösung auf weitere, zeitdynamische Restriktionen und Randbedingungen auf Realisierbarkeit geprüft werden.

Ein weiterer Ansatz dieser Kopplungsart ist die Verwendung der Optimierung, um zulässige Startwerte für die Simulation zu ermitteln.

Oftmals sind die produktionslogistischen Bedingungen zur Bildung einer Auftragsreihenfolge schon sehr vielfältig, sodass es beispielsweise sinnvoll sein kann, die Rüstaufwände bereits bei der Sequenzierung der Auftragseinlastung zu minimieren und die besten Alternativen im Hinblick auf die weitere Auftragsabwicklung im Anschluss simulativ zu bewerten.

### 25.2.6 Problemklassen

Die Auswahl des richtigen Optimierungsverfahrens richtet sich nach Art und Umfang der Problemklasse. Grundsätzlich lassen sich drei unterschiedliche Klassen von Problemen unterscheiden, die in Abb. 25.5 beschrieben sind. Bei Reihenfolgeproblemen stellt sich die Frage, welchen Rang jedes Planungsobjekt aus einer Liste erhalten soll. Typisches Beispiel ist die Festlegung einer Auftragsreihenfolge, die determiniert, in welcher Folge Aufträge in die Produktion eingesteuert werden sollen. Bei Zuordnungsproblemen steht die Aufgabe im Raum, Zuordnungen von unterschiedlichen Planungsobjekten vorzunehmen. Beispiele hierfür sind Zuordnungen von Mitarbeitern zu Schichtplänen, Aufträgen zu Betriebsmitteln, etc. Eine weitere Problemklasse stellt die Parametervariation dar, bei der eine Stellgröße in ihrem Wert verändert wird. Ein Beispiel hierzu ist die Ermittlung einer optimalen Losgröße.

In den meisten anzutreffenden Aufgabenstellungen in der betrieblichen Praxis sind mindestens zwei der drei genannten Problemklassen betroffen. Auch dies ist einer der

Reihenfolge- problem	Zuordnungs- problem	Parameter- variation
<ul style="list-style-type: none"> <li>— Auftrags- reihenfolge</li> <li>— Rüstreihenfolge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Zuordnung von Mitarbeitern zu Schichtplänen</li> <li>— Zuordnung von Aufträgen zu Betriebsmitteln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Losgrößen</li> <li>— Planzeiten</li> <li>— Leistungsgrößen (St./h, m/s, ...)</li> <li>— Pufferflächen</li> <li>— ...</li> </ul>

**Abb. 25.5** Problemklassen und beispielhafte Aufgaben aus der Produktionslogistik

Gründe, warum eine einzelne Methode, also Simulation oder Optimierung, alleine jeweils nicht hinreichend ist, um zufriedenstellende Resultate zu erhalten. Die Optimierung stößt bei zu detaillierten oder stochastischen Aufgabenstellungen an ihre Grenzen, der manuelle Aufwand zur Formulierung übersteigt den Nutzen und der Rechenaufwand zur Lösung des Algorithmus wird unbefriedigend. Die Simulation gibt durch Szenarienbildung und deren Vergleich keinen zielgerichteten Lösungsweg vor, dies obliegt dem Anwender. Wie einleitend erwähnt, kann es bei sehr komplexen Systemen nicht mehr durchschaubar sein, welche Stellgrößen, welche Zuordnungen und welche Reihenfolgen wie vorzunehmen sind, um eine im Sinne von antagonistischen Zielgrößen optimale Auswahl zu treffen. Die simulationsgestützte Optimierung bietet hier eine Möglichkeit, dem Planer eine Entscheidungsunterstützung bei dieser Aufgabe zu geben.

## 25.3 Planung in der Automobilindustrie

### 25.3.1 Anforderungen an die Planung

Die Kunden erwarten beim Kauf eines Automobils individuelle Auswahlmöglichkeiten. Individualisierung, neben Standard- und Massengeschäft, erfordert sowohl auf der Produktseite als auch auf der Produktionsseite und der Art und Weise, wie geplant und gesteuert werden muss, neue Lösungen.

Die Programmplanung hat zur Aufgabe, die hohe Produktvarianz der zu montierenden Fahrzeuge im Tagesverlauf so zu verteilen, dass die eingesetzten Mitarbeiter gleichmäßig ausgelastet und Unterauslastungen sowie Kapazitätsspitzen vermieden werden. Die Planung der vorgelagerten Stufen muss die zeitgerechte Bereitstellung (just in time, just in sequence) von Modulen, Komponenten und Teile sicherstellen. Die Integration der Planung über die Wertschöpfungsstufen nimmt allerdings umso mehr ab, je weiter der Blick in Richtung Ursprung der Wertschöpfungsstufe gerichtet wird. Als Konsequenz können Unternehmen Engpässe schlechter erkennen. Frühzeitiges Erkennen solcher Situationen

beim Zulieferer eröffnet dem Unternehmen größeren Handlungsspielraum für eine gegebenenfalls notwendige Plananpassung.

Für Unternehmen ist es daher essenziell wichtig, die Planungsintegration auf die vorgelagerten Wertschöpfungspartner anzuwenden. Die individuelle Leistungsfähigkeit des Unternehmens hängt in vielen Fällen direkt von der planbaren Leistungsfähigkeit der Lieferanten ab. Für Abnehmer bedeutet es, auf Planänderungen des Lieferanten unter Berücksichtigung seiner Einschränkungen der Produktionsfaktoren reagieren zu können. Diese Produkt- und Leistungsanpassung erfolgt in Zukunft in Echtzeit.

Durch die Optimierung und Simulation von Planszenarien können bei Planänderungen machbare und optimierte Lösungen ermittelt werden. Kurze, verbindliche Reaktionszeiten werden in Zukunft Bestandteil der Leistung und des Kundenservice sein. Dies bedeutet, dass sich die Unternehmen durch die Fortschritte in der Echtzeit-Informationstechnologie und dem Einsatz von Optimierungs- und Simulationsmethoden neu aufstellen werden. Damit wird die immer größere Komplexität der Produkte und der integrierten Prozesswelt schrittweise beherrschbar (Stremmler und März 2015).

### 25.3.2 Zielgrößen der Planung

Die Ziele in der Planung der Automobilzulieferindustrie sind die klassischen Ziele der Produktionsplanung und -steuerung: höchste Serviceerfüllung gegenüber dem Kunden bei gleichzeitig wirtschaftlicher Produktion. Die gegenläufigen Ziele von Serviceerfüllung durch Vermeidung von Rückständen und hoher Reaktionsfähigkeit (kurze Durchlaufzeiten) einerseits und hoher Produktivität und niedrigen Beständen auf den Wertschöpfungsstufen andererseits sind kontinuierlich aufeinander abzustimmen. Der Service wird üblicherweise durch die Lieferfähigkeit und die Termintreue ausgedrückt. Die Durchlaufzeit ist ein guter Indikator für die Reaktionsfähigkeit der Wertschöpfungskette. Je kurzfristiger auf Änderungen reagiert werden kann, umso einfacher sind Änderungen am Abrufverhalten der Kunden umzusetzen. Die Lieferzeiten der Vormaterialien bzw. Rohstoffe als Teil der Wertschöpfungskette können dabei auch einen maßgeblichen Einfluss haben.

Eine hohe Wirtschaftlichkeit der Produktion wird in erster Linie durch eine hohe Auslastung der Anlagen und des Personals erreicht. Aufgrund der Nachfrageschwankungen wechseln die Anforderungen an die Ressourcen, sodass vielfach das Augenmerk auf die jeweils aktuelle Engpassmaschine gelegt wird. Allerdings sind auch die Unterauslastungen zu berücksichtigen, da durch gezielte Steuerung beispielsweise des Personaleinsatzes der Kostenremanenz begegnet werden kann.

Eine hohe Auslastung allein garantiert jedoch noch keine wirtschaftliche Produktion, da es darauf ankommt, die richtigen, d. h. die jeweils vom Markt benötigten, Produkte zu fertigen. Die Konzentration auf maximale Auslastung ist nachvollziehbar, führt aber nicht selten zu hohen Beständen. Die Maxime sollte daher eher lauten, nur abrufbezogen oder zeitnah zum Abruf zu produzieren, gemäß dem Prinzip: Produzieren können, aber nicht müssen.

Letztendlich zählt für jedes Unternehmen der Automobilindustrie eine Kennzahl vor allen anderen: die Wertschöpfung pro Kopf. Und in diese Kennzahl gehen die direkten und indirekten Kosten mit ein. Gerade im direkten Wettbewerb mehrerer Zulieferer entscheiden bei gleichem Service häufig die indirekten Kosten über den kommerziellen Erfolg. Die Planung und Steuerung der Wertschöpfungskette haben hierauf einen maßgeblichen Einfluss.

Um diesen Herausforderungen trotzen zu können, ist die Automobilindustrie gefragt, neue Ansätze in der Planung und Steuerung zu etablieren, die es erlauben, die jeweils richtige Konfiguration der Produktionsfaktoren in Abhängigkeit der aktuellen Auftragsituation vorzunehmen. Dabei können die Methoden Simulation und Optimierung einen maßgeblichen Beitrag bei der Entscheidungsfindung in der Planung leisten. Dies soll anhand der zwei nachfolgend beschriebenen Praxisbeispiele aufgezeigt werden.

---

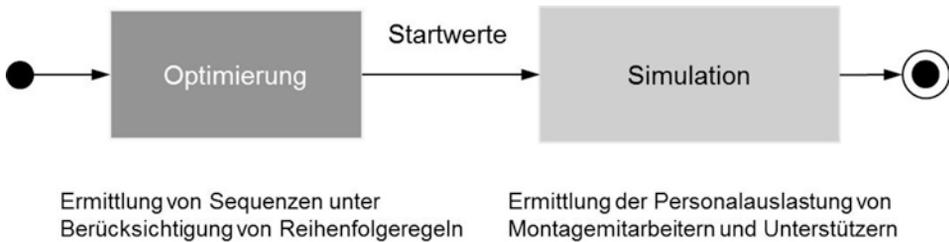
## 25.4 Praxisbeispiele

### 25.4.1 Sequenzoptimierung und simulationsbasierte Personaleinsatzplanung in der Endmontage

Die Fahrzeugindustrie zeichnet sich durch stark kundenindividuelle und somit variantenreiche Produkte aus. Um bei hohen Stückzahlen eine effiziente Montage zu ermöglichen, ist die Verwendung des Fließproduktionsprinzips typisch (Hu et al. 2011). Durch die wechselnden Bearbeitungszeiten je Fahrzeug bzw. Aggregat sind auf das Produktionsprogramm abgestimmte Personal- und Logistikplanungen im Vorfeld notwendig (Bley et al. 2004). Diese Planungen müssen kontinuierlich angepasst werden. Zur Bewertung der Auswirkungen alternativer Planungsszenarien wird ein simulationsbasierter Planungsassistent vorgestellt, der die Bewertung der Personalauslastung anhand einer vorab optimierten Auftragssequenz ermöglicht.

Der Planungsassistent zur Personaleinsatzplanung und Beherrschung der Fahrzeugreihenfolge (auch Perlenkettenbeherrschung genannt) erlaubt die kontinuierliche Vorhersage des Mitarbeitereinsatzes an einer sequenzierten Montagelinie. Die aktuelle Montagekonfiguration bezüglich Mitarbeitereinsatz und Prozesszuordnungen ist im Simulationsmodell hinterlegt. Die Auftragsreihenfolge wird zunächst über einen regelbasierten Sequenzierungsalgorithmus ermittelt, der eine Reihe von Restriktionen berücksichtigt. So ist beispielsweise die Montage von zeitaufwändigen Fahrzeugausstattungen nur in bestimmten Abständen möglich, um unzulässige Arbeitsspitzen in der Linie zu vermeiden. Die kritischsten Engpassituationen werden somit bereits bei der Sequenzierung der Aufträge berücksichtigt.

Die Simulation zeigt in der Folge auf, bei welchen Mitarbeitergruppen mit Überlastspitzen zu rechnen ist. Dazu werden täglich die operativen Auftrags- und Prozesszeitdaten übernommen und mit der anliegenden Sequenz simuliert. Der Planungsassistent gibt bei hoher Detaillierung wieder, welche Mitarbeiter(gruppen) zu welchem Zeitpunkt wie hoch ausgelastet sind (Pröpster et al. 2015).



**Abb. 25.6** Sequenzoptimierung und Personaleinsatzplanung in Montagelinien

Die Anwendung nutzt somit die Methoden von Optimierung und Simulation in sequenzieller Weise, wie in Abb. 25.6 dargestellt: Zunächst verhindert die Optimierung bei der Sequenzierung der Aufträge zu hohe Prozesszeitanforderungen in einem Takt, in dem einfache Abstandsregeln berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Simulation dienen dann in der Folge der Produktionsplanung dazu, die Unterstützer in der Linie dort gezielt einzusetzen, wo durch die Simulation prognostiziert wurde, dass mit Überlastfällen zu rechnen ist.

Die Anwendung ermöglicht zudem die Verwaltung von Stamm- und Plandaten, um alternative Szenarien abbilden zu können. Der Produktionsplaner kann beispielsweise Untersuchungen zu unterschiedlichen Organisationsformen (Zuordnung von Mitarbeitern zu Stationen, Springereinsatzplanung, rollierende Teams, etc.) durchführen, während der Zeitwirtschaftler unterschiedliche Szenarien zur Arbeitsplanung (Zuordnung von Prozessen zu Stationen bzw. Mitarbeitergruppen) konfiguriert, berechnet und analysiert. Die Optimierung erfolgt in diesen Fällen durch die systematische Suche durch den Planer, der seine Vorschläge mittels Simulation bewerten lässt.

### 25.4.2 Simulationsgestützte Optimierung der Feinplanung in einem Automobilzulieferbetrieb

Das zweite Beispiel stellt eine Praxisanwendung in der Automobilzulieferindustrie vor, bei der in der Planung und Steuerung der Produktion die Methoden von Simulation und mathematischer Optimierung dazu eingesetzt werden, die hochkomplexen Zusammenhänge eines Gießereibetriebes mit den anspruchsvollen Anforderungen in der Erfüllung von Kundenabrufen von Automobilherstellern in Einklang zu bekommen.

Im vorliegenden Fall werden infrastrukturelle Maßnahmen zum Anlass genommen, die bestehende Organisation der Planung und Steuerung von Produktion und Logistik zu überdenken. Die Abstimmung der Planungs- und Steuerungsprozesse der Produktionsbereiche Kernmacherei, Formgebung, Schmelzerei, Gießerei und Bearbeitung wird von der eingesetzten Enterprise Resource Planning (ERP) Software nur rudimentär unterstützt. Die Detailplanung und -abstimmung erfolgen über Tabellenkalkulationsprogramme und unterliegen vielfältigen Einflussfaktoren, sodass aufgestellte Pläne bereits nach kurzer

Zeit nicht mehr mit den realen Vorkommnissen in der Produktion übereinstimmen. Eine Beurteilung der getroffenen Planungsentscheidungen ist schwierig, da eine quantitative Bewertung der Auswirkungen auf Auslastung und Bestandsentwicklung einerseits und der Servicegrad-Erfüllung der Aufträge (Lieferfähigkeit und Termintreue) andererseits nicht transparent aufgezeigt werden kann.

Die Wechselwirkungen zwischen Kernmacherei, Schmelzerei und Gießerei sind vielfältig und müssen bei der Einplanung von Aufträgen berücksichtigt werden. So sind beispielsweise in der Schmelzerei die minimalen und maximalen Schmelzleistungen, die Rüstaufwände von einer Güte zu einer anderen Güte sowie die Anzahl paralleler Warmhalteöfen zu berücksichtigen. In der Gießerei sind neben den Kapazitäten die Verfügbarkeit von Schmelze und Kernen zu prüfen, darüber hinaus die maximal einsetzbare Anzahl an Mitarbeitern an der Linie sowie die maximale Anzahl an Paletten. Um eine sinnvolle Auftragsreihenfolge zu generieren, ermittelt ein heuristischer Optimierer unter Berücksichtigung dieser Restriktionen und Randbedingungen valide Lösungen.

Die meisten heute eingesetzten ERP-Systeme berücksichtigen bei der Berechnung der Kapazitätsbelegung und der Durchlaufzeiten gemittelte Planwerte. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die reine Rüst- und Durchführungszeit eines Auftrages an einer Maschine nur einen Teil der Gesamtdurchlaufzeit darstellt. Daneben fallen Liege- und Transportzeiten an, die in Summe als durchschnittliche Durchlaufzeit im Planungssystem festgehalten werden. Die Ermittlung dieser Durchlaufzeiten erfolgt aus den Erfahrungen der Vergangenheit und kann im Einzelfall stark schwanken. Um die Durchlaufzeit eines Auftrages an einer Maschine zu ermitteln, bedarf es einer dynamischen Kapazitätsanalyse, die der aktuell anliegenden Auftrags- und Produktionssituation Rechnung trägt. Dazu wird die ereignisdiskrete Simulation eingesetzt.

Als Eingangsgröße der Simulation dient die beste Lösung der vorab ermittelten Auftragsreihenfolge der Optimierung. Im Anschluss an die Simulation findet eine ganzheitliche Betrachtung der Zielerreichung statt. Zum Vergleich unterschiedlicher Szenarien können in der Folge die nachfolgend besten Ergebnisse der Optimierung an die Simulation zum Ergebnisvergleich zugeführt werden. Somit handelt es sich bei dieser Architektur um eine geschachtelte Kopplung von Simulation und Optimierung, wie sie in Abb. 25.7 abgebildet ist.

Dieser Art von Planungsaufgaben muss sich eine Reihe von Automobilzulieferern stellen. Die Methoden von Simulation und Optimierung können bei der Lösung solcher täglichen Feinplanungsaufgaben eine große Hilfestellung leisten.

---

## 25.5 Fazit

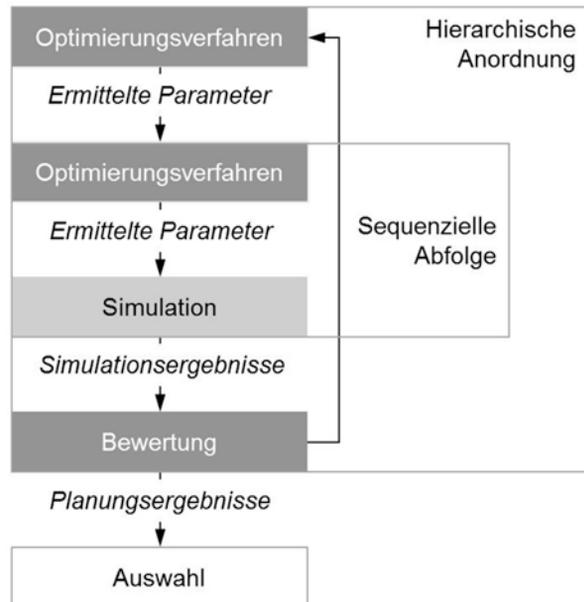
Die Kunden der Automobilindustrie erwarten eine pünktliche Lieferung ihrer Fahrzeuge. Die gesamten Zulieferketten als auch die eigene Organisation zur Fertigung und Montage der Fahrzeuge ist darauf auszulegen, wechselnde Auftragsszenarien in Menge und Mix

- Auswahl alternative Sequenzen
- Variation Schichtmodelle
- Geänderte Arbeitspläne
- Variation der Prioritäten

Ermittlung zulässiger Sequenzen je Gieß- und Schmelzanlage unter Berücksichtigung der Restriktionen und Kostenfunktionen

Überprüfung der Machbarkeit unter Berücksichtigung der dynamischen Wirkzusammenhänge

Bewertung der logistischen Zielerreichung



**Abb. 25.7** Simulationsgestützte Optimierung der Feinplanung von Schmelz- und Gießaufträgen

abbilden zu können. Dies stellt hohe Anforderungen an den Automobilhersteller und an die Lieferanten. Die Lieferkette der Zulieferer ist so auszurichten, dass flexibel und kurzfristig auf die Abrufe der Hersteller reagiert werden kann. Um den Forderungen nach Flexibilität und Reaktionsfähigkeit zu genügen und gleichzeitig mit wettbewerbsfähigen Preisen zu agieren, sind Mechanismen zur kontinuierlichen Anpassung der Leistungserbringung an die Marktbedarfe über die gesamte Wertschöpfungskette so effizient wie möglich zu gestalten.

Im täglichen Betriebsablauf sind die Zielsetzungen der einzelnen Abteilungen eines Unternehmens oft divergierend. Gegenläufige Anforderungen, die sich aus der Unstetigkeit der Marktabrufe und der angestrebten Stetigkeit der Produktion ergeben, müssen harmonisiert und synchronisiert werden. Marktanforderungen und Reaktionsfähigkeit der Lieferkette über mehrere Stufen stellen ein Spannungsfeld dar, das gezielt über die Leistungssteuerung ausgeglichen werden muss. Die Planung und Steuerung ist von entscheidender Bedeutung, um die Leistung zu maximieren und das Gesamtsystem effizienter zu gestalten. Mit innovativen Systemen ist die Steuerung der Produktion sogar in Echtzeit möglich. Der Beitrag zeigt auf, auf welche Art das Zusammenspiel von Simulation und Optimierung dazu beitragen kann, diese Herausforderungen zu meistern, welche Voraussetzungen und Anforderungen an solche Systeme zu stellen sind und in welchem Kontext bereits erste Lösungen vorliegen.

## Literatur

- Bley H, Reinhart G, Seliger G, Bernadi M, Korne T (2004) Appropriate human involvement in assembly and disassembly. *Ann CIRP* 53:487–509
- Hu SJ, Ko J, Weyand L, ElMaraghy HA, Lien TK, Koren Y, Bley H, Chrystosouris G, Nasr N, Shpitalni M (2011) Assembly system design and operation for product variety. *Ann CIRP* 60:715–733
- Luenberger D (2003) *Linear and nonlinear programming*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- März L, Krug W (2010) Kopplung von Simulation und Optimierung. In: März L, Krug W, Rose O, Weigert G (Hrsg) *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Springer, Heidelberg, S 41–46
- Pinter J (1996) *Global optimization in action*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Pröpster M, März L, Reinhart G, Intra C (2015) Validation of line balancing by simulation of workforce flexibility. *Procedia CIRP* 33:93–98
- Rose O, Krug W (2010) Optimierung. In: März L, Krug W, Rose O, Weigert G (Hrsg) *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Springer, Heidelberg, S 21–S 28
- Stremler A, März L (2015) Chancen und Herausforderungen von Big Data in der Industrie. In: Dorschel J (Hrsg) *Praxishandbuch Big Data*. Springer, Wiesbaden, S 149–161
- Van Dijk NM, van der Sluis E (2008) Practical optimization by OR and simulation. *Simul Model Pract Theory* 16:1113–1122
- VDI (2014) *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen*. Beuth, Berlin
- VDI (2016) *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 12: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Simulation und Optimierung*. Gründruck. Beuth, Berlin
- Wenzel S (2010) *VDI-Richtlinien zur Modellbildung und Simulation*. In: Zülch G, Stock P (Hrsg) *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S 543–550



**Dr.-Ing. Lothar März** 1987 bis 1993 Studium Maschinenbau an der TU Darmstadt und Ingenieurwissenschaften an der Ecole Centrale de Lyon, Promotion am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart. Seit 1995 Führungs- und Beratungserfahrung u. a. bei Fraunhofer IPA, Dürr-Schenck Engineering und LOM Innovation. 2006 Gründung der Arbeitsgruppe Simulation und Optimierung innerhalb der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM). Vorstand CTO bei der STREMLER AG Supply Chain Engineering.



Steffen Masik, Thomas Schulze, Paul Greif und Marco Lemessi

## 26.1 Motivation

Visualisierung ist ein unverzichtbares Hilfsmittel bei der Validierung von Simulationsmodellen und der Präsentation von Simulationsergebnissen (Schmitz und Wenzel 2013). Basierend auf den Anforderungen aus der Fertigung sind Simulationsmodelle für Montageprozesse häufig durch einen hohen Detaillierungsgrad gekennzeichnet, um der gestiegenen Typenvielfalt und der Komplexität von Montagesystemen zu entsprechen. Die bisherigen und weitverbreiteten sowie oft schematischen 2D-Visualisierungen können die gestiegenen Anforderungen nicht mehr in allen Fällen abdecken.

Eine neue Möglichkeit ist die Anwendung von 3D-Visualisierungen auf der Basis von IVR (Industrial Virtual Reality) Techniken unter Einbeziehung vorhandener 3D-Montagelayouts, 3D-Produktmodellen sowie von aus Simulationsmodellen generierten Prozessabläufen. Ziel ist hierbei nicht die detaillierte Einbausimulation hinsichtlich der Montierbarkeit des Produktes, sondern die Visualisierung der Ablaufsimulationen an

---

S. Masik  
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, Magdeburg, Deutschland

T. Schulze (✉)  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: [thomas.schulze@ovgu.de](mailto:thomas.schulze@ovgu.de)

P. Greif  
Karlsruhe, Deutschland

M. Lemessi  
JOHN DEERE GmbH & Co. KG, Mannheim, Deutschland

den Stationen in Verbindung mit einer realitätsnahen Darstellung der Stationen, dem Montagezustand der Produkte einschließlich der bereitzustellenden Bauteile und Hilfsmittel sowie der Positionsveränderungen der Montagearbeiter. Diese Form der Visualisierung gestattet eine gute Evaluierung der simulierten Abläufe, die über die bekannten 2D-Standardvisualisierungen hinausgeht. Durch die Integration der generierten Simulationsdaten mit den existierenden 3D-Daten des Layouts und der Produkte lassen sich 3D-Visualisierungen der Montageprozesse (teil-)automatisiert erstellen.

Im Beitrag werden die Vorteile einer IVR-basierten 3D-Visualisierung von simulierten Montageprozessen und eine Methodik zur Erstellung von 3D-Visualisierungen von simulierten Montageprozessen erläutert. Das schließt eine Diskussion der Anforderungen an die bereitzustellenden Daten insbesondere mit dem Fokus auf Interoperabilität ein. Prototypische Implementierungen in einem Unternehmen des Fahrzeugbaus werden aufgezeigt. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungsarbeiten.

---

## 26.2 Industrial Virtual Reality

Mit VR (Virtueller Realität, Virtual Reality) wird die Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung von künstlich erzeugten, interaktiven virtuellen Welten bezeichnet. Dabei werden diese künstlichen Welten unter Beachtung physikalischer Eigenschaften in Echtzeit von Computern generiert. VR-Systeme werden in vielen Bereichen eingesetzt, wie beispielsweise als Trainingssimulatoren für Piloten und bei der Planung von Gebäuden und urbanen Infrastrukturen (Schenk et al. 2004). Im Allgemeinen wird auch ein hoher Immersionsgrad, also ein Verschwimmen der Grenzen von echter und virtueller Realität in der Wahrnehmung des Nutzers (Imagination), für virtuelle Realitäten vorausgesetzt. Technisch wird dieser Zustand insbesondere durch die Wiedergabe in abgeschlossenen, stereoskopischen Projektionssystemen erreicht. Head Mounted Displays (HMD) zur Darstellung virtueller Realitäten gewinnen wieder verstärkt an Bedeutung. Dabei handelt es sich um spezielle Brillen oder auch Helme, die von einem Nutzer getragen werden und mit Hilfe integrierter Displays direkt vor seinen Augen ein stereoskopisches Bild generieren.

IVR bezeichnet den Einsatz von VR im industriellen Bereich. Hierbei spielt Immersion nur eine untergeordnete Rolle. Stattdessen liegt der Fokus auf echtzeitfähiger und natürlicher Interaktion und hoher Dynamik des virtuellen Modells.

Interaktive funktionale 3D-Visualisierungen können die Planungsprozesse in der Industrie maßgeblich unterstützen. IVR wird eingesetzt als Hilfsmittel für die gewerkübergreifende Zusammenarbeit und Kommunikation, wie beispielsweise in der industriellen Produkt- und Prozessentwicklung durch Bereitstellung allgemein verständlicher Darstellungen komplexer Sachverhalte (Menck et al. 2013). Dazu sind heterogene Datensätze aus unterschiedlichen Planungs- und Simulationssystemen miteinander zu koppeln und in einem IVR-Modell zu integrieren.

Gegenwärtig erfolgt der Einsatz von IVR-Modellen häufig erst im letzten Drittel von industriellen Planungsprozessen, da benötigte Basisdaten vorher noch nicht in geeigneter

Form verfügbar, Schnittstellen unzureichend oder Erstellungs- bzw. Aktualisierungsaufwände zu groß sind. Über das Planungsstadium hinaus können diese IVR-Modelle beispielsweise für Marketing-, Dokumentations- oder Qualifizierungszwecke und auch in der operativen Planung oder für spätere Umplanungsmaßnahmen verwendet und erweitert werden.

Die Akzeptanz von IVR-Modellen ist sehr stark an die zeitlichen und monetären Aufwände für Datenerfassung, Erstellung und Aktualisierung der Modelle geknüpft, sodass es erforderlich ist, automatisierte bzw. teilautomatisierte Generierungsverfahren einzusetzen und grundsätzlich auf bereits vorhandene Datensätze zurückzugreifen (VDI 2009).

---

## 26.3 Vorteile von IVR-Modellen für die Montagesimulation

Ein Montagesimulationsmodell besteht im Allgemeinen aus den Objekten Station, Puffer, Werker, Montageprodukt, benötigten Bauteilen und Hilfsmitteln sowie den Montageschritten und den entsprechenden Zeiten zu deren Durchführung. Typische Ergebnisse dieser Simulationsmodelle sind Durchsatz pro Zeiteinheit und Warte- und Blockierzeiten an den einzelnen Stationen. Die klassische schematische 2D-Visualisierung stellt häufig nur Stationen, Puffer, Werker und Produkte dar.

Eine 2D-Visualisierung wird von den in der Fabriksimulation angewandten Simulationswerkzeugen wie beispielsweise Plant Simulation, Simio und FlexSim unterstützt. Visualisierungen auf diesem 2D-Niveau werden seit Jahren erfolgreich zur Darstellung des Materialflusses und zur Erkennung von Engpässen verwendet. Diese Form ist zur Visualisierung in frühen Fabrikplanungsphasen sehr gut geeignet.

Die Anwendung von IVR-Modellen von simulierten Montageprozessabläufen in der Fabrikplanung ermöglicht eine erweiterte Validierung integrierter Simulationsmodelle, die skalierbare Präsentation und gewerkübergreifende Prozessverbesserung sowie die Evaluierung von Planungsaspekten, die erst durch die ganzheitliche Verknüpfung und Dynamisierung der heterogenen statischen Ausgangsmodelle möglich werden. Diese Aspekte werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

### 26.3.1 Erweiterte Validierung von Simulationsmodellen

Im Simulationsmodell werden dem zu montierenden Produkt entsprechend der Prozessbeschreibung die notwendigen Arbeitsverrichtungen einschließlich der technologisch bedingten Reihenfolge an einer Station zugewiesen. Diese Arbeitsverrichtungen sind vom Werker auszuführen. Darüber hinaus sind die entsprechenden Bedingungen zur Ausführung wie das Vorhandensein eines Bauteils, einer Baugruppe oder eines Werkzeugs bekannt. Vielfach werden in den Montagesimulationsmodellen diese Arbeitsverrichtungen zu einem Arbeitspaket aggregiert. Die einzelnen Bedingungen für die Ausführung der Arbeitsverrichtungen werden zu einer Bedingung für die Ausführung des

Arbeitspaketes zusammengefasst. Diese Vereinfachung ist zum Erreichen der klassischen Ziele bei der Montagesimulation zulässig und bewirkt eine kürzere Laufzeit des Simulationsmodells.

Durch ein gezielt kontrolliertes Verzicht auf diese Aggregation für die Visualisierung und der Übertragung der jeweiligen Arbeitsverrichtungen in ein IVR-Modell wird eine signifikante Verbesserung in der Darstellung des Montagefortschritts auf der Basis der Arbeitsverrichtungen erreicht. Diese Visualisierung der Arbeitsverrichtungen einschließlich der Veränderungen am Montageprodukt ermöglicht eine erweiterte Validierung der simulierten Montagevorgänge besonders unter dem Aspekt einer hohen Typenvielfalt in der Montage. Denn die korrekte typbedingte Abbildung der Arbeitsverrichtungen im Simulationsmodell ist entscheidend für die Korrektheit und Akzeptanz der Ergebnisse.

### **26.3.2 Präsentation und Prozessverbesserung**

Eine große Bedeutung kommt der 3D-Visualisierung mittels IVR-Modellen bei der Präsentation von Planungsergebnissen zu (Choi et al. 2010). Die mittels IVR generierten Sichten geben nicht nur ein „reales“ Abbild der geplanten (virtuellen) Welt, sondern sie erlauben auch das Einbringen von zusätzlichen Informationen, die in einer „realen“ Welt nicht zu finden sind. Hierzu gehören beispielsweise Annotationen zum Anzeigen von Durchsatzraten und Objektinformationen sowie farbliche Hervorhebungen von überlasteten Bereichen. Besonders bei Montageprozessen können die Auswirkungen auf die gesamte Montagelinie dargestellt werden, die von Veränderungen der Arbeitsverrichtungen an einzelnen Stationen ausgelöst wurden.

Ein kollektives Betrachten der virtuellen Welt durch mehrere Beteiligte fördert das Finden von Prozessverbesserungen. Veränderungen am virtuellen Layout werden interaktiv vorgenommen und nach dem Neustart der Simulation schnell berücksichtigt.

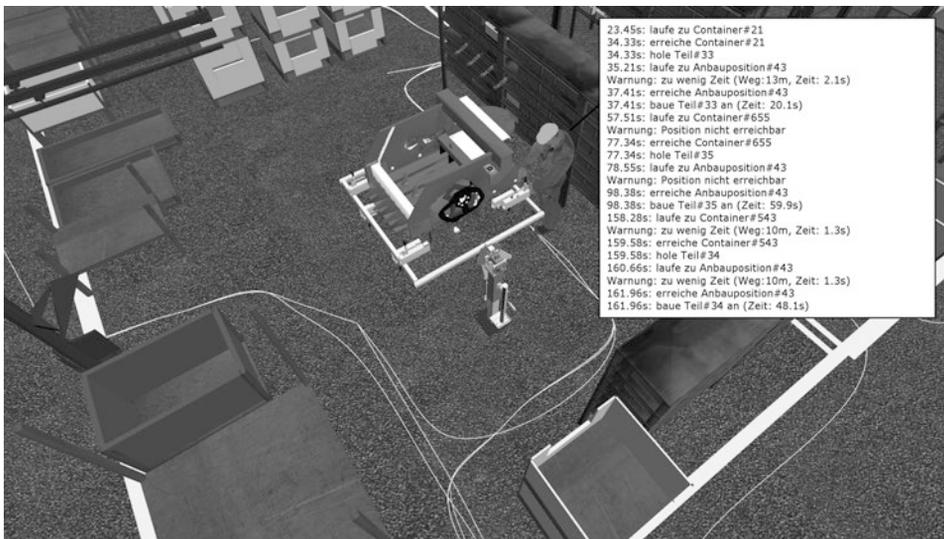
IVR-Modelle haben je nach Komplexität und den eingesetzten Visualisierungsmethoden mittlere bis sehr hohe Anforderungen an die zur Visualisierung genutzte Hardware. Es muss also darauf geachtet werden, dass die zur Visualisierung erzeugten IVR-Modelle in ihrer Komplexität und verwendeter Rendering-Technologie skalierbar sind, damit die Modelle auch auf weniger leistungsfähigen Rechnersystemen oder mobilen Systemen mit begrenzten Ressourcen verwendet werden können.

Skalierbarkeit bezüglich des zu verwendenden Visualisierungssystems ist eine wichtige Eigenschaft von IVR. Die Präsentation der 3D-Visualisierungen kann zum einen in speziellen Präsentationsräumen erfolgen, die mit einer leistungsstarken, meist verteilten Hardware zur Visualisierung und Simulation ausgestattet sind. Hierzu zählen Projektionswände, quadratische Projektionsräume (CAVE) und 360° Projektionseinrichtungen wie der ElbeDom in Magdeburg (Schoor et al. 2007). Diese Umgebungen verfügen in der Regel über stereoskopische Darstellungen mit hohen Auflösungen und kurzen Reaktionszeiten und erlauben so ein interaktives Betrachten der IVR-Modelle. Zum anderen sind auch Vor-Ort-Präsentationen – beispielsweise in der realen Fabrik – möglich. Zur Darstel-

lung können hierbei Tablet-Computer eingesetzt werden, die je nach Leistung die Bilder entweder direkt erzeugen oder von einem entsprechenden Server übertragen (Remote Rendering). Diese Hardware ermöglicht zwar keine tiefe Immersion, aber bei diesen Lösungen überwiegt der Vorteil des Vor-Ort-Betrachtens.

### 26.3.3 Evaluierung durch Verknüpfung unterschiedlicher Datenmodelle

Durch die dynamische Wegfindung erlauben es IVR-Modelle, die zurückgelegten Entfernungen der Werker während der simulierten Montageprozesse zu ermitteln, auszuwerten und mit den Vorgaben aus der Prozessplanung abzugleichen. Unterschiedliche Produktreihenfolgen und Varianten bedingen differenzierte Arbeitsverrichtungen und somit auch unterschiedliche Laufwege der Werker bei der Montage. Während diese Möglichkeit bei 2D-Simulationen grundsätzlich auch besteht, lassen sich durch die Nutzung von Lageinformationen von Regalen und benötigten Bauteilen sowie der Position der Montageobjekte die Laufweglängen auch unter Einbeziehung von unterschiedlichen Laufebenen bestimmen. Die zur Berechnung der Laufwege benötigten Informationen können direkt aus 3D-Planungssystemen übernommen werden. Somit ergeben sich für diesen Schritt keine zusätzlichen manuellen Modellierungsaufwände, wie sie in der Vergangenheit häufig notwendig waren. Aus den gesammelten Werten können arbeitsphysiologische Kennzahlen abgeleitet werden. Abb. 26.1 zeigt den zusätzlichen Erkenntnisgewinn durch die Verknüpfung von Simulationsergebnissen und CAD (Computer Aided Design) Daten in einem IVR-Modell am Beispiel der Laufweganalyse.



**Abb. 26.1** Beispiel einer Laufweganalyse im IVR-Modell



**Abb. 26.2** Beispiel einer Kollisionsprüfung im IVR-Modell

Durch die durchgehende Verwendung von 3D-Geometrien von Produktionsmitteln und Produkt sowie durch deren Verknüpfung mit den Prozessabläufen ist es möglich, Kollisionen zu untersuchen. Je nach Detaillierungsgrad eines IVR-Modells können hierbei auch verschiedene Produktvarianten und -konfigurationen sowie die unterschiedlichen Produktionsstufen im Kontext der jeweils betroffenen Produktionsumgebung betrachtet werden. Abb. 26.2 zeigt den Nutzen der Verknüpfung von Simulationsergebnissen und CAD-Daten im IVR-Modell am Beispiel einer Kollisionsprüfung. In diesem Bild sind die kollidierenden Objekte mit einem Pfeil markiert.

## 26.4 Komponenten von IVR-Modellen

Die Bestandteile eines IVR-Modells lassen sich in statische und dynamische Komponenten unterteilen. Üblicherweise bestehen statische Komponenten eines IVR-Modells einer Fabrik oder Anlage aus einer überschaubaren Anzahl von Datensätzen, wie z. B. den Architektur-, Fabrik- bzw. Anlagen-, Produkt- und Produktionsmittel- sowie Umgebungsmodellen. Diese Datensätze sind in der Regel mit CAD-Systemen erstellte Geometriemodelle und lassen sich mittels allgemeiner Austauschformate in guter Qualität in IVR-Modelle übertragen.

Dynamische Komponenten von IVR-Modellen, d. h. über der Zeit veränderliche Objekte, werden durch Integration und Verknüpfung einer Vielzahl unterschiedlicher Datensätze, wie z. B. Simulationsergebnisse, Prozessdefinitionen, Kinematiken, Steuerungslogiken und CAD-Metadaten gebildet. Insbesondere die von den Simulationsmodellen erzeugten Daten über die chronologische Reihenfolge der abgearbeiteten Ereignisse (Trace-daten) sind eine wesentliche Basis zur Durchführung von Veränderungen am Status des

IVR-Modells über der simulierten Zeit. Aufgrund der Vielzahl von in der industriellen Planung eingesetzten Softwaresystemen und fehlenden oder mangelhaften Schnittstellen ist die Integration dieser Datensätze jedoch häufig mit manuellen Aufwänden verbunden.

Integration und Zusammenführung heterogener Daten bedeutet, dass die Eigenschaften einer einzelnen physikalischen Entität über alle Datensätze hinaus verknüpft werden müssen. Die Verknüpfung unterschiedlicher Datenquellen ist komplex, da ubiquitär verwendete, eindeutige Kennungen häufig fehlen. Um gleiche Entitäten, die in unterschiedlichen Planungssystemen verschieden benannt wurden, dennoch über die einzelnen Datendomänen hinaus automatisiert miteinander zu verknüpfen, können Ähnlichkeiten in ihrer Benennung, Geometriestruktur, Hierarchie oder ihren Metadaten verwendet werden. Im Ergebnis dieser Verknüpfung ist eine semantische Interoperabilität der beteiligten Datenmodelle gewährleistet.

Je nach Planungsstand steht häufig nur eine Teilmenge der möglichen Ausgangsdaten zur Verfügung, trotzdem müssen jeweils möglichst detaillierte dynamische IVR-Modelle von Fabrikssystemen generiert werden können.

Während der verschiedenen Phasen des Produkt- und Fabriklebenszyklus entsteht in Montageanlagen eine Vielzahl unterschiedlicher Daten zum Produkt und Produktionsprozess. Diese Planungsdaten werden typischerweise durch unterschiedliche Fachbereiche erarbeitet und mithilfe unternehmensspezifischer Datenverwaltungsstrukturen abgelegt und verwaltet. Abb. 26.3 gibt einen Überblick über das Datenaufkommen während des Produkt- und Fabriklebenszyklus und ordnet die wichtigsten Simulationsaufgaben ein.

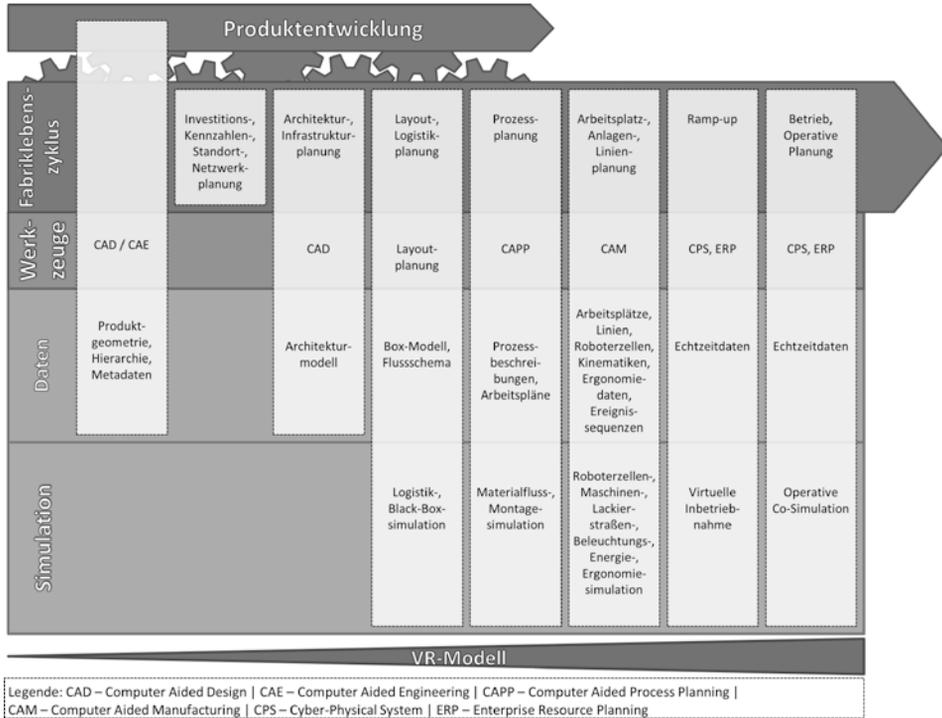
Obwohl die für IVR-Modelle benötigten Daten in den meisten Fällen in entsprechenden IT-Systemen digital vorliegen und als Grundlage für weitergehende und kombinierte Untersuchungen bzw. direkt zur Visualisierung und Diskussion wichtiger Fragestellungen genutzt werden könnten, werden diese häufig nicht direkt als Eingabe für Simulationsuntersuchungen bzw. Visualisierungen in nachgelagerten Planungsphasen verwendet. Gründe sind typischerweise Zugriffs-, Schnittstellen oder Integrationsprobleme, aus denen ein hoher manueller Mehraufwand für die Erstellung und Wartung von IVR-Modellen resultiert.

Daher ist es notwendig, entlang des Fabrikplanungsprozesses die für Planer relevanten Kombinationen von verfügbaren Datensätzen zu identifizieren und automatisierte Verfahren und Arbeitsabläufe zur Generierung und stufenweisen Detaillierung von IVR-Modellen bereitzustellen. Hierbei müssen relevante Daten automatisiert extrahiert und verknüpft werden, um beispielsweise Simulationsergebnisse nahtlos in ein Fabrikumfeld übertragen und integriert bewerten zu können.

---

## 26.5 Implementierung für Montageprozesse

IVR-Modelle von Arbeits- und Produktionssystemen müssen in der Lage sein, die zahlreichen während der Planung und beim Betrieb anfallenden heterogenen Daten zu integrieren. Zu den wichtigsten Daten zählen Geometrie-, Prozess- und Simulationsergebnisdaten. Eine beispielhafte Implementierung der heterogenen Daten mit dem Ziel einer 3D-Visualisierung aus IVR-Modellen wird im Folgenden beschrieben.

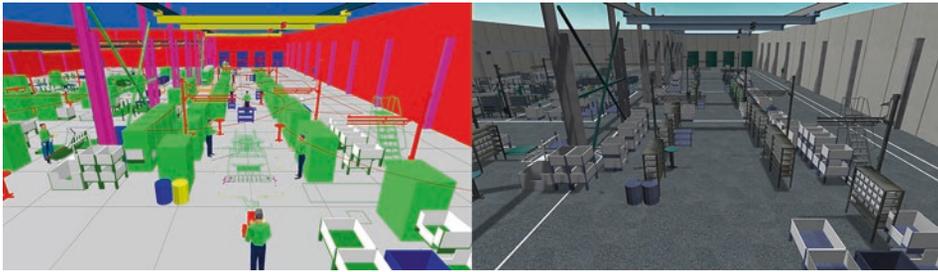


**Abb. 26.3** Werkzeuge, Daten und entsprechende Anwendungstypen von Simulationsmodellen im Fabriklebenszyklus

**26.5.1 Geometrische Modelle**

Geometrische Daten stammen wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt überwiegend aus CAD-Systemen und werden über gängige Austauschformate in IVR-Modelle übernommen. Nach der Übernahme der Daten in das IVR-Modell sind weitere Bearbeitungsschritte erforderlich, um daraus performante und optisch repräsentative Visualisierungen erzeugen zu können.

Realitätsnähe ist eine wichtige Zielsetzung für IVR-Modelle. Oft hat die visuelle Repräsentation von Objekten, die mit CAD-Systemen erstellt wurden, keinen Bezug zu ihrem realen Aussehen. In CAD-Systemen werden Farben vorwiegend verwendet, um Informationen über bestimmte Eigenschaften oder Zugehörigkeiten eines Objektes zu kodieren. Diese künstlichen Materialien können durch realistische Repräsentationen ersetzt werden, indem eine semi-automatische Zuweisung von Farben, Texturen oder erweiterten Materialien für z. B. reflektierende, blickrichtungsabhängige, variable oder flüssige Objekte aus einer Material- und Ressourcendatenbank erfolgt. Die Zuordnung der Materialien findet dabei automatisiert unter Zuhilfenahme bestimmter Kriterien, Benennungen oder Metakennungen (Schilling et al. 2006) statt. Abb. 26.4 zeigt ein Fabrikmodell vor (links) und nach der automatisierten Aufbereitung (rechts).



**Abb. 26.4** Fabrikmodell vor (links) und nach der Aufbereitung (rechts)

Geometrie und Hierarchie der Produkte und des Fabriklayouts sind in der Regel sehr detailliert, da sie während der Produktentwicklung und Fabrikplanung erstellt und aus den entsprechenden CAD-Systemen importiert werden. Zusätzlich führt die Umwandlung von nativen CAD-Geometrien, die auf Basis von BREP (Boundary Representation – Beschreibung der Objekte durch ihre Oberflächen) oder NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) definiert sind, zu sehr komplexen polygonbasierten Geometrien. Die Anforderungen an Interaktivität und Echtzeitfähigkeit erfordern daher die Reduktion der Geometrie- und Hierarchiekomplexität (Hoppe et al. 1993).

Zur Geometrievereinfachung können Verfahren verwendet werden, die auf bestimmten Fehlermetriken oder Komplexitätszielvorgaben basieren (Heckbert und Garland 1999). Diese Algorithmen können semi-automatisch angewandt werden, indem ihre Parametrisierung auf Basis bestimmter Objektinformationen (z. B. Größe, Lage, Benennung, Meta-Informationen) abgeleitet wird. Auch die Regularisierung oder vollständige Neuerzeugung der Geometrien mittels Neuvernetzung der Oberfläche (Surface Remeshing) ist im Fall komplexer und stark degenerierter Basisgeometrien sinnvoll (Fuhrmann et al. 2010).

Zusätzlich können während der Aufbereitung der Daten automatisch unterschiedliche Detaillierungsstufen der Geometrie generiert und für den späteren Betrachter nicht sichtbare Teile automatisch entfernt werden (Hidden-Surface-Removal). Die Reduktion der Komplexität und Optimierung der Objekthierarchie ist besonders wichtig für temporäre dynamische Objekte, da diese oft mehrfach instanziiert werden. So sind beispielsweise auf einer Montagelinie gleichzeitig 50 Produktinstanzen mit unterschiedlichen Geometrien – bedingt durch die Typenvielfalt – und unterschiedlichem Montagefortschritt darzustellen. Abb. 26.5 zeigt unterschiedliche Detaillierungsgrade einer Produktkomponente, die durch Vereinfachung unter Berücksichtigung eines jeweils festgelegten Fehlerkriteriums automatisch generiert wurden. Die Ausgangsgeometrie besteht aus 530.000 Polygonen, die reduzierten Modelle enthalten nur noch jeweils etwa 10, 5 und 3 % der Ausgangsmenge.

Die Qualität der Beleuchtungsberechnung bei der Darstellung von IVR-Modellen ist nicht nur für eine realistische Darstellung von großer Bedeutung, sondern kann auch als Grundlage für die Analyse der Beleuchtungssituation in Fabrikhallen und an Arbeitsplätzen dienen. Im Gegensatz zu klassischen Beleuchtungsverfahren erlaubt die globale



**Abb. 26.5** Durch Vereinfachung generierte Detaillevel einer Produktkomponente



**Abb. 26.6** IVR-Modell mit klassischer Beleuchtung (links) und mit globaler Beleuchtung (rechts)

Beleuchtungstechnik eine Berücksichtigung der Interaktionen der Lichtstrahlen mit den verschiedenen Oberflächen einer virtuellen Szene (Radax 2008). Während für die lokale Beleuchtung wenige Lichtquellen ausreichen, erfordert eine globale Beleuchtung eine an die Realität angelehnte Lichtquellenkonfiguration, die entweder manuell festgelegt oder automatisch aus den Planungssystemen übernommen werden kann (Papaioannou 2011). Abb. 26.6 zeigt einen Ausschnitt eines IVR-Modells mit klassischer (links) und mit globaler Beleuchtung (rechts).

### 26.5.2 Prozessmodell

Prozessmodelle repräsentieren die aus der Prozessplanung CAPP (Computer Aided Process Planning) stammenden Prozessbeschreibungen. Diese Beschreibungen enthalten unter anderem Informationen über Prozesszeiten, entsprechende Teile und Baugruppen, benötigte Werkzeuge und Produktionsmittel, beteiligte Werker und Roboter, zugeordnete Stationen oder Zellen sowie Gruppen- und Variantenzuordnungen. Ebenfalls können textuelle Beschreibungen der manuellen Arbeitsschritte enthalten sein. Einzelne Arbeitsvorrichtungen sind dabei eindeutig referenzierbar. Die benötigten Datensätze werden in der Regel in relationalen Datenbankmanagementsystemen gespeichert und können über Datenbankschnittstellen oder in Tabellenform exportierte Datenbankabfragen ausgetauscht werden. Abb. 26.7 zeigt Ausschnitte aus den Prozessbeschreibungen und die referenzier-

Filter	Tasklist	Task	Element	Description	Std Min	Position	Location	Part Number	Part Qty
	Tasklist	1325		Install LH Gullwing Shield Assembly with LH Hinge Weldment Bracket.		10	POSTL	850P0501	
	Task	1325	1	Get (1) LH Gullwing Shield from Rack attached (2) Point Sling to it with hoist attachment and lift with hoist. Position it to Main Frame LH Hinge Bracket.	1	POSTL	850P0501	afh207879	1
	Task	1325	2	Stock Up (4) Screws, (4) Nuts and (2) Spring locking Pins and (2) Hinge Lock Plate. Insert (1) Hinge Weldment Bracket Sub to the Gullwing Hinge Rod o	1	POSTL	850P0501	m4041	2
	Task	1325	2	Stock Up (4) Screws, (4) Nuts and (2) Spring locking Pins and (2) Hinge Lock Plate. Insert (1) Hinge Weldment Bracket Sub to the Gullwing Hinge Rod o	1	POSTL	850P0501	fh320914	2
	Task	1325	2	Stock Up (4) Screws, (4) Nuts and (2) Spring locking Pins and (2) Hinge Lock Plate. Insert (1) Hinge Weldment Bracket Sub to the Gullwing Hinge Rod o	1	POSTL	850P0501	14m7298	4
	Task	1325	2	Stock Up (4) Screws, (4) Nuts and (2) Spring locking Pins and (2) Hinge Lock Plate. Insert (1) Hinge Weldment Bracket Sub to the Gullwing Hinge Rod o	1	POSTL	850P0501	03m7185	2
	Task	1325	2	Stock Up (4) Screws, (4) Nuts and (2) Spring locking Pins and (2) Hinge Lock Plate. Insert (1) Hinge Weldment Bracket Sub to the Gullwing Hinge Rod o	1	POSTL	850P0501	03m7185	2
	Task	1325	3	Remove the Hoist attachment from the Shield and reattached the sling to bottom side of Shield. Lift Shield with Hoist on so it rotate on Hinge Bracket	1	POSTL	850P0501		
	Task	1325	4	Stock Up (1) Rod, (1) Tube (2) Bushings, (2) Nuts. Insert (1) Rod from left of LH Shield Bracket then Stick (1) Bushing on rod from inside of left brace	1	POSTL	850P0501	fh322161	1
	Task	1325	4	Stock Up (1) Rod, (1) Tube (2) Bushings, (2) Nuts. Insert (1) Rod from left of LH Shield Bracket then Stick (1) Bushing on rod from inside of left brace	1	POSTL	850P0501	fh322159	1
	Task	1325	4	Stock Up (1) Rod, (1) Tube (2) Bushings, (2) Nuts. Insert (1) Rod from left of LH Shield Bracket then Stick (1) Bushing on rod from inside of left brace	1	POSTL	850P0501	28h3405	2
	Task	1325	4	Stock Up (1) Rod, (1) Tube (2) Bushings, (2) Nuts. Insert (1) Rod from left of LH Shield Bracket then Stick (1) Bushing on rod from inside of left brace	1	POSTL	850P0501	14m7298	2
	Task	1325	5	Get (1) LH Gullwing Shield from Rack attached (2) Point Sling to it with hoist attachment and lift with hoist. Position it to Main Frame LH Hinge Bracket.	1	POSTL	850P0501	afh207879	1

**Abb. 26.7** Ausschnitte aus Prozessbeschreibungen und die dabei referenzierten Teile in der Produkthierarchie

ten Teile in der Produkthierarchie. Eine Nutzung dieser detaillierten Prozessbeschreibung ist notwendig, um beispielsweise den simulierten Montagefortschritt in der notwendigen Detailliertheit visualisieren zu können.

### 26.5.3 Simulationsmodelle

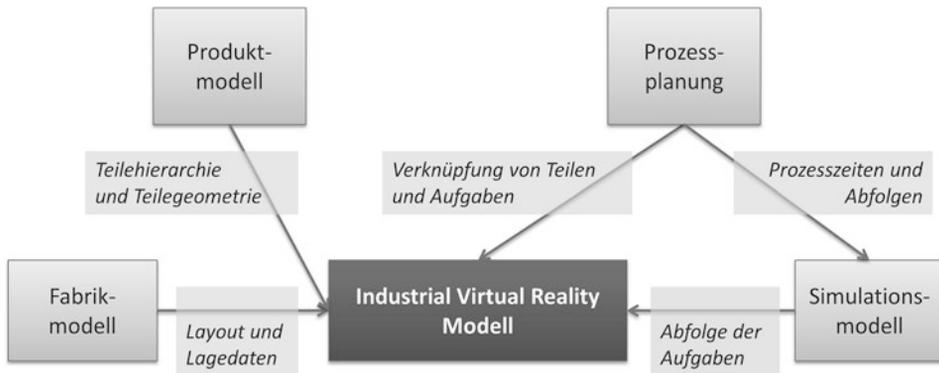
Simulationsergebnisse aus Montagesimulationsmodellen werden als Basis für die Dynamik in IVR-Modellen verwendet. Da standardisierte Dateiformate für die Übertragung von Simulationsergebnissen bisher fehlen, werden proprietäre Formate zum Austausch eingesetzt.

Diskrete Simulationswerkzeuge exportieren in der Regel eine chronologisch sortierte Beschreibung aller im Simulationslauf aufgetretenen Ereignisse (Trace). Diese Aufzeichnung ist eine wesentliche Datenquelle zur Visualisierung von dynamischen Montageprozessen.

### 26.5.4 Integration

Die Integration der einzelnen Datenmodelle muss nur manuell konfiguriert werden und erfolgt anschließend automatisiert, da diese Aufgabe zum einen sehr komplex ist und manuelle Aufwände bei Erstellung von IVR-Modellen aus Kosten- und Zeitgründen minimiert bzw. vermieden werden müssen.

Die Erstellung detaillierter IVR-Modelle von manuellen oder automatisierten Montageprozessen benötigt zusätzlich detaillierte Informationen über die ablaufenden Prozesse, da weder das Simulationsmodell noch die Geometriemodelle die notwendigen Informationen enthalten. Das Simulationsmodell ist oft nicht detailliert genug, um beispielsweise die



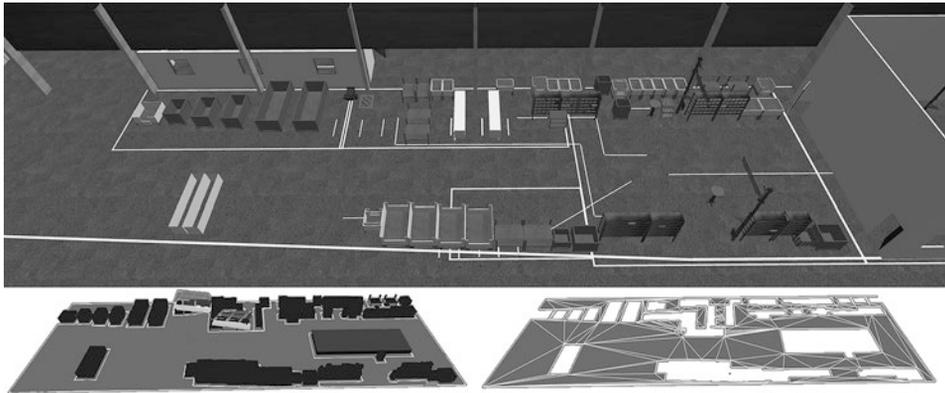
**Abb. 26.8** Überblick auf Verknüpfungen der beteiligten IVR-Modellkomponenten

Montage einzelner Teile oder die dabei benötigten Werkzeuge zu berücksichtigen. Im Gegenzug enthält das Produktmodell keine Informationen über die Verknüpfung von Teilegeometrien und individuellen Arbeitsprozessen.

Importierte Prozessdefinitionen schließen diese Informationslücken und ermöglichen die Verknüpfung von Simulationsergebnissen mit Produkt- und Produktionsmittelgeometrien. Zusätzlich liefern Informationen aus dem Fabrikmodell die benötigten Lagedaten von im Simulationsmodell referenzierten Positionen, beispielsweise von Stationen, Lagern und Regalen. Abb. 26.8 gibt einen Überblick auf Verknüpfungen der beteiligten IVR-Modellkomponenten.

Die Bewegung von ortsveränderlichen Objekten wie Produkten, Produktionsmitteln und Werkern in IVR-Modellen erfolgt auf Pfadobjekten. Diese einzelnen Pfade werden zu einem Netzwerk zusammengefasst. Hierzu können statische oder dynamische Netzwerke verwendet werden. Statische Netzwerke werden aus den verfügbaren Datenquellen wie z. B. CAD/CAM-Systemen (CAM: Computer Aided Manufacturing) oder Simulationsmodellen generiert oder manuell erstellt. Diese Netzwerke verändern sich nicht während der Simulation bzw. Visualisierung. Da alle Pfade in einem statischen Netzwerk vor der Visualisierung definiert sind, eignen sich diese Netzwerke nicht für veränderliche Layouts und Prozessbeschreibungen.

Dynamische Netzwerke bestimmen die Pfade unter Verwendung von Methoden der automatischen Wegfindung (Snook 2000). Abb. 26.9 zeigt ein Beispiel für die automatisierte Generierung eines sogenannten Navigationsnetzes zur dynamischen Wegfindung (Tozour und Austin 2002) innerhalb einer Station (im Bild oben). Dazu werden zuerst Hindernisse und nicht begehbare Bereiche identifiziert (im Bild links unten) und im nächsten Schritt aus dem erzeugten Navigationsnetz entfernt (im Bild rechts unten). Aufgrund des höheren Rechenaufwandes und der Echtzeitanforderungen von IVR-Modellen ist es jedoch wichtig, einen Mittelweg zwischen Detaillierung und Effizienz zu finden. Automatische Wegfindung benötigt neben dem klassischen Fabriklayout zusätzliche Kontext-



**Abb. 26.9** Generierung eines Navigation Meshes zur dynamischen Wegsuche

informationen (Toll et al. 2011), um z. B. Ebenen, Treppen, Aufzüge oder Hindernisse eindeutig zu identifizieren (Fischer et al. 2010).

Verrichtungen der Werker können entweder unter Verwendung von Bewegungszeichnungsverfahren (Motion Capturing) empirisch erfasst oder mithilfe von Softwarewerkzeugen modelliert werden. Atomare Einheiten typischer manueller Arbeits- und Bewegungsabläufe werden in Bibliotheken gespeichert und nach Bedarf zu komplexen Animationen kombiniert. Die Vielfältigkeit der abgelegten Bewegungen kann von einfachen Laufanimationen bis hin zu komplexen Montageanimationen reichen. Um Menschmodelle realistisch animieren zu können, muss das Skelett mit Knochen, Transformationen und Gewichtungen zu verschiedenen Zeitpunkten beschrieben werden (Terzopoulos 2010). Darauf aufbauend erfolgt die Zuordnung des definierten Skeletts zum sichtbaren Oberflächennetz des Menschmodells und damit verbunden dessen dynamische Verformung basierend auf der sich ändernden Skeletttransformation während der Animation. Dieser Vorgang wird als Skinning bezeichnet und erfolgt beispielsweise mit dem Dual Quaternion Blending (Kavan et al. 2006).

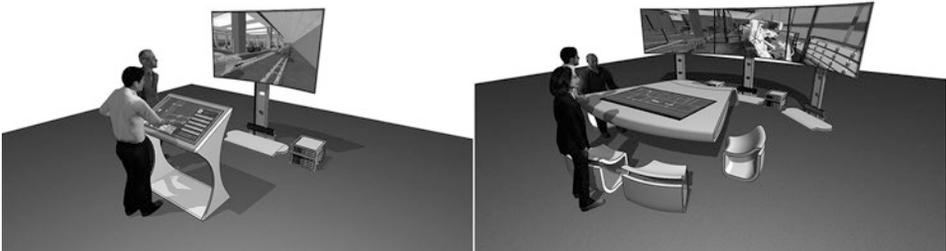
Abb. 26.10 zeigt beispielhaft das Ergebnis dieser Datenintegration, ein aus heterogenen Ausgangsdaten automatisiert erzeugtes IVR-Modell einer Montagelinie.

## 26.6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel diskutiert die Möglichkeiten zur automatisierten Erzeugung von IVR Modellen von simulierten Montagesystemen parallel zum industriellen Planungsprozess. Der Fokus liegt einerseits auf der Analyse von potenziellen Datenquellen, um das Detaillevel der resultierenden Modelle zu erhöhen und Informationslücken zu schließen. Andererseits werden Möglichkeiten zur automatisierten Verknüpfungen dieser Datenquellen vorgestellt, um manuelle Aufwände bei der Erzeugung und Aktualisierung dieser Modelle zu



**Abb. 26.10** Beispiel für ein IVR-Modell einer Montagelinie



**Abb. 26.11** Beispielkonfigurationen von Darstellungssystemen für IVR-Modelle

reduzieren. Die beschriebene Vorgehensweise wurde bereits im Rahmen zahlreicher Pilotstudien in verschiedenen Bereichen der Vor- und Endmontage von Nutzfahrzeugen getestet und systematisch weiterentwickelt.

Weiterführende Arbeiten beschäftigen sich zum einen mit der weiteren Verfeinerung des IVR-Modells durch eine Integration von detaillierten Montageanimationen aus entsprechenden Ergonomie- und Prozessmodellierungswerkzeugen einschließlich der für die Montage benötigten Werkzeuge und Hilfsmittel. Zum anderen müssen Darstellungssysteme entwickelt werden, die für die Arbeit mit IVR-Modellen in besonderem Maße geeignet sind und den entsprechenden Anforderungen an Vernetzung, Berechnungskapazität, Interaktivität und Immersion gerecht werden. Abb. 26.11 zeigt Beispielkonfigurationen einerseits als Einzelarbeitsplatzsystem (im Bild links) und andererseits als Mehrbenutzer-system zur Förderung von Kommunikation und Kollaboration (im Bild rechts).

## Literatur

- Choi S, Jo H, Boehm S, Do Noh S (2010) ONESVIEW: an integrated system for one-stop virtual design review. *Concurrent Engineering: Research and Applications* 18:75–91. <https://doi.org/10.1177/1063293X10361624>
- Fischer M, Renken H, Laroque C, Schaumann G, Dangelmaier W (2010) Automated 3D-motion planning for ramps and stairs in intra-logistics material flow simulations. In: Johansson B, Jain S, Montoya-Torres J, Hagan J, Yücesan E (Hrsg) *Proceedings of the winter simulation conference 2010*. IEEE, Piscataway, S 1648–1660. <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5678906>
- Fuhrmann S, Ackermann J, Kalbe T, Goesele M (2010) Direct resampling for isotropic surface re-meshing. In: Koch R, Kolb A, Rezek-Salama C (Hrsg) *Vision, modeling and visualization conference*. Genf, Eurographics Association, S 9–16. <https://doi.org/10.2312/PE/VMV/VMV10/009-016>
- Heckbert P, Garland M (1999) Optimal triangulation and quadric-based surface simplification. *Journal of Computational Geometry: Theory and Applications* 14:49–65. [https://doi.org/10.1016/S0925-7721\(99\)00030-9](https://doi.org/10.1016/S0925-7721(99)00030-9)
- Hoppe H, Deroose T, Duchamp T, McDonald J (1993) Mesh optimization. 20. In: Whitton M (Hrsg) *Conference on computer graphics and interactive techniques SIGGRAPH*. ACM, New York, S 19–26. <https://doi.org/10.1145/166117.166119>
- Kavan V, Collins S, O’Sullivan C (2006) Dual quaternions for rigid transformation blending. Technical report TCD-CS-2006-46. Trinity College, Dublin
- Menck N, Weidig C, Aurich J (2013) Virtual reality as a collaboration tool for factory planning based on scenario technique. *Procedia CIRP* 7:133–138. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.023>
- Papaioannou G (2011) Real-time diffuse global illumination using radiance hints. In: Spencer S (Hrsg) *ACM SIGGRAPH symposium on high performance graphics*. ACM, New York, S 15–24. <https://doi.org/10.1145/2018323.2018326>
- Radax I (2008) Instant Radiosity for Real-Time Global Illumination. Institute of Computer Graphics and Algorithms. Vienna University of Technology. <https://old.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2008/radax-2008-ir/radax-2008-ir-paper.pdf>. Zugegriffen am 7.03.2016
- Schenk M, Blümel E, Straßburger S, Hintze A, Sturek R (2004) Produktivitätssteigerung durch Virtual Reality-basierte Dienstleistungen. In: Neugebauer R (Hrsg) 4. Chemnitzer Produktionstechnisches Kolloquium. Verlag Wissenschaftliche Scripten, Zwickau, S 381–394
- Schilling A, Kim S, Weissmann D, Tang Z, Choi S (2006) CAD-VR geometry and meta data synchronization for design review applications. *J. Zhejiang Univ.-Sci. Journal* 9:1482–1491. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A1482>
- Schmitz M, Wenzel S (2013) Using 3D visualization in the context of discrete-event simulation – significance and development trends. In: Dangelmaier W, Laroque C, Klaas A (Hrsg) 14. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, S 373–383
- Schoor W, Masik S, Hofmann M, Mecke R, Müller G (2007) Elbe Dom: 360 degree full immersive laser projection system. In: Fröhlich B, Blach R, van Liere R (Hrsg) *Virtual environments conference IPT-EGVE*. Eurographics Association, Genf, S 15–20. <https://doi.org/10.2312/PE/VE2007Short/015-020>
- Snook G (2000) Simplified 3D movement and pathfinding using navigation meshes. In: DeLoura M (Hrsg) *Game programming gems*. Newton Centre, Charles River Media, S 288–304
- Terzopoulos D (2010) Simulating humans and lower animals. In: Boulic R, Chrysanthou Y, Komura T (Hrsg) *Motion in games conference*. Springer, Berlin/Heidelberg, S 1–10. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16958-8>

- Toll W, Cook FA, Geraerts R (2011) Navigation meshes for realistic multi-layered environments. In: Amato N (Hrsg) International conference on intelligent robots and systems. IEEE, New York, S 3526–3532. <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094790>
- Tozour P, Austin IS (2002) Building a near-optimal navigation mesh. AI game programming wisdom. Charles River Media, Newton Centre
- VDI (2009) VDI Richtlinie 3633 Blatt 11: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Simulation und Visualisierung. Beuth, Berlin



**Steffen Masik** Studium der Computervisualistik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) in Magdeburg. Seit 2007 verantwortlich für das 360° Mixed Reality Labor Elbedome im Virtual Development and Training Centre VDTC des Fraunhofer IFF. Seit 2012 stellvertretender Leiter des Geschäftsfeldes Virtuell-Interaktives Training und seit 2016 auch Leiter der Geschäftsstelle Elbedome 2.0.



**Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Schulze** Nach dem Studium der Fabrikplanung an der damaligen TH Magdeburg wissenschaftlicher Mitarbeiter von 1974 bis 1978. Nach der Promotion auf dem Gebiet der Fabrikplanung wissenschaftlicher Mitarbeiter in einer Forschungsgruppe zur Modellierung sozio-ökonomischer Prozesse. 1991 Habilitation auf dem Gebiet der Angewandten Informatik und tätig an der Fakultät für Informatik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Von 2005 an Leiter des Kompetenzzentrums Simulation am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) in Magdeburg. Seit 2005 Professur an der Fakultät für Informatik an der Universität Magdeburg.



**Paul Greif** Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Universität Karlsruhe und 1985 Abschluss als Diplom-Wirtschaftsingenieur. Beginn der Tätigkeit bei John Deere. Seit dieser Zeit Tätigkeiten auf mehreren Positionen in operativen und strategischen Bereichen der Logistik, Fabrik- und Arbeitsplanung mehrerer Fabriken und des zentralen europäischen Ersatzteilelagers sowie der globalen John Deere IT-Organisation. Seit 2010 verantwortlich in der Abteilung Advanced Manufacturing Innovation für das Thema Digital Manufacturing. In dieses Aufgabengebiet fallen die strategischen Entwicklungen von John Deere zu Virtual Reality, Augmented Reality sowie Virtuelle Fabrik- und Werkzeugplanung.



**Dr. Marco Lemessi** Im Jahre 1998 erhielt er den Master in Civil Engineering von der Universität von Rom La Sapienza. Von 1998 bis 2002 Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität von Rom verbunden mit einer Tätigkeit in verschiedenen EU-Projekten zum Thema Logistik. In dieser Zeit wurden eigenständige Lehrveranstaltungen zur Logistik und Simulation an den Universitäten Perugia und Rom gehalten. 2002 erfolgte die Promotion an der Universität von Rom La Sapienza auf dem Gebiet des Transportation Engineering. Seit 2002 Mitarbeiter im Simulationsteam von John Deere und seit 2011 Manager des Corporate Simulation Teams bei John Deere.



Gottfried Mayer, Carsten Pöge, Sven Spieckermann  
und Sigrid Wenzel

Die Vielfalt der Anwendungsfälle in diesem Buch zeigt in beeindruckender Weise Breite und Tiefe des Einsatzes der ereignisdiskreten Simulation in der Automobilindustrie. Zahlreiche Automobilhersteller haben diese Ablaufsimulation zu einem festen Bestandteil ihrer Planungsprozesse gemacht. Bei so gut wie allen Produktions- und Logistikprozessen gibt es nicht nur Beispiele für einzelne Simulationsstudien, vielmehr ist der regelmäßige Simulationseinsatz bei jeder Neu- oder Umplanung Stand der Technik. Kaum eine andere Technologie unterstützt heute so gut wie Simulation dabei, geplante Abläufe allen Beteiligten transparent zu machen, Unzulänglichkeiten in der Planung frühzeitig zu erkennen und schnell ein tiefgreifendes Verständnis für die Prozesse in Produktions- und Logistiksystemen zu erarbeiten.

Daher ist zu erwarten, dass in der Automobilindustrie dieser hohe Durchdringungsgrad in den nächsten Jahren weiter zunehmen wird. Wie zahlreiche Beiträge in diesem Buch

---

G. Mayer  
BMW AG, München, Deutschland

C. Pöge  
Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg, Deutschland

S. Spieckermann  
SimPlan AG, Hanau, Deutschland

S. Wenzel (✉)  
FG Produktionsorganisation und Fabrikplanung, Universität Kassel, Kassel, Deutschland  
E-Mail: [s.wenzel@uni-kassel.de](mailto:s.wenzel@uni-kassel.de)

verdeutlichen, arbeiten viele Unternehmen intensiv daran, die Effizienz bei der Durchführung von Simulationsstudien weiter zu erhöhen, beispielsweise durch eine Reduzierung des Aufwands bei der Handhabung von Eingangs- und Ergebnisdaten, durch die (teil-) automatische Generierung von Modellen oder durch Standardisierungen im Modellierungsprozess. Die so erzielbaren Effizienzsteigerungen werden den Simulationseinsatz noch kostengünstiger machen und die Bearbeitungszeiten für Simulationsstudien weiter verkürzen. Gleichzeitig wächst der Durchdringungsgrad auch deshalb, weil die Anzahl der Unternehmen, in denen sich die Technologie etabliert, zunehmen wird. Während die Durchführung von Simulationsstudien bei Fahrzeugherstellern und großen Lieferanten heute Standard ist, liegt bei kleineren Lieferanten noch Potenzial für verstärkte Anwendung von Simulation.

Hinsichtlich eines technologischen Ausblicks auf die Entwicklung der eingesetzten Simulationssoftware in den kommenden Jahren ist eine naheliegende Versuchung, die Trends der vergangenen Jahre fortzuschreiben. In den letzten zwei Jahrzehnten hat es allerdings eher inkrementelle Fortschritte bei der Entwicklung der Simulationswerkzeuge gegeben. Die Handhabung der Software wurde an moderne Konzepte zur Bedienung und zur ergonomischen Oberflächengestaltung angepasst, neue Import- und Exportschnittstellen wurden implementiert und die 3D-Visualisierung verstärkt in die Werkzeuge integriert. Grundlegende konzeptionelle Neuerungen oder Veränderungen waren eher die Ausnahme. Auch für die nächsten Jahre ist es durchaus möglich, dass die zukünftigen Entwicklungen diesem Muster folgen und die Funktionalitäten der Software und die Anzahl der Anwender in relativ unspektakulärer Weise weiter wachsen.

Eine solche Trendaussage geht allerdings davon aus, dass sich Simulationseinsatz und Simulationstechnologie in einem relativ stabilen technologischen und organisatorischen Umfeld weiterentwickeln können, aber das ist keineswegs selbstverständlich. Mayer und Mieschner (2017) weisen in einem Artikel über den Einfluss der Aktivitäten rund um die Initiative „Industrie 4.0“ darauf hin, dass der Zeitdruck für die Durchführung von Simulationsstudien zunimmt. Die Zeit, die für ein Planungsprojekt zur Verfügung steht, ist im Laufe der letzten Jahre immer kürzer geworden, während die Zeit für die entsprechende Simulationsstudie – allen Effizienzgewinnen zum Trotz – nicht im gleichen Maße verkürzt werden konnte. Das birgt das Risiko, dass auf Simulationseinsatz verzichtet wird, weil in Zukunft nicht mehr ausreichend Zeit für die Durchführung einer Simulationsstudie eingeplant werden kann.

Noch ist nicht abzusehen, wie sich neue Entwicklungen, die heute unter Begriffen wie „Industrie 4.0“, „Digitalisierung“ oder „Digitale Transformation“ zusammengefasst werden, auf die Ablaufsimulation auswirken (vgl. hierzu Wenzel et al. 2018). Dabei ist Ablaufsimulation selbst wesentlicher Bestandteil der Digitalisierung, da sie digitale Modelle von Produktions- und Logistiksystemen bereitstellt. Möglicherweise ergeben sich in den kommenden Jahren aber auch neue oder erweiterte Synergien zwischen Simulation und Methoden wie Optimierung, Process Mining oder Maschinellem Lernen. Gleichzeitig

besteht aber auch das Risiko, dass sich hier zumindest zum Teil Substitutionseffekte ergeben können. Dabei spielt auch eine Rolle, dass einige andere Technologien allein durch die große Anzahl der weltweit daran arbeitenden Entwickler rasantere Fortschritte machen könnten als Simulation.

Dass Fortschritte in der Methodenentwicklung für ganz andere Anwendungsfelder auch eine Chance für die industrielle Anwendung sind, zeigen die Entwicklungen zur 3D-Visualisierung in der ereignisdiskreten Simulation. Für die 3D-Visualisierung ist seit vielen Jahren die Spieleindustrie der Motor der Erneuerung. Gleichwohl werden diese Entwicklungen nutzbringend in heutige Simulationswerkzeuge eingebracht. Softwarehersteller, Dienstleister und Simulationsanwender müssen daher auch in den nächsten Jahren über den Tellerrand schauen und neue Technologien hinsichtlich ihrer Verwendung in der industriellen Anwendung prüfen. Davon unabhängig bleibt aber festzuhalten: Simulation ist auf Sicht die einzige Methode, die es dem Anwender erlaubt vorherzusagen, wie das zeitliche Verhalten und damit die Dynamik eines (ggf. noch gar nicht gebauten) Produktions- oder Logistiksystems auch unter stochastischen Einflüssen sein werden. In Anlehnung an das Motto einer großen Simulationstagung vor einigen Jahren ist und bleibt die Simulation eine wichtige Methode, um „Erfahrungen aus der Zukunft“ zu gewinnen.

---

## Literatur

Mayer G, Mieschner M (2017) Industrie 4.0 – Chance oder Risiko für die Ablaufsimulation. In: Wenzel S, Peter T (Hrsg) Simulation in Produktion und Logistik 2017. Kassel University Press, Kassel, S 1–8

Wenzel S, Stolipin J, Jessen U (2018) Ablaufsimulation in Industrie 4.0: Handlungsfelder für die industrielle digitale Transformation. *Industrie 4.0. Management* 34:29–32



**Gottfried Mayer** Seit 1990 Mitarbeiter der BMW AG. Nach einer Ausbildung zum Industrieelektroniker Fachbereich Produktionstechnik folgte die Instandhaltung im Karosseriebau. Von 1994–1997 nebenberufliche Ausbildung zum Techniker der Elektronik mit Fachbereich Datenverarbeitungstechnik. 1996 Wechsel zur übergeordneten Steuerungstechnik mit Schwerpunkt BDE-Systeme. Seit 1999 im Bereich der Ablaufsimulation, zuerst Karosseriebau Werk München, danach Karosseriebauten weltweit bis hin zur Verantwortung über alle Gewerke. Seit 2011 in der BMW Group IT verantwortlich für die Themenfelder Simulation, virtuelle Produktion und Digitale Fabrik. Seit 2018 IT Projektleiter Additive Manufacturing. Von 2005 bis 2018 Mitglied und Sprecher der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation im Verband der Automobilindustrie (VDA).



**Carsten Pöge** Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg mit dem Abschluss Diplom-Kaufmann. Seit 2001 bei der Volkswagen AG am Standort Wolfsburg in der Konzern IT tätig und zunächst verantwortlich für die Themen Ablaufsimulation, Betriebsmittelbibliotheken und Systembebauungsplanung. Seit 2006 im Programm Digitale Fabrik IT-Projektleitung für die Methode Ablaufsimulation. Seit 2005 Mitglied und seit 2008 zweiter Sprecher der Arbeitsgruppe Ablaufsimulation im Verband der Automobilindustrie (VDA).



**Dr. Sven Spieckermann** Jahrgang 1967, seit dem Abschluss seines Studiums der Wirtschaftsinformatik an der TU Darmstadt im Jahr 1994 Berater und Projektleiter Simulation bei der SimPlan Gruppe. 1997 Berufung in die Geschäftsleitung und heute Sprecher des Vorstands der SimPlan AG. Promotion über Simulations- und Optimierungsaufgabenstellungen im Jahr 2002 an der TU Braunschweig. Lehrbeauftragter für Simulation an den Technischen Universitäten in Braunschweig, Darmstadt und Karlsruhe (KIT).



**Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel** Nach dem Studium der Informatik an der Universität Dortmund wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen der Universität Dortmund von 1986–1989 und am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund, von 1990–2004; in dieser Zeit 1998 Promotion an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Rostock sowie 2001–2004 Geschäftsführerin des Sonderforschungsbereichs SFB 559 „Modellierung großer Netze in der Logistik“ an der Universität Dortmund. Seit 5/2004 Professorin an der Universität Kassel und Leiterin des Fachgebietes Produktionsorganisation und Fabrikplanung; u. a. Sprecherin der Fachgruppe Simulation in Produktion und Logistik sowie im Vorstand der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), Mitglied im Fachbeirat in der Gesellschaft für Produktion und Logistik des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI-GPL). Leiterin des VDI-Fachausschusses 204 Modellierung und Simulation.