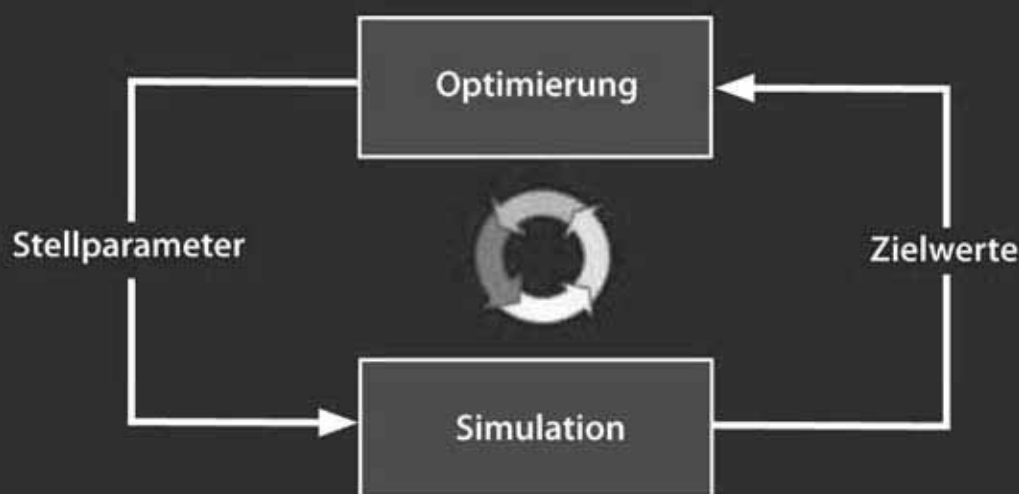


Lothar März · Wilfried Krug  
Oliver Rose · Gerald Weigert (Hrsg.)

# Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik

Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen



# Vorwort

Seit inzwischen mehr als 30 Jahren werden im deutschsprachigen Raum Simulationsverfahren zur Planung von Produktions- und Logistiksystemen eingesetzt. Zu Beginn dieser Entwicklung waren es Simulations- und größtenteils auch Programmierexperten, die derartige Systeme mittels Rechnerverfahren modellierten. Basierend auf ihrem Expertenwissen und vielfach unterstützt durch ein Planungsteam aus dem Produktions- und Logistikbereich versuchten sie dann, die anfänglichen Planungslösungen durch Modifizieren der Modelle zu verändern, wobei Irrwege und Sackgassen die Regel und systematisches Vorgehen eher die Ausnahme waren. Diese Vorgehensweise gemäß Versuch und Irrtum wurde dann oftmals als „Optimierung“ bezeichnet. In bemerkenswerter Weise hat sich diese Bezeichnung im Zusammenhang mit der Nutzung von Simulationsverfahren bei den Planungsingenieuren über die Jahrzehnte hinweg erhalten und findet sich heute noch nicht nur im Sprachgebrauch, sondern auch in Hochglanzbroschüren und auf Internetseiten von Softwarehäusern und Beratungsunternehmen wieder.

Hier ist jedoch Vorsicht geboten: Verwendet man den Begriff „Optimierung“ im Sinne des Operations Research, so stellt sich zunächst die Frage, welches Ziel oder sogar welches Zielsystem aus mehreren Einzelzielen bestmöglich erreicht werden soll. Diesbezüglich wird im Anwendungsfall von Produktions- und Logistiksystemen sehr schnell deutlich, dass vielfach mehrere konkurrierende Ziele möglichst gut erreicht werden sollen; Beispiele hierfür wie „Auslastung der Betriebsmittel“ und „Durchlaufzeit der Aufträge“ lassen sich sehr leicht finden. Gerade die Überprüfung der Zielerreichung im Hinblick auf derartige produktionsorganisatorische und logistische Ziele ist es, die im Zentrum der Simulationsanwendung steht. Dabei ergibt sich dann aber das Problem, wie die Erreichung verschiedenartiger Ziele in einem formalen Ausdruck zusammengefasst werden kann, erst recht dann, wenn das verwendete Simulationsverfahren auch noch Auskunft über die Erreichung kostenbezogener oder sogar personalorientierter Ziele liefern kann. Die vielfach dazu verwendete additive Präferenzfunktion ist nur eine von mehreren Möglichkeiten und weist dazu noch den Nachteil auf, dass sich unterschiedliche Zielerreichungsgrade bei den verwendeten Kriterien mehr oder weniger gewollt aggregieren oder auch kompensieren können. Demgegenüber erscheint es dann oftmals besser, die für die Auswahl einer Planungslösung wichtigsten Ziele nicht miteinander zu verrech-

nen, sondern sie mit ihren simulativ ermittelten Werten einem Diskussionsprozess in einem Entscheidungsgremium zu unterwerfen. Alternative Bewertungsansätze nach dem Prinzip der Vektoroptimierung, z. B. nach einer lexikographischen Präferenzfunktion, finden – abgesehen von Anwendungen aus dem Wissenschaftsbereich – bei Planungsprojekten kaum eine Anwendung.

Als nächstes stellt sich die Frage, welche Parameter eines Produktions- oder Logistiksystems überhaupt im Sinne einer Optimierung verändert werden können. Hier kommt zunächst wieder das Erfahrungswissen der Planer zum Tragen, wobei die Art und Anzahl der eingesetzten Betriebsmittel traditionell an zentraler Stelle stehen. Der Personaleinsatz wird – abgesehen von manuellen Montagesystemen – in der Regel als nachrangig betrachtet, obwohl allseits vom Stellenwert des Menschen für die Produktivität in Betrieben gesprochen wird und es durchaus Möglichkeiten gibt, die Anzahl und Qualifikation der im geplanten System eingesetzten Personen zu modellieren und die Effekte bei variierendem Personaleinsatz simulativ zu ermitteln. Der Einfluss weiterer Gestaltungsparameter, z. B. hinsichtlich der Pufferkapazitäten oder der Schichtbesetzung, lässt sich zumindest in einer Reihe simulierter Szenarien ermitteln. Bei systematischer Vorgehensweise bedient man sich der Methoden der statistischen Versuchsplanung, die nicht nur die Effekte einzelner Parameter, sondern auch die Wechselwirkungen mehrerer davon ausweisen können.

Schließlich lehren die Methoden des Operations Research, dass es einer algorithmischen Vorgehensweise bedarf, die quasi automatisiert zu einem im Sinne des Zielsystems optimalen oder zumindest zu einer nahezu optimalen Gestaltungslösung führt, und zwar (möglichst) ohne einen Eingriff des Planers in das Optimierungsverfahren. Eine traditionelle Möglichkeit hierzu bietet die mehr oder weniger vollständige Enumeration von Lösungen, oftmals auch als Brute-Force-Methode tituliert. Die dabei untersuchten Modelle lassen sich zwar relativ einfach informationstechnisch generieren, jedoch verbietet sich dieser Ansatz aufgrund nicht akzeptabler Rechenzeiten. Ein nächster Schritt besteht darin, bekannte Gestaltungsregeln durch Modifikation einer anfänglichen Planungslösung anzuwenden, um auf ihrer Basis schrittweise verbesserte Modelle zu erzeugen. Eine weitere Möglichkeit bieten Gradientenverfahren, die nach dem Prinzip der Breiten- und Tiefensuche mehrere Lösungspfade modellieren, aber dann schrittweise nur die besten davon weiter verfolgen. Derartige Heuristiken führen zwar nicht zwangsläufig zu einer optimalen Lösung, da eine vorzeitige Vernachlässigung eines Pfades deren Auffindung verhindern kann. Dafür bieten sie aber im Prinzip die Möglichkeit, den Lösungsweg zurückzuverfolgen und somit zunächst ungünstige Lösungspfade wieder aufzugreifen. Diese Rückverfolgung eines Lösungspfades bieten Genetische Algorithmen, die in jüngerer Zeit in zunehmendem Maße für die Lösung komplexer Optimierungsprobleme angesetzt werden, grundsätzlich nicht. Sie basieren auf dem Prinzip der Evolution, in dem sie eine begrenzte Menge von Lösungen erzeugen, diese schrittweise durch Mutation und Selektion als Generationen verfolgen und nach einer vorgegebenen Anzahl von Generationen oder bei Erreichen eines Grenzwertes für nur noch marginale Verbesserungen zu einer quasi-optimalen Planungslösung gelangen. Über die Weiterverfolgung einer Planungslösung in der nächsten Gene-

ration entscheidet ein Fitnesswert, der ggf. auch mehrkriteriell aus den Ergebnissen der Simulation berechnet werden kann.

Diese dargestellten Möglichkeiten der Kombination von Simulations- und Optimierungsverfahren verdeutlichen, dass es mit einer „Optimierung“ nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum selbst unter Einsatz von Expertenwissen nicht getan ist. Vielmehr eröffnen sich durch die Fortschritte in der Informationsverarbeitung, aber auch durch neue Lösungsmethoden (beispielsweise durch einen Ameisenalgorithmus als eine Form der so genannten naturalogenen Optimierung) neue Lösungsansätze, die systematisch und zielgerichtet zumindest zu einer nahezu optimalen Lösung führen.

Der vorliegende Band zeigt die derzeitige Bandbreite der simulationsunterstützten Optimierung auf. Dabei werden nicht nur deren Chancen benannt, sondern auch die möglichen Schwierigkeiten bei ihrer Anwendung. Besonders hervorzuheben ist, dass neben einer Darstellung der Methoden auch Anwendungsbeispiele aufgezeigt werden, die exemplarisch den Nutzen einer simulationsunterstützten Optimierung veranschaulichen.

Die Herausgeber gehören einer Arbeitsgruppe der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), genauer gesagt der ASIM-Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“ an. Diese Fachgruppe ist personell und inhaltlich eng mit einem Fachausschuss des Vereins Deutscher Ingenieure verbunden, der für die Erarbeitung der Richtlinienreihe VDI 3633 „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen“ verantwortlich zeichnet. Die Anregungen zum vorliegenden Band entstammen somit beiden Gremien. Das Buch erscheint aus Anlass der 14. ASIM-Fachtagung, die im Herbst 2010 am Karlsruher Institut für Technologie (vormals Universität Karlsruhe) ausgerichtet wird. Herausgebern und Autoren sei in besonderer Weise dafür gedankt, dass sie sich diesem komplexen Thema mit großem Engagement gewidmet haben. Sie geben damit der Fachtagung einen besonderen Akzent.

Im Namen der ASIM  
Karlsruhe, im Oktober 2010

Prof. Gert Zülch  
Institut für Arbeitswissenschaft  
und Betriebsorganisation  
Karlsruher Institut für Technologie

# Inhalt

<b>Teil I Einführung</b> .....	1
<b>1 Simulationsgestützte Optimierung</b> .....	3
<i>Lothar März und Gerald Weigert</i>	
<b>2 Simulation</b> .....	13
<i>Oliver Rose und Lothar März</i>	
<b>3 Optimierung</b> .....	21
<i>Wilfried Krug und Oliver Rose</i>	
<b>4 Stell- und Zielgrößen</b> .....	29
<i>Gerald Weigert und Oliver Rose</i>	
<b>5 Kopplung von Simulation und Optimierung</b> .....	41
<i>Lothar März und Wilfried Krug</i>	
<b>Teil II Fallbeispiele</b> .....	47
<b>6 Simulationsgestützte Optimierung von Fertigungsprozessen in der Halbleiterindustrie</b> .....	49
<i>Andreas Klemmt, Sven Horn und Gerald Weigert</i>	
<b>7 Vorausschauende Produktionsregelung durch simulationsbasierte heuristische Optimierung</b> .....	65
<i>Matthias Gruber, Michael Rinner, Thomas Löscher, Christian Almeder, Richard Hartl und Stefan Katzensteiner</i>	
<b>8 Modellierung und Optimierung von Montageprozessen</b> .....	79
<i>Thomas Henlich, Gerald Weigert und Andreas Klemmt</i>	

<b>9 Personaleinsatz- und Ablaufplanung für komplexe Montagelinien mit MARTA 2 .....</b>	<b>93</b>
<i>Oliver Rose, Martin F. Majohr, Evangelos Angelidis, Falk S. Pappert und Daniel Noack</i>	
<b>10 Simulationsbasierte Reihenfolgeoptimierung in der Produktionsplanung und -steuerung .....</b>	<b>105</b>
<i>Wilfried Krug und Markus Schwöpe</i>	
<b>11 Simulationsbasierte Optimierung der Einsteuerungsreihenfolge für die Automobil-Endmontage .....</b>	<b>117</b>
<i>Lutz Iltzsche, Peter-Michael Schmidt und Sven Völker</i>	
<b>12 Integrierte Programm- und Personaleinsatz-planung sequenzierter Produktionslinien .....</b>	<b>133</b>
<i>Lothar März, Thorsten Winterer, Walter Mayrhofer und Wilfried Sihn</i>	
<b>13 Simulationsgestützte Optimierung für die distributionsorientierte Auftragsreihenfolge-planung in der Automobilindustrie .....</b>	<b>151</b>
<i>Christian Schwede, Katja Klingebiel, Thomas Pauli und Axel Wagenitz</i>	
<b>14 Optimierung einer feinwerktechnischen Endmontage auf Basis der personalorientierten Simulation .....</b>	<b>171</b>
<i>Gert Zülch und Martin Waldherr</i>	
<b>15 Simulative Optimierung von Verpackungsanlagen .....</b>	<b>185</b>
<i>Matthias Weiß, Joachim Hennig und Wilfried Krug</i>	
<b>16 Entwurfsunterstützung von Produktions- und Logistikprozessen durch zeiteffiziente simulationsbasierte Optimierung .....</b>	<b>195</b>
<i>Wilfried Krug</i>	
<b>17 Performancevergleich zwischen simulationsbasierter Online- und Offline-Optimierung anhand von Scheduling-Problemen .....</b>	<b>205</b>
<i>Christian Heib und Stefan Nickel</i>	
<b>Herausgeber.....</b>	<b>215</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>217</b>

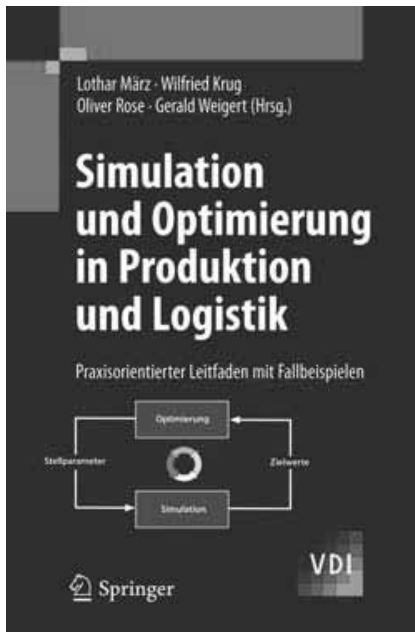
## Über die Autoren

Dr.-Ing. Ing. ECL Lothar März, geb. 1965, 1987- 1993 Studium Allgemeiner Maschinenbau an der Technischen Hochschule Darmstadt sowie Ingenieurwissenschaften mit Schwerpunkt Mathematik und Informatik an der Ecole Centrale de Lyon. 1995-2001 Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und –automatisierung (IPA), Stuttgart, 2002 Promotion (Ein Planungsverfahren zur Konfiguration der Produktionslogistik). Ab 2001 in leitenden Funktionen in der Unternehmensberatung sowie bei Forschungsinstitutionen tätig. Zentraler Schwerpunkt seiner Arbeiten sind Entscheidungsunterstützungssysteme für Produktion und Logistik auf der Basis von Simulation und mathematischer Optimierung. 2010 Gründung der LOM Innovation GmbH & Co. KG in Lindau (Bodensee) als geschäftsführender Gesellschafter. Mitglied der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), der GI sowie der Gesellschaft für Produktion und Logistik des VDI Deutschland. 2007 Gründungsmitglied und Sprecher der Arbeitsgruppe „Simulationsbasierte Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen“ in der ASIM-Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“.

Prof. Dr. - Ing. habil. Wilfried Krug, geb.1937, 1956 - 1959 Flugzeugbaustudium an der Ingenieurschule für Flugzeugbau Dresden, 1961 - 1967 Diplom - Ingenieurstudium Elektrotechnik/Technische Kybernetik an der Technischen Universität Dresden, 1975 Promotion (Modellierung und Simulation von Hermetikkompressoren), 1977 Habilitation ( Rechnergestützte Optimierung technischer Systeme). 1978 - 1986 Professur für Mathematische Kybernetik und Rechentechnik an der Ingenieur Hochschule Köthen, 1986 - 1992 Professur für Modellierung und Simulation an der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden. 1990 Gründung der DUALIS GmbH IT Solution und Direktor IT-Management bis heute. Mitglied der Arbeitsgemeinschaft ASIM seit 1992 und im Vorstand bis 2000. Mitglied in mehreren nationalen und internationalen Programmkomitees und General Conference Chairman Society for Computer Simulation 1992 und 2002 in Dresden. Beiratsmitglied im VDI – Produktionstechnik von 1998 – 2008 und seit 2009 Leiter des VDI – Arbeitskreises Produktion und Logistik Dresden und Mitglied der Gesellschaft für Produktion und Logistik des VDI Deutschland.

Prof. Dr. rer. nat. Oliver Rose, geb. 1966, Mathematikstudium an der Universität Würzburg, Promotion und Habilitation („Operational Modelling and Simulation in Semiconductor Manufacturing“) im Fach Informatik an der Universität Würzburg. Seit Oktober 2004 Professur für Modellierung und Simulation am Institut für Angewandte Informatik der Fakultät Informatik der TU Dresden. 2001-2003 Leitung der deutschen Beteiligung am Factory Operations Research Center Project „Scheduling of Semiconductor Wafer Fabrication Facilities“ von SRC (Semiconductor Research Corporation) und International Sematech. Aktuelle Arbeitsgebiete: Modellierung und Simulation komplexer Produktionssysteme, operative Materialflusskontrolle komplexer Produktionssysteme, Informationstechnologische Unterstützung von Simulationsprojekten. Mitglied der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), der GI, der IEEE, des INFORMS College on Simulation, der Gesellschaft für Systems Engineering, Mitglied in mehreren nationalen und internationalen Programmkomitees.

Privatdozent Dr.-Ing. Gerald Weigert, studierte Informationselektronik an der Technischen Universität Dresden und promovierte 1983 an der Fakultät Elektrotechnik. Bis 1988 war er sowohl wissenschaftlich als auch in der Industrie auf dem Gebiet der automatischen Spracherkennung tätig, wo er sich vorrangig mit Optimierungsalgorithmen und Softwareentwicklung beschäftigte. Seit 1988 arbeitet er am Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (IAVT, vormals Institut für Elektronik-Technologie) der Technischen Universität Dresden, zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit 2006 als Privatdozent. Seit dieser Zeit beschäftigt er sich in Forschung und Lehre mit der Modellierung, Simulation und Optimierung von Fertigungsprozessen. Er war maßgeblich beteiligt an der Entwicklung ereignisdiskreter Simulationssysteme und deren Einsatz zur prozessbegleitenden Steuerung von Fertigungsabläufen. Dr. Weigert leitet die Arbeitsgruppe „Prozesstechnologie“ am I-AVT und unterhält zahlreiche Kontakte zur Industrie. Er ist Mitglied der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) und Mitglied verschiedener Programmkomitees.



2011, XVI, 244 S. 100 Abb.

 Druckausgabe

**Softcover**

**Ladenpreis**

► \*87,99 € (D) | 90,45 € (A) | CHF 109.50

 eBook

**Erhältlich bei Ihrer Bibliothek  
oder**

► [springer.com/shop](http://springer.com/shop)

L. März, W. Krug, O. Rose, G. Weigert (Hrsg.)

## **Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik**

Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen

Reihe: VDI-Buch

- Erste deutschsprachige Zusammenstellung von Fallbeispielen zu diesem Thema
- Orientierungshilfe und Wegweiser für die Möglichkeiten, die die Methoden von Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik bieten
- Nutzen, Grenzen und Randbedingungen in anwendungsnahen Industrieprojekten werden aufgezeigt

Der Einsatz der simulationsgestützten Optimierung in Produktion und Logistik birgt hohes Potential. Berichte über erfolgreiche Kopplungen von Simulation und Optimierung sind dagegen rar. Simulationsmodelle sind Bewertungsmodelle, die Ergebnisse über das dynamische Verhalten eines Systems für vorgegebene Parameter ermitteln. Durch den meistens intransparenten Zusammenhang zwischen den Ergebnisgrößen und den Parametern eines Simulationsmodells ist eine manuelle Optimierung vor dem Hintergrund zunehmender Prozessverkettungen und wechselnder Systemlasten schwierig. Der Einsatz der mathematischen Optimierung kann in unterschiedlicher Funktion im Zusammenwirken mit der Simulation helfen, bessere und auch schneller verfügbare Zielwerte im Sinne der Aufgabenstellung zu erreichen. Das Buch führt in die simulationsgestützte Optimierung ein, zeigt mögliche Anwendungsfelder und Kopplungsmechanismen auf und erläutert beispielhafte Realisierungen aus der Praxis anhand von Fallbeispielen. Es wendet sich an den Anwender aus der Industrie, der die Möglichkeiten und Potentiale der simulationsgestützten Optimierung im Hinblick auf seine Aufgabenstellungen und Anwendungen überprüfen kann.



Erhältlich bei Ihrem Buchhändler oder – Springer Customer Service Center GmbH, Haberstrasse 7, 69126 Heidelberg, Germany ► Call: + 49 (0) 6221-345-4301 ► Fax: +49 (0)6221-345-4229 ► Email: [customerservice@springer.com](mailto:customerservice@springer.com) ► Web: [springer.com](http://springer.com)

\* € (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7% MwSt; € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10% MwSt. CHF und die mit \*\* gekennzeichneten Preise für elektronische Produkte sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Programm- und Preisänderungen (auch bei Irrtümern) vorbehalten. Es gelten unsere Allgemeinen Liefer- und Zahlungsbedingungen.

Springer-Verlag GmbH, Handelsregistersitz: Berlin-Charlottenburg, HR B 91022. Geschäftsführung: Haank, Mos, Hendriks