

Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre und  
Wirtschaftsinformatik

herausgegeben von Prof. Dr. Stefan Voß

**Sven Spieckermann**

**Neue Lösungsansätze für ausgewählte Planungs-  
probleme in Automobilrohbau und -lackiererei**

Shaker Verlag  
Aachen 2002

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Spieckermann, Sven:*

Neue Lösungsansätze für ausgewählte Planungsprobleme in Automobilrohbau und -lackiererei / Sven Spieckermann.

Aachen : Shaker, 2002

(Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre und Wirtschaftsinformatik)

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2002

ISBN 3-8322-0566-7

Copyright Shaker Verlag 2002

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-0566-7

ISSN 1616-1920

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*Für Susanne, Eric, Marc und Nils*



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner mehrjährigen Tätigkeit in Wissenschaft und Praxis. Die Anregungen für die untersuchten Praxisprobleme stammen aus der Arbeit als Projektleiter und Mitglied der Geschäftsführung der SimPlan AG. SimPlan befasst sich mit der Analyse, Simulation und Optimierung von Logistik- und Fertigungsprozessen. Die Möglichkeit zur wissenschaftlichen Einordnung der Problemstellungen hat mir meine externe Mitarbeit in der Abteilung Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Wirtschaftsinformatik und Informationsmanagement der Technischen Universität Braunschweig gegeben.

Derartige berufsbegleitende wissenschaftliche Arbeiten stellen in mehrfacher Hinsicht eine besondere Herausforderung dar, auch wenn sie - wie im vorliegenden Fall - dadurch begünstigt sein können, dass in der praktischen Projektarbeit Methoden zum Einsatz kommen, die Gegenstand aktueller Forschung sind. Zu diesen Methoden gehören beispielsweise diskrete, ereignisorientierte Simulation, Meta-Heuristiken, warteschlangenbasierte Verfahren und simulationsbasierte Optimierung.

In diesem Zusammenhang liegt eine der Herausforderungen in der Erarbeitung von Ergebnissen, die geeignet sind, einen Beitrag zum wissenschaftlichen Fortschritt der jeweiligen Disziplin(en) zu leisten. Anders formuliert besteht eine der Gefahren praxisorientierter Forschung in einer Beschränkung auf den bloßen Transfer von Forschungsergebnissen in praktische Anwendungen. Gleichzeitig bietet gerade die Perspektive des Praktikers die Gelegenheit, ein wenig „undogmatischer“ mit Methoden zu verfahren, die in der Literatur vielfach eher als gegensätzliche Alternativen denn als sich ergänzende Ansätze behandelt werden. Insofern stellt die in dieser Arbeit vorgestellte Integration von warteschlangenbasierten Verfahren und simulationsbasierter Optimierung zur verbesserten Unterstützung der Konzeptplanung im Automobilrohbau auf der einen Seite einen Ansatz dar, dessen Vorteile gegenüber der „einfachen“ Parameteroptimierung so signifikant sind, dass sich das Verfahren im Laufe des Entstehungsprozesses dieser Arbeit bei einigen Automobilherstellern bereits etabliert hat. Auf der anderen Seite legt das an dieser Problemstellung deutlich werdende (und unmittelbar auf ähnliche Planungsprobleme übertragbare) grundlegende Potenzial der integrierten Betrachtung der beiden Methoden nahe, sich im wissenschaftlichen Diskurs künftig vielleicht etwas weniger mit der abgrenzenden Betonung von Unterschieden und (tatsächlichen oder vermeintlichen) Unvereinbarkeiten auseinander zu setzen. In diesem Sinne mag das für das Planungsproblem im Automobilrohbau vorgestellte Lösungsverfahren Anhalts- und Ausgangspunkt für weitere Forschungsaktivitäten im Kontext von Simulation und Optimierung sein.

Im Hinblick auf die zweite untersuchte Problemstellung, die Farbsortierung mit Hilfe von Linienspeichern, zeigt die Arbeit in Gestalt eines Branch&Bound-Verfahrens Lösungsansätze auf, die über die bislang in der praktischen Anwendung vorherrschenden regelbasierten Verfahren deutlich hinausgehen. Eine der in diesem Zusammenhang formulierten Problemanalogien von Teilaspekten der Farbsortierung als *Traveling-Salesman Problem* mit Reihenfolgerestriktionen - auch als *Sequential Ordering Problem* bezeichnet - ist geeignet zu verdeutlichen, dass wissenschaftlicher Erkenntnisfortschritt auch darin bestehen kann, für Unternehmen relevante Problemstellungen durch geeignete Modellformulierungen quantitativen Methoden zugänglich zu machen.

Die zweite wesentliche Herausforderung gibt weniger Anlass zu „wissenschaftstheoretischen“ Überlegungen, kann aber gleichwohl zu keinem geringeren Legitimationsbedarf des persönlichen Handelns führen - die Rede ist von der Vereinbarkeit von Beruf, Forschung und Familie. In dieser Hinsicht kann es hilfreich sein, sich „ex ante“ keine Gedanken über die Aussichten zu machen, die eigenen Anstrengungen zu einem erfolgreichen Abschluss zu führen. Wie sich durch eine kurze (von mir zum Glück erst „ex post“ durchgeführte) Recherche bestätigen lässt, reicht die Einschätzung der entsprechenden Erfolgsaussichten berufsbegleitender Dissertationen von „klappt in der Regel nicht“ bis zu „deutlich weniger als 50%“. Ob man nun als Pessimist eher der erstgenannten Auffassung zuneigt oder sich der zweiten Meinung anschließt (die ja fast schon zu Euphorie Anlass geben könnte) - beide Stimmen unterstreichen, wie groß der Unterstützungsbedarf externer Promovenden in der Regel sein wird.

Insofern sehe ich mich mit Blick auf die zurückliegende Zeit in ganz besonderem Maße zum Dank verpflichtet. Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Stefan Voß, danke ich für das in mich gesetzte Vertrauen, die Freiheiten bei der Gestaltung der Arbeit und eine Vielzahl wertvoller Diskussionen und Anregungen. Insbesondere möchte ich mich auch für seine motivierende Unterstützung in den Phasen bedanken, in denen ich mir nicht ganz so sicher war, die (eigenen) Ziele erreichen zu können. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Thomas Spengler für die Übernahme des Koreferats.

Essenziell für das Gelingen der Arbeit war ferner die Zusammenarbeit mit den Herren Thomas Bierwirth, Jens-Peter Boochs, Thomas Dreyer und Holger Heinzl. Sie haben (jeweils andere) meiner Ideen aufgegriffen, umgesetzt und in gemeinsamen Diskussionen weiterentwickelt. Dabei sind eine Reihe der Bausteine entstanden, die das Fundament dieser Arbeit bilden. In gleicher Weise unentbehrlich war die unermüdliche Zuarbeit von Herrn Dirk Reiß. Eine e-Mail an ihn genügte und kurze Zeit später traf ein Päckchen aus Braunschweig mit den angeforderten Büchern und Artikeln bei mir ein. Hätte es diese ganz spezielle Art des „Wissenstransfers“ nicht gegeben, wäre es (auch im Internet-Zeitalter) weit schwieriger wenn nicht gar unmöglich gewesen, die Arbeit ohne dauernde Anwesenheit an einer Hochschule bzw. ohne die unmittelbare Nähe einer Hochschulbibliothek anzufertigen.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts sowie eine Vielzahl sehr fruchtbarer und anspornender Diskussionen habe ich in erster Linie meinen Freunden und Kollegen Dr. Andreas Fink und Dr. Kai Gutenschwager zu danken. Herr Dr. Kai Gutenschwager und seine Frau Nicol Krause-Gutenschwager haben mich überdies während der Schlussphase der Arbeit für eine Woche bei sich aufgenommen - auch dafür meinen herzlichen Dank.

Für zahlreiche weitere Korrekturhinweise möchte ich mich ferner bei Frau Meike Girardot und ihrer Freundin Tine, Herrn Dr. Matthias Kunze sowie meinem Vater Erich Spieckermann bedanken. Wie sich schon an diesem Vorwort erkennen lässt, haben sie es allerdings alle (trotz zahlreicher Bemühungen) nicht geschafft, mir meinen Hang zu Satzkonstruktionen über zahlreiche Zeilen hinweg abzugewöhnen. Diesbezüglich bitte ich den Leser bereits jetzt um Nachsicht - das Formulieren hat mir jedenfalls immer Spaß gemacht. Diese Eigenheit sowie ggf. verbliebene weitere Schwächen gehen selbstverständlich zu meinen Lasten.

Worte alleine genügen nicht, um meine Dankbarkeit den Menschen gegenüber zum Ausdruck zu bringen, denen ich diese Arbeit auch widmen möchte: meiner Familie. Ohne die Unterstützung meiner Frau Susanne, ohne ihre Bereitschaft, ungezählte Wochenenden

und Feiertage mit meinem Streben nach Erkenntnis zu teilen, hätte ich die vergangenen Jahre nicht bewältigen können. Immer wieder hat sie es verstanden, unsere Söhne Eric, Marc und Nils davon zu überzeugen, dass es wichtig ist, wenn ihr Vater an sonnigen Samstagnachmittagen das Verhalten von über den Bildschirm seines Computers hopsenden Autos analysiert. Ohne den Rückhalt dieser ganz besonderen Menschen in meinem Leben wäre diese Arbeit nicht entstanden.

*Braunschweig und Maintal, Juli 2002*

Sven Spieckermann



# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>XI</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>XV</b>
<b>SYMBOLVERZEICHNIS</b>	<b>XVI</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung der Arbeit	2
1.2 Aufbau der Arbeit	4
<b>2 PLANUNG UND PLANUNGSPROZESS IN DER PRODUKTION</b>	<b>7</b>
2.1 Merkmale von Produktionssystemen in der Automobilindustrie	7
2.2 Planung und Entscheidung	10
2.3 Planungsprozess	13
<b>3 PLANUNGSPROBLEME IN ROHBAU UND LACKIEREREI</b>	<b>15</b>
3.1 Einordnung ausgewählter Problemstellungen	15
3.2 Eine Problemstellung in der Rohbau-Konzeptplanung	20
3.2.1 Grundsätzliche Struktur von Rohbauanlagen	21
3.2.2 Das Puffer- und Taktzeitauslegungsproblem in der Konzeptplanung	23
3.3 Das Farbsortierproblem in Lackierereiplanung und -betrieb	28
3.3.1 Grundsätzliche Struktur von Lackierereien	28
3.3.2 Das Farbsortierproblem	30
3.3.2.1 Strukturkomponenten zur Farbsortierung	31
3.3.2.2 Strukturabhängige Steuerungskomponenten	33
3.3.2.3 Strukturunabhängige Steuerungskomponenten	33
3.3.2.4 Randbedingungen für die Farbsortierung	35
<b>4 METHODEN ZUR PLANUNGSUNTERSTÜTZUNG</b>	<b>37</b>
4.1 Traditionelle Planungshilfsmittel	37
4.2 Exakte Lösungsansätze	39
4.3 Heuristische Lösungsansätze	41
4.3.1 Einfache heuristische Verfahren	41
4.3.2 Meta-Heuristiken	42
4.3.2.1 Simulated Annealing	43

4.3.2.2	Tabu Search	44
4.3.2.3	Evolutionäre Methoden	45
4.3.2.3.1	Grundprinzipien	45
4.3.2.3.2	Spezielle Ausprägungen evolutionärer Methoden	48
<b>4.4</b>	<b>Simulation</b>	<b>50</b>
4.4.1	Grundbegriffe zur Simulation	51
4.4.2	Auswertung stochastischer Simulationsexperimente	52
4.4.3	Merkmale diskreter, ereignisorientierter Simulationswerkzeuge	54
<b>4.5</b>	<b>Simulationsbasierte Optimierung</b>	<b>55</b>
4.5.1	Anforderungen an simulationsbasierte Optimierungsverfahren	56
4.5.2	Anwendungsbeispiele aus der Literatur	57
4.5.2.1	Evolutionsstrategien und Simulation	57
4.5.2.2	Genetische Algorithmen und Simulation	58
4.5.2.3	Tabu Search und Simulation	59
4.5.3	Software zur simulationsbasierten Optimierung	60
4.5.3.1	Evolutionäre Methoden in eM-Plant (SIMPLE++)	61
4.5.3.2	Witness-Optimizer	62
4.5.3.3	Scatter Search und OptQuest	62
4.5.3.4	Optimierung mit dem Simulator ProModel	64
4.5.3.5	Optimierung mit Issop	64
4.5.3.6	OptiS und SIMFLEX/3	64
<b>4.6</b>	<b>Warteschlangenbasierte Methoden</b>	<b>65</b>
4.6.1	Grundlagen der Modellierung von Produktionssystemen mit warteschlangenbasierten Methoden	65
4.6.2	Softwarewerkzeuge für die warteschlangenbasierte Modellierung von Produktionssystemen	67
<b>4.7</b>	<b>Warteschlangenbasierte Verfahren versus Simulation</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>UNTERSTÜTZUNG DER KONZEPTPLANUNG IM ROHBAU</b>	<b>73</b>
<b>5.1</b>	<b>Theoretische Vorüberlegungen</b>	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b>Lösungsverfahren</b>	<b>75</b>
5.2.1	Puffer- und Taktzeitauslegung in der Praxis	76
5.2.2	Lösungsansätze für das Buffer Allocation Problem	76
5.2.2.1	Überblick über Lösungsansätze für das Buffer Allocation Problem	77
5.2.2.2	Übertragbarkeit der Ansätze auf das Body Shop Design Problem	80
5.2.3	Ansätze mit simulationsbasierter Optimierung	81
5.2.3.1	Anwendung des Werkzeugs SIMPLE/GA	81
5.2.3.1.1	Grundlegende Eigenschaften von SIMPLE/GA	81
5.2.3.1.2	Repräsentation des Body Shop Design Problem im Werkzeug SIMPLE/GA	83
5.2.4	Warteschlangenmodelle zur Beschleunigung der Suche	86
5.2.4.1	Optionen zur Gestaltung eines hybriden Ansatzes	86
5.2.4.2	Beschreibung der systemtechnischen Realisierung	88

<b>5.3</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>90</b>
5.3.1	Beschreibung der verwendeten Testfälle	91
5.3.2	Bestimmung der erforderlichen Simulationsdauer	93
5.3.3	Versuchsreihen und Resultate	96
5.3.3.1	Parametrierung der Werkzeuge SIMPLE/GA und FlowEval	96
5.3.3.2	Ergebnisse für den ersten Testfall BSDP1	97
5.3.3.3	Ergebnisse für den zweiten Testfall BSDP2	101
<b>5.4</b>	<b>Bewertung</b>	<b>106</b>
<b>6</b>	<b>OPTIMIERTE FARBSORTIERUNG MIT LINIENSPEICHERN</b>	<b>109</b>
<b>6.1</b>	<b>Theoretische Vorüberlegungen</b>	<b>109</b>
<b>6.2</b>	<b>Lösungsverfahren</b>	<b>114</b>
6.2.1	Definitionen	115
6.2.1.1	Exemplarische Ausgangssituationen für die Ein- und Auslagerung	115
6.2.1.2	Strategieunabhängige Begriffe	116
6.2.1.3	Kreuzungszahl	118
6.2.1.3.1	Kreuzungszahl für auszulagernde Karosserien	119
6.2.1.3.2	Kreuzungszahl für einzulagernde Karosserien	120
6.2.2	Auslagerungsstrategien	121
6.2.2.1	Regelbasierte Ansätze	122
6.2.2.1.1	Einfacher regelbasierter Ansatz	122
6.2.2.1.2	Regelbasierter Ansatz mit Kreuzungszahl	123
6.2.2.1.3	Regelbasierter Ansatz mit Kreuzungszahl und unmittelbarem Abzug	125
6.2.2.2	Verwendung eines Branch&Bound-Verfahrens	126
6.2.2.2.1	Grundprinzip des Ansatzes	126
6.2.2.2.2	Branch&Bound-Ansatz	128
6.2.3	Einlagerungsstrategien	130
6.2.3.1	Einfache regelbasierte Einlagerung	130
6.2.3.2	Regelbasierte Einlagerung mit verbotenen Sortierlinien	132
6.2.3.3	Regelbasierte Einlagerung mit Kreuzungszahl	133
6.2.3.4	Regelbasierte Einlagerung mit Kreuzungszahl und Vorausschaubewertung	134
6.2.4	Kombinierte Strategie für Ein- und Auslagerung	136
<b>6.3</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>138</b>
6.3.1	Versuchsplanung	139
6.3.2	Statistische Signifikanz der Ergebnisse	143
6.3.3	Einfluss der Auslagerungsstrategie	144
6.3.4	Einfluss der Einlagerungsstrategie	149
6.3.5	Einfluss der Größe des Vorausschaubereichs	152
6.3.6	Einfluss der Speicherbelegung und Speichergröße	154
6.3.7	Einfluss der maximalen Farbblockgröße	157
6.3.8	Berechnungsintervall beim Branch&Bound-Verfahren	159
6.3.9	Rechenzeitbedarf	159
6.3.10	Versuche zum kombinierten Verfahren mit Lookahead	162

---

<b>6.4</b>	<b>Bewertung</b>	<b>164</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>167</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>173</b>
	<b>INDEX</b>	<b>195</b>