

Forschungsberichte

iwb

Band 126

Hans-Jürgen Trossin

***Nutzung der Ähnlichkeitstheorie
zur Modellbildung
in der Produktionstechnik***

*herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart*

Herbert Utz Verlag



Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Trossin, Hans-Jürgen:
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik /
Hans-Jürgen Trossin. -
München : Utz, Wiss., 1999
(Forschungsberichte IWB ; 126)
Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 1999
ISBN 3-89675-614-1

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 1999

ISBN 3-89675-614-1

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren und Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozeß spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Produktentwicklung über die Planung von Produktionssystemen hin zu den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb*-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Stichlmair, dem Leiter des Lehrstuhls für Verfahrenstechnik A der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame und kritische Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Mein Dank gilt weiterhin der Fa. Walther Glas GmbH und ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, besonders Herrn Dieter Döinghaus, Frau Monika Heuer-Austermann, Herrn Peter Weber sowie Herrn Spenner, für die Förderung dieser Arbeit. Ohne ihr persönliches Engagement, ohne ihre glastechnisch-fachliche und auch ohne ihre menschliche Unterstützung wäre diese Arbeit in der vorliegenden Form nicht zustande gekommen.

Herrn Dr. phil., Dr.-Ing. e. h. Juri Pawlowski danke ich für seine wertvollen Ratschläge und seine Einschätzung, daß ein Ähnlichkeitstheoretisches Modell eines Glaspreßprozesses möglich wäre.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

Mein besonderer Dank gilt all jenen, die von Anfang an an die dieser Arbeit zugrundeliegende Idee geglaubt haben.

München, im August 1999

Hans-Jürgen Trossin

1 Einleitung	5
1.1 Problemstellung	6
1.2 Zielsetzung der Arbeit	7
1.3 Vorgehensweise	7
2 Prozeßmodellierung und ihre Methoden	11
2.1 Begriffsdefinitionen	11
2.1.1 System	11
2.1.2 Prozeß	12
2.1.3 Modell	12
2.1.4 Prototyp	13
2.2 Einsatz von Prozeßmodellen	17
2.2.1 Motivation	17
2.2.2 Vorgehensweise	18
2.3 Bestehende Methoden zur Bildung von Prozeßmodellen	22
2.3.1 Symbolische Modellbildung von Prozessen	24
2.3.2 Körperliche Modellbildung von Prozessen	29
2.4 Defizite im Stand der Erkenntnisse	33
3 Anwendung der Ähnlichkeitstheorie in der Produktionstechnik	35
3.1 Dimensionslose Darstellung – Methode der Relevanzliste	36
3.1.1 Aufstellen einer Relevanzliste	38
3.1.2 Herleitung einer dimensionslosen Prozeßdarstellung aus einer Relevanzliste	43
3.1.3 Ableiten von Maßstabsgleichungen	45
3.2 Auswahl von Modellstoffen	46
3.2.1 Ermittlung eines Modellstoffes bei konstanten Stoffgrößen	47
3.2.2 Ermittlung eines Modellstoffes bei variablen Stoffgrößen	50
3.3 Versuchsplanung	53
3.4 Partielle Ähnlichkeit	54

4 Anwendungsbeispiel: Glaspressen	57
4.1 Beschreibung des Produktionsprozesses	57
4.1.1 Prozeßablauf	57
4.1.2 Eingesetzte Maschinen und Werkzeuge	57
4.1.3 Verwendete Werkstoffe	60
4.2 Aufgabenstellung	60
4.3 Erarbeitung einer dimensionslosen Prozeßdarstellung	61
4.3.1 Aufstellen einer Relevanzliste	61
4.3.2 Herleitung dimensionsloser Kennzahlen	65
4.3.3 Diskussion des Kennzahlensatzes	67
4.4 Aufstellen der Maßstabsgleichungen	68
5 Evaluierung: Aufbau einer Versuchsanlage	73
5.1 Quantifizierung der Parameter	73
5.2 Ermittlung eines Modellstoffes für Glas	75
5.3 Dimensionierung der Anlage	81
5.4 Realisierung der Anlage	82
5.5 Versuchsplanung	84
5.6 Beschreibung der Versuchsdurchführung zur Validierung	84
5.7 Darstellung der Versuchsergebnisse	86
5.8 Fehlerbetrachtung	97
5.8.1 Fehler in den Eingangsdaten	97
5.8.2 Fehler aufgrund theoretischer Vereinfachungen	98
5.8.3 Fehler im Modellaufbau	99
5.8.4 Fehler in der Durchführung des Modellprozesses	99
5.9 Erfahrungen mit dem Modellprozeß	100
5.10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	102
5.10.1 Kosten der Versuche am Originalprozeß	102
5.10.2 Kosten der Versuche an der Versuchsanlage	104
5.10.3 Kostenvergleich	106

6 Konzept des Process Prototyping	109
6.1 Leistungsumfang von Process Prototyping	109
6.2 Methodenbereitstellung	110
6.3 Methodenanwendung	111
6.4 Methodenauswahl	111
6.5 Integration in betriebliche Abläufe	111
6.6 Zusammenfassung des Gesamtkonzeptes	113
7 Entwurf des Process Prototyping	115
7.1 Anforderungsliste für Process-Prototyping-Verfahren	116
7.2 Auswahl von Modellbildungsverfahren	117
7.2.1 Symbolische Modellbildung von Prozessen	117
7.2.2 Körperliche Modellbildung von Prozessen	120
7.2.3 Identifikation von möglichen Verfahren für die Erstellung von Prozeßprototypen	123
7.3 Konzept zur systematischen Auswahl von Modellbildungsverfahren	124
7.3.1 Lösungsraum	126
7.3.2 Beurteilungskriterien	126
7.3.3 Gewichtungsfaktoren	137
7.4 Beispielhafte Auswahl eines Modellbildungsverfahrens	138
7.5 Zusammenfassung	145
8 Zusammenfassung und Ausblick	147
9 Literaturverzeichnis	151

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurde wiederholt und verstkt darauf hingewiesen, wie sehr produzierende Unternehmen einer sich verschärfenden Wettbewerbssituation ausgesetzt sind. Vor diesem Hintergrund erreicht der Zeitwettbewerb, in dem sich produzierende Unternehmen befinden, immer größere Bedeutung. Im Streben nach einer dauerhaft sicheren Marktposition kommt es darauf an, schneller zu sein als der Wettbewerber. Wettbewerbsvorteile sind zeitlich begrenzt. Milberg nennt den Zeitfaktor „als bestimmendes Maß. Im Zeitwettbewerb entscheidende Parameter sind

- time to product
- time to market
- time to customer und
- time to production“ (*Milberg 1997, S. 23*)

Grundlage dessen ist der Gedanke, schneller Produktideen aus der Grundlagenforschung zu erarbeiten (time to product), diese schneller als marktreifes Produkt umzusetzen (time to market) und dabei Lieferzeiten von der Kundenbestellung bis zur Produktbergabe zu verkzen (time to customer). Die „time to production“ ist der „time to customer“ untergeordnet. Sie bezeichnet die Zeitspanne vom Auslösen eines Produktionsvorganges etwa durch einen Kundenauftrag bis zum tatsächlichen Produktionsanlauf, die durch zunehmende Flexibilität der Abläufe im Unternehmen und der Produktion verkzt werden kann. Somit hilft eine Verkzung der „time to production“, die „time to customer“ zu reduzieren.

In diesem Zusammenhang entstanden Ideen und Konzepte, die darauf abzielten, in den oben genannten Bereichen Zeit einzusparen. Im Rahmen der weitreichenden Ansätze von Simultaneous oder Concurrent Engineering wird beispielsweise versucht, die Entwicklung von Produkt und Produktion zu parallelisieren (s. dazu bspw. *Reinhart 1998; Gebhardt 1997, S. 207; Lindemann & Kleedorfer 1997*). Eines der Hauptziele dieser integrierten Produktentwicklung ist, Fehler in der Planung und Entwicklung früher zu erkennen und Unsicherheiten früher zu klären als bisher. Dies betrifft Produkt- und Produktionsentwicklung gleichermaßen (*Milberg u. a. 1994, S. 7 f.*). Abb. 1-1 veranschaulicht qualitativ den Erfolg der Bemühungen, durch Einsatz technischer Hilfsmittel sowie geeigneter Organisationskonzepte innerhalb des Entwicklungsprozesses frühzeitig einen hohen Reifegrad von Produkt und Produktionsprozeß zu erarbeiten und dadurch Fehler rechtzeitig erkennen und beheben zu können.

Abb. 1-1 zeigt allerdings auch, daß es zur Zeit auf Produktebene wesentlich besser gelingt, frühzeitig einen hohen Reifegrad und damit einen gesicherten Erkenntnisstand zu erarbeiten als auf der Ebene des Produktionsprozesses. Hier scheint Potential vorhanden zu sein, Prozeentwicklungen zeitlich weiter zu verkzen, Planungssicherheit innerhalb der Entwicklungen noch frühzeitiger zu erarbeiten, dadurch die Qualität des Ergebnisses zu verbessern und Entwicklungskosten zu verringern.

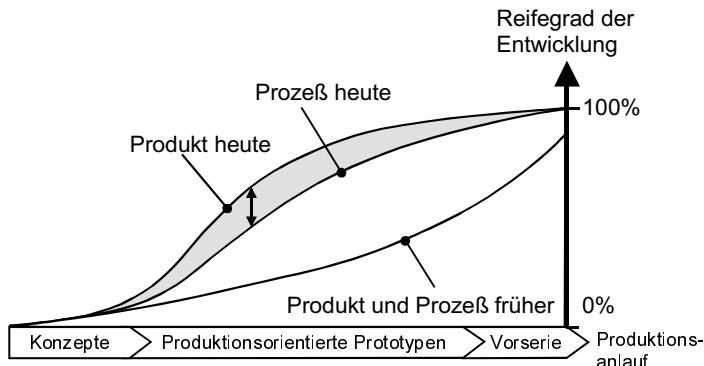


Abb. 1-1: Erfolge der Methoden des Simultaneous Engineering (Milberg u. a. 1994, S. 685).

1.1 Problemstellung

Durch den unterschiedlich schnellen Fortschritt des Erkenntnisstandes von Produkt- und Prozeßentwicklung hinkt der Produktionsentwicklungsprozeß in seinem Reifegrad der Produktentwicklung hinterher. Dadurch wird zum einen wertvolle Zeit verloren, vor allem „time to market“. Zum anderen werden durch eine zunehmend spätere Absicherung der Entwicklungsergebnisse die Kosten für eine eventuelle Fehlerbeseitigung bzw. -behebung in die Höhe getrieben (Lindemann & Reichwald 1998, S. 30 ff.).

Deshalb ist es notwendig Hilfsmittel bereitzustellen, die eine frühzeitige Reifung und damit Absicherung der Prozeßentwicklung ermöglichen. Reinhart (1996, S. 7) leitet in diesem Zusammenhang den konkreten Handlungsbedarf ab, „Möglichkeiten zur Gestaltung schneller und sicherer Prozesse“ zu schaffen. Einen Ansatz dies zu leisten stellen Prozeßuntersuchungen an Modellen dar. Eine Reihe von Modellbildungs- und Untersuchungsmethoden sind bereits bekannt. Jedoch können weitere Methoden für die Prozeßentwicklung innerhalb der Produktionstechnik genutzt werden. Eine solche Methode stellt die Ähnlichkeitstheorie dar, die für die Modellierung diskontinuierlicher Produktionsprozesse bisher nicht eingesetzt wurde. Daher fehlt bisher auch die Erfahrung im Umgang mit dieser Methode im Rahmen der Entwicklung produktionstechnischer Prozesse.

Erweitert man den Fokus von einem Verfahren auf die Gesamtheit geeigneter Modellbildungsmethoden, so erkennt man das Defizit einer Systematik, die erlaubt, für ein gegebenes Problem schnell und sicher die geeignete Methode auszuwählen. Dies ist umso notwendiger, als Unternehmen immer weniger Zeit zur Verfügung steht, um auf Veränderungen ihrer unternehmerischen Randbedingungen angemessen zu reagieren. Die Befähigung, entsprechend schnell zu reagieren, erfordert von Unternehmen Wandlungsfähigkeit u. a. in den Fertigungsprozessen (Reinhart 1997, S. 176). Eine

derartige Systematik der Modellbildungs- und Untersuchungsverfahren soll helfen, neben der „time to market“ durch Erhöhung der Reaktionsfähigkeit der Unternehmen auch die „time to customer“ und „time to production“ zu verkürzen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Möglichkeiten von Modellierungsverfahren aufgezeigt werden. Einige Modellbildungsverfahren wurden bereits in Arbeiten behandelt. Hinsichtlich der Ähnlichkeitstheorie als Modellierungsverfahren bestehen für Anwendungen in der Produktionstechnik jedoch Erfahrungsdefizite. Zielsetzung dieser Arbeit ist daher, die Ähnlichkeitstheorie als Methode für die Modellierung und detaillierte Untersuchung von produktionstechnischen Prozessen zu qualifizieren. Die Ähnlichkeitstheorie wird dabei im Kontext mit anderen Modellbildungsverfahren betrachtet, so daß über die Verwendung der Ähnlichkeitstheorie als Methode zur Modellbildung in der Produktionstechnik hinaus ein möglicher Rahmen für den Einsatz der Ähnlichkeitstheorie im Einklang mit bestehenden Modellbildungsmethoden gesteckt wird.

Diese Arbeit soll ferner einen Beitrag leisten, einen Methodenbaukasten bereitzustellen, der Wissen über die problemgerechte Auswahl der benötigten Modellierungs- und Untersuchungsmethoden, qualifiziertes Anwendungswissen bezüglich der betreffenden Methoden und schließlich Erkenntnisse über die Einbindung der Methoden in die betrieblich-industrielle Realität enthält. Damit sollen Prozeßuntersuchungen an Modellen schnell und sicher durchgeführt werden können. Dieser Methodenbaukasten als Werkzeug für die Prozeßuntersuchung soll die in Kap 1.1 geschilderten Nachteile überwinden helfen und einen hohen Reifegrad der Prozeßgestaltung bereits zu einem frühzeitigen Stadium der integrierten Produktentwicklung ermöglichen. Dieser Methodenbaukasten ist jedoch ein Fernziel, für dessen Erreichen hier nur der Grundstein gelegt werden kann.

1.3 Vorgehensweise

Zunächst werden im folgenden Kapitel 2 die für das Verständnis der Arbeit wichtigen Begriffe definiert. Anhand der getroffenen Definitionen wird der Inhalt und die Zielrichtung der Arbeit gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik abgegrenzt.

Nachdem der begriffliche und methodische Hintergrund der Prozeßmodellierung behandelt und Defizite im Stand der Technik aufgezeigt wurden, wird in Kap. 3 die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie in der Produktionstechnik diskutiert. Dabei werden vor allem die Besonderheiten im Umgang mit diesem Verfahren erläutert, die sich aus der Sicht produktionstechnischer Fragestellungen ergeben. Im Anschluß daran wird in

den Kapiteln 4 und 5 eine Ähnlichkeitstheoretische Prozeßmodellierung an einem Anwendungsbeispiel erläutert. Anhand des Anwendungsbeispiels soll das Potential der Ähnlichkeitstheorie zur Lösung produktionstechnischer Fragestellungen aufgezeigt werden. Dabei wird ausgehend von einer Prozeßbeschreibung ein Ähnlichkeitstheoretisches Prozeßmodell entwickelt und in seiner Anwendung in den Punkten Modellierung, Versuchsaufbau, Versuchsdurchführung und Ergebnisauswertung beschrieben. Den Abschluß bildet eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Einsatzes der Ähnlichkeitstheorie anhand des geschilderten Anwendungsbeispiels.

Im Anschluß daran wird in den Kapiteln 6 und 7 ein systematisches Umfeld der Ähnlichkeitstheorie skizziert und die Ähnlichkeitstheorie in diesem Umfeld weiterer Modellbildungsmethoden positioniert. Dazu werden Modellbildungsmethoden von annähernd gleicher Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Abbildungsfähigkeit produktions-technischer Prozesse miteinander verglichen. Bestehende Methoden zur Modellierung und Untersuchung von technischen Prozessen werden dazu in ihrer Zielsetzung und Funktionsweise vorgestellt, aus produktionstechnischer Sicht bewertet und ihrer Eignung gemäß ausgewählt.

Im weiteren wird allgemein auf die Untersuchung technischer Prozesse mit Hilfe von Modellen eingegangen. Basierend auf dem derzeitigen Kenntnisstand wird eine Zuordnung von Problemstellungen und Modellierungs- bzw. Untersuchungsverfahren hergestellt.

Am Ende der Arbeit werden die Ergebnisse in Kap. 8 zusammengefaßt und Ausblicke für weiterführende Untersuchungen gegeben.

Kapitel 2	Prozeßmodellierung und ihre Methoden <ul style="list-style-type: none"> ➢ Begriffsdefinitionen ➢ Einsatz von Prozeßmodellen ➢ Modellbildungsverfahren ➢ Defizite 	Anzahl der betrachteten Modellbildungsmethoden
Kapitel 3	Qualifizierung der Ähnlichkeitstheorie <ul style="list-style-type: none"> ➢ Dimensionslose Darstellung ➢ Auswahl von Modellstoffen ➢ Partielle Ähnlichkeit 	
Kapitel 4	Anwendungsbeispiel: Glaspressen <ul style="list-style-type: none"> ➢ Beschreibung des Produktionsprozesses ➢ Aufgabenstellung ➢ Dimensionslose Prozeßdarstellung ➢ Maßstabsgleichungen 	
Kapitel 5	Evaluierung: Aufbau einer Versuchsanlage <ul style="list-style-type: none"> ➢ Quantifizierung der Parameter ➢ Ermittlung eines Modellstoffes ➢ Dimensionierung der Versuchsanlage ➢ Realisierung der Anlage ➢ Versuche ➢ Fehlerbetrachtung ➢ Erfahrungen mit dem Modellprozeß ➢ Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 	
Kapitel 6	Konzept des Process Prototyping <ul style="list-style-type: none"> ➢ Leistungsumfang ➢ Methodenbereitstellung ➢ Methodenauswahl ➢ Methodenanwendung ➢ Integration in betriebliche Abläufe ➢ Zusammenfassung 	
Kapitel 7	Ausarbeitung des Konzeptes <ul style="list-style-type: none"> ➢ Anforderungsliste an Modellbildungsverfahren ➢ Identifikation von Process-Prototyping-Verfahren ➢ Problemgerechte Methodenauswahl ➢ Verifikation der Auswahlsystematik ➢ Zusammenfassung 	
Kapitel 8	Zusammenfassung und Ausblick	

Abb. 1-2: „Fahrplan“ durch die Kapitel 2 bis 8 dieser Arbeit.

2 Prozeßmodellierung und ihre Methoden

2.1 Begriffsdefinitionen

Im Zusammenhang mit der Modellierung von produktionstechnischen Prozessen spielen die Begriffe „System“, „(Produktionstechnischer) Prozeß“, „Modell“ und „Prototyp“ eine Schlüsselrolle. Um ein einheitliches Verständnis dieser in ihrer Bedeutung unterschiedlich vorbelegten Begriffe zu gewährleisten, werden sie im folgenden kurz definiert.

2.1.1 System

Ein System im Sinne der DIN 66201 ist eine abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden. Solche Gebilde können sowohl Gegenstände als auch Denkmethoden und deren Ergebnisse sein. Diese Anordnung wird durch eine Hüllfläche von ihrer Umgebung abgegrenzt oder abgegrenzt gedacht (*DIN 66201, Teil 1 1981*).

Eine weitgehend ähnliche Definition liefern auch die VDI-Richtlinien. Jedoch ergänzen die VDI-Richtlinien den Systembegriff in praktischer Hinsicht weiter, indem sie postulieren, daß ein System neben Systemgrenzen und darin enthaltenen Komponenten, die miteinander wechselwirken, auch durch Zustandsgrößen und -übergänge gekennzeichnet ist. Daneben muß ein System eine Aufbaustruktur vorweisen und die Zustandsübergänge einer Ablaufstruktur und -logik folgen (*VDI-Richtlinie 3633 1996*).

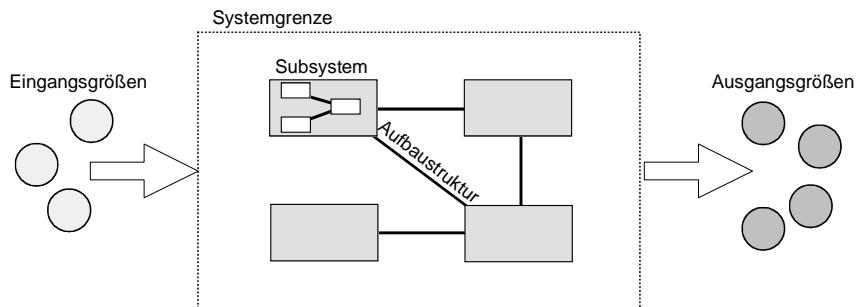


Abb. 2-1: Prinzipskizze eines Systems.

2.1.2 Prozeß

Hinsichtlich des Begriffes „Prozeß“ sind die Definitionen der DIN-Normen und der VDI-Richtlinien identisch. Ein Prozeß bezeichnet demnach die Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird (*DIN 66201, Teil 1 1981; VDI-Richtlinie 3633 1996*). Ein technischer Prozeß ist nach *DIN 66201, Teil 1 (1981)* ein Prozeß, dessen physikalische Größen mit technischen Mitteln erfaßt und beeinflußt werden können. Dementsprechend stellt ein Prozeß einen Teil eines Systems dar. In dieser Arbeit werden produktionstechnische Prozesse betrachtet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den diskontinuierlichen Prozessen. Unter produktionstechnischen Prozessen im Sinne dieser Arbeit werden Prozesse verstanden, die zu den Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580 (*DIN 8580 1985, S. 3*) zu rechnen sind (s. Abb. 2-2). Die dort verwendete Definition der Fertigungsverfahren, die „alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern“ (*DIN 8580 1985, S. 1*) umfaßt, schließt auch Montageprozesse mit ein. Diese sind hauptsächlich in der Hauptgruppe 4 „Fügen“ enthalten.

Im Zusammenhang mit produktionstechnischen Prozessen sind die Geschäftsprozesse zu nennen. Nach *Reinhart & Goldstein (1994)* bezeichnet man mit dem Begriff des Geschäftsprozesses "eine logische Reihenfolge zweckbetonter Handlungen betriebswirtschaftlichen, administrativen oder technischen Inhalts zur Transformation von Material, Energie und/oder Information". Die Prozesse, die in dieser Arbeit behandelt werden, erstrecken sich nach dieser Definition nur auf Handlungen technischen Inhalts. Betriebswirtschaftliche und administrative Handlungen werden nicht betrachtet.

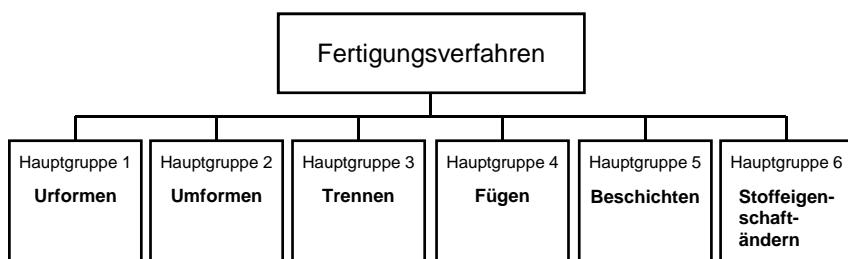


Abb. 2-2: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (DIN 8580 1985, S. 3).

2.1.3 Modell

Ein Modell nach *DIN 19226, Teil 1 (1994)* ist "die Abbildung eines Systems oder Prozesses in ein anderes begriffliches oder gegenständliches System, das aufgrund der Anwendung bekannter Gesetzmäßigkeiten, einer Identifikation oder auch getroffener

Annahmen gewonnen wird und das System oder den Prozeß bezüglich ausgewählter Fragestellungen hinreichend genau abbildet.“

Eine derartige Definition des Modellbegriffes ist sehr allgemein und geht über die im Sinne dieser Arbeit benutzte Vorstellung von einem Modell weit hinaus. Zielsetzung dieser Arbeit (Kap. 1.2) ist es, Prozeßuntersuchungen an einem Prozeßprototypen durchzuführen. Daraus ergibt sich, daß die Modellierung eines Prozesses zu einem Prototypen führen soll. Es ist daher sinnvoll, den aus DIN 19226, Teil 1 weitgefaßten Modellbegriff durch den Begriff des Prototypen im Sinne dieser Arbeit einzugrenzen.

2.1.4 Prototyp

Eine Festlegung des Begriffes Prototyp durch Normen oder normenähnliche Schriften existiert nicht. Maßgebliche Definitionen eines Prototypen in der Literatur finden sich bei *Gebhardt (1996, S. 22)* und *Eversheim & Klocke (1998, S. 150)*. Die dort vorgetragenen Definitionen beziehen sich allerdings lediglich auf gegenständliche Produkte und nicht auch auf Prozesse. Als Anhaltspunkt für die Verdeutlichung der Aufgaben und Bedeutung von Prozeßprototypen kann die Definition des Produktprototypen jedoch dienen. Nach der strengen Begriffsdefinition Gebhardts entspricht ein Prototyp bereits weitgehend, gegebenenfalls sogar vollständig, dem endgültigen Serienmuster. Als Produkt unterscheidet sich der Prototyp vom Serienprodukt lediglich durch das Produktionsverfahren. Funktionell muß der Prototyp die frühzeitige Überprüfung einzelner oder mehrerer Produkteigenschaften ermöglichen. Der Detaillierungsgrad des Prototyps entspricht der des Serienproduktes (*Gebhardt 1996, S. 22*).

Eine allgemeinere Definition eines Produktprototypen geben *Eversheim & Klocke (1998, S. 150)*. Danach ist bereits die erste materielle Visualisierung eines in der Entwicklung befindlichen Produkts ein Prototyp. Diese Definition des Prototypen wird bereits zwei Jahre zuvor an anderer Stelle von Eversheim, Klocke, Pfeifer und Weck (*Eversheim u. a. 1996, S. 3-21*) identisch formuliert. Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Produktprototypen fordern Eversheim, Klocke, Pfeifer und Weck, daß Prototypen „keineswegs in allen Punkten den Gestaltungs-, Funktions-, Qualitätsanforderungen des späteren Serienproduktes genügen [müssen], sondern sie müssen lediglich die Schwachstellen in der Entwicklung aufdecken“ (*Eversheim u. a. 1996, S. 3-23*). Aus der neueren Argumentation von *Eversheim & Klocke (1998, S. 150 f.)* geht außerdem hervor, daß der dort verwendete Prototypenbegriff auf Analysen der Produktentwicklungsabläufe verschiedener Unternehmen zurückgeht und somit im Vergleich zu Gebhardts theoretischer Begriffsdefinition einen deutlich stärkeren Bezug zur betrieblichen Praxis aufweist.

Da weder eine verbindliche normative Definition eines Produktprototypen noch eines Prozeßprototypen existiert, ist es sinnvoll, die Anforderungen an einen Prozeßprototypen ausgehend von bestehenden Beschreibungen eines Produktprototypen in der Literatur zu erarbeiten. Bei dem Versuch, die Kennzeichen eines Prototypen vom Produkt auf einen Prozeß zu übertragen, genügt ein einfaches Ersetzen der Begriffe nicht. Es bietet sich hier an, die juristische Methodik zur Auslegung von Normen zu über-

nehmen (s. Abb. 2-3), die ausgehend vom Wortlaut, über den Sinn und Zweck der Norm, der Einordnung im Gesamtkontext, bis hin zur historischen Entwicklung des Begriffes reicht (Brox 1995, S. 35 ff.).

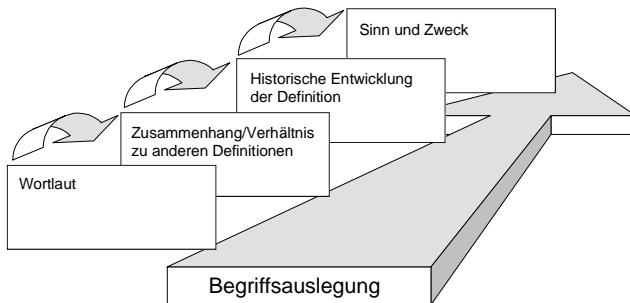


Abb. 2-3: Juristische Methodik der Begriffsauslegung anhand bereits bestehender Begriffsdefinitionen.

Wortlaut

Der Begriff Prototyp stammt aus dem Griechischen und setzt sich aus den Silben „proto“ (dt.: erster, vorderster, ur-) und „typos“ (dt.: Gepräge, Muster, Urbild) zusammen (Geuer 1996, S. 2). Dementsprechend bezeichnet ein Prototyp den „ersten seiner Art“. Dies entspricht der Auffassung des Prototypen von Eversheim und Klocke.

Einordnung in bestehende Begriffsdefinitionen

Um die geforderte Überprüfbarkeit des Prozesses auf Eigenschaftsebene sicherzustellen, soll der Prototyp eines Prozesses weitgehend mit dem späteren Originalprozeß übereinstimmen. Gemäß der Definition des Prozeßbegriffes nach DIN 66201, Teil 1, (1981) bedeutet dies, daß die in Wechselwirkung stehenden Vorgänge eines Systems in der prototypenhaften Realisierung weitgehend mit denen des späteren Prozesses übereinstimmen müssen. Der Detaillierungsgrad des Prozeßprototypen kommt daher dem des späteren Prozesses nahe. Den hohen Grad an Detaillierung bei einem Prototypenmodell erkennt man auch an der Einordnung der Prototypen innerhalb der Modellhierarchie. Bei der strengen Definition des Prototypenbegriffs nach Gebhardt wird der Prototyp zwischen dem Funktionsmodell (weniger detailliert) und dem Muster (stärker detailliert) eingeordnet. Ein Muster entstammt dabei dem Originalprozeß (Gebhardt 1996, S. 23) und stellt somit bereits ein entartetes Modell dar. Das Funktionsmodell ermöglicht die frühzeitige Prüfung einzelner Funktionen, wie bspw. Montierbarkeit (Gebhardt 1996, S. 23).

Historische Entwicklung des Prototypenbegriffes

Die historische Entwicklung des Prototypenbegriffes ist für den hier betrachteten technischen Bereich nur in der neueren Zeit, d. h. seit der Industrialisierung interessant.

Hier wurde der Prototypenbegriff lange Zeit in seinem wörtlichen Sinn verwendet, um „den ersten seiner Art“ zu bezeichnen. Die als Prototypen bezeichneten Gegenstände, etwa Serienprototypen in der Automobilindustrie, entsprachen der Definition Gebhardts.

In der letzten Zeit hat der Prototypenbegriff, offensichtlich bedingt durch technologische Innovationen, eine breitere Verwendung gefunden. Mit dem Auftauchen des Begriffes des „Virtual Prototyping“ wurde der Prototyp seiner Gegenständlichkeit enthoben, was durch die Entwicklung der Technologie der elektronischen Datenverarbeitung zwangsläufig einen Verlust an Funktionalität des Prototypen mit sich brachte. Dadurch haben sich die Inhalte des Prototypenbegriffes geändert. Der veränderte Funktionalitätsinhalt des Prototypenbegriffes hat sich auf die gegenständlichen Prototypen übertragen. Heute wird ein breites Spektrum an Bauteilen, die durch Technologien wie Rapid Prototyping erzeugt werden, ebenfalls als Prototypen bezeichnet, obwohl sich die Funktionalität dieser Bauteile abhängig vom jeweils eingesetzten Herstellungsverfahren stark unterscheiden. Diese Rapid Prototyping-Verfahren stehen kommerziell seit Ende der neunziger Jahre zur Verfügung (*Eversheim u. a. 1996, S. 3-22*).

Eine weitere Ursache, die den Prototypenbegriff nicht eindeutig erscheinen lässt, mag die Tatsache sein, daß der Begriff des Prototypen in den Sprachen der bedeutenden westlichen Industrienationen nahezu identisch ist. So konnte sich der Prototypenbegriff in den einzelnen Nationen entwickeln. Diese Nuancen an Bedeutung und Inhalt treffen nun im Zeitalter der Globalisierung aufeinander.

Sinn und Zweck des Prototypeneinsatzes

Da der Einsatz der Prozeßprototypen vor allem in Unternehmen eine wichtige Rolle spielt, soll die Definition des Prototypenbegriffes für Prozesse den Sinn und Zweck der Prototypenverwendung stark berücksichtigen, was dem aktuelleren und praxisnäheren Bild Eversheims und Klockes vom Produktprototypen entspricht. Zweck des Einsatzes von Prozeßprototypen innerhalb der Entwicklung produktionstechnischer Prozesse ist, den Reifegrad des geplanten Prozesses frühzeitig zu erhöhen. Daher macht ein Prozeßprototyp nur dann Sinn, wenn er in der Lage ist, zum Informationsgewinn innerhalb des Entwicklungsprozesses beizutragen. Deshalb sollte der Prototyp die frühzeitige Überprüfung aller wichtigen Prozeßeigenschaften ermöglichen. Als Prozeßeigenschaften sind die für den Prozeßablauf (d. h. für den Ablauf von Vorgängen, die zueinander in Wechselwirkung stehen) wesentlichen Merkmale zu verstehen. Dazu zählt insbesondere das Prozeßergebnis - das ist im Falle produktionstechnischer Prozesse das Produkt. Diese Anforderung geht über die Forderung Gebhardts nach der frühzeitigen Überprüfung einzelner oder mehrerer Eigenschaften hinaus, ist aber im Hinblick auf eine deutliche Abgrenzung vom Funktionsmodell sinnvoll.

Nach *Gebhardt (1996, S. 22)* unterscheidet sich der Prototyp vom Produkt lediglich durch das Produktionsverfahren (s. dazu auch *Geuer 1996, S. 3*). Abstrahiert man diesen Sachverhalt, so erkennt man, daß das Verfahren, mit dem man einen Prototyp erzeugt, keinen Einfluß auf die Aussagefähigkeit desselben hat, solange alle übrigen Anforderungen an einen Prototypen erfüllt werden. Prototypen in Form von Prozeßmo-

modellen werden durch Modellierungsverfahren erzeugt. Aufgrund der untergeordneten Bedeutung des Herstellungsverfahrens für die Aussagefähigkeit des Prototypen ist die Wahl des Modellierungsverfahrens für die Erzeugung des Prozeßprototypen frei und wird lediglich durch die zuvor genannten Anforderungen hinsichtlich der Überprüfbarkeit der Prozeßeigenschaften determiniert. Aus diesem Grund braucht ein Prototyp eines Prozesses nicht notwendigerweise gegenständlich zu sein. Die Ausdehnung der Prozeßprototypen auf virtuelle Modelle steht nicht im Widerspruch zu den Produktprototypen. Dort werden im Rahmen von Virtual Prototyping nicht-gegenständliche Produktprototypen erzeugt (Geuer 1996, S. 24). Dies steht im Gegensatz zu Eversheim und Klocke, die eine materielle Visualisierung fordern. Vor dem Hintergrund der Zweckerfüllung ist materielle Realisierung eines Prototypen jedoch nicht zwingend.

Eversheim und Gebhardt unterscheiden sich zwar nicht im Ziel des Prototypeneinsatzes, jedoch im Aspekt des Detaillierungsniveaus des Prototypen. Während Gebhardt nahezu Seriennähe fordert, genügt Eversheim u. a. ein Detaillierungsniveau, das auseicht, um Schwachstellen in der Entwicklung aufzuzeigen. Die Festlegung des Detaillierungsgrades bei Gebhardt ist absolut, die Eversheims ist zweckorientiert-relativ. Es erscheint vor dem Hintergrund der erforderlichen Wandlungsfähigkeit von Systemen sinnvoller, dem zweckorientierten Verständnis Eversheims zu folgen. Es sollte dahingehend ausgelegt werden, daß ein Prozeßprototyp so detailliert sein sollte, daß er möglichst sämtliche Schwachstellen der Entwicklung aufzeigen kann. Damit muß ein Prozeßprototyp alle wesentlichen Prozeßeigenschaften abbilden.

Somit steht die für diese Arbeit relevante Definition des Prozeßprototypen fest. Sie lehnt sich an die Beschreibung der Produktprototypen an. Abschließend lassen sich folgende Merkmale von Prozeßprototypen zusammenfassen:

- Alle wesentlichen Prozeßeigenschaften müssen abgebildet sein.
- Alle wesentlichen Prozeßeigenschaften müssen untersuchbar sein.
- Der Prozeßprototyp kann gegenständlich oder virtuell sein.

In Zusammenhang mit dem Erkenntnisgewinn durch Untersuchungsarbeit an Modellen ist die Simulation zu nennen. Gemäß der VDI-Richtlinie 3633 versteht man unter Simulation "*Ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind*". Im weiteren Sinne subsumiert diese VDI-Richtlinie unter dem Begriff Simulation alle Tätigkeiten, innerhalb derer gezielte Experimente mit einem Simulationsmodell vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet werden (VDI-Richtlinie 3633 1996, S. 14). In diesem Sinne kann die Arbeit mit Prozeßprototypen als Simulation aufgefaßt werden, da hier ebenfalls Modelle als Grundlage des Erkenntnisgewinns herangezogen werden. Die Tatsache, daß im Rahmen von Process Prototyping von Prozeßuntersuchung anhand von Prototypen und nicht von Simulation die Rede ist, soll den größeren Umfang an abgebildeten physikalischen Wechselwirkungen deutlich zum Ausdruck bringen (s. Abb. 2-4). Erkenntnisse über methodisches Vorgehen bei der Prozeßuntersuchung an Modellen, die im Rahmen von

Simulationsarbeit gewonnen wurden, sind höchstwahrscheinlich auf den Umgang mit Prozeßprototypen übertragbar.

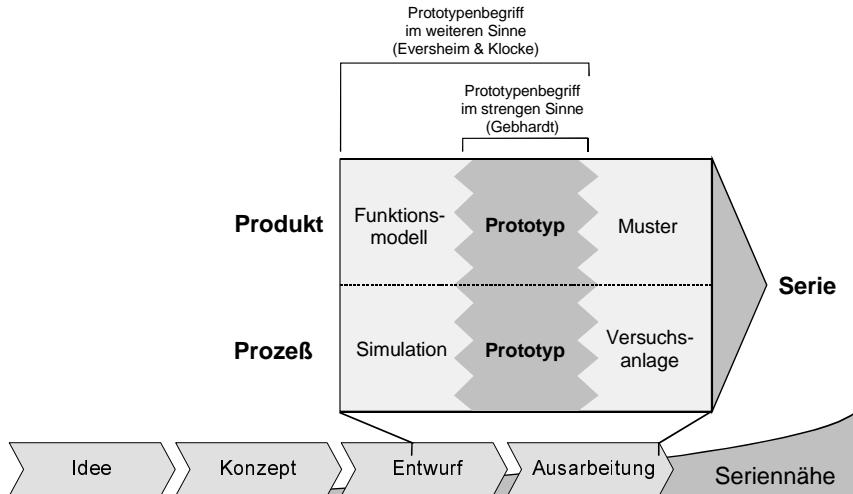


Abb. 2-4: Einordnung der Prototypen in den Entwicklungsprozeß. Die Grenzen zwischen den einzelnen Stadien verlaufen aufgrund der unterschiedlichen Begriffsauffassungen fließend.

2.2 Einsatz von Prozeßmodellen

Prozeßprototypen stellen eine Teilmenge aller Prozeßmodelle dar. Im Gegensatz zu dem Oberbegriff der Prozeßmodelle sind Prozeßprototypen durch ihren Detaillierungsgrad, ihre umfangreiche Experimentierbarkeit sowie ihren Einsatzzweck eindeutig ausgerichtet. Aussagen und bisherige Erkenntnisse über das methodische Vorgehen beim Einsatz von Prozeßmodellen sind jedoch auch für Prozeßprototypen gemäß der vorstehenden Definition gültig. Aus Gründen der wissenschaftlichen Abstraktion sowie der Allgemeingültigkeit wird im Stand der Technik die Diskussion der Prozeßmodelle fortgeführt.

2.2.1 Motivation

Die Motivation, Prozeßmodelle zu bilden, hängt stark vom Zweck des Modelleinsatzes ab. Übergeordnetes und damit allgemeingültiges Ziel des Einsatzes von Modellen ist, mit ihrer Hilfe Zusammenwirken und Zusammenhänge in der Realität durchschaubar und Entwicklungen bzw. Verhaltensweisen vorhersehbar zu machen. Hauptsächlich

werden Modelle auf jene realen Situationen angewendet, die für experimentelle Untersuchungen an Originalprozessen bzw. -anlagen

- zu kostspielig,
- zu komplex,
- zu zeitaufwendig oder
- unzugänglich sind (*Charwat 1992, S. 298*).

Aus produktionstechnisch-betriebswirtschaftlicher Sicht lassen sich die drei ersten Gründe Charwats für den Einsatz von Modellen zu einem Fall des unwirtschaftlichen Experimentierens zusammenfassen, da Zeitaufwand und Komplexität letztlich Kosten verursachen, die Prozeßuntersuchungen an realen Anlagen aus wirtschaftlicher Sicht nicht mehr rechtfertigen. *Robinson (1994, S. 7)* nennt im Prinzip ähnliche Gründe, die dafür sprechen, Untersuchungen an Modellen durchzuführen und überschreibt diese mit den Schlagworten

- Kosten,
- Wiederholbarkeit,
- Variation der zugrundegelegten Zeit und
- Sicherheit und Gesetzeskonformität.

Im Vergleich zu Charwat differenziert Robinson jedoch stärker und bildet die Gründe für den Einsatz von Modellen, die abseits der Kosten liegen, stärker heraus: Die Wiederholbarkeit zielt auf die Verfügbarkeit exakt einstellbarer Versuchsbedingungen ab. Dies ist im Falle von Prozessen, die nicht nur zur Versuchsdurchführung eingerichtet werden, sondern dem Alltagsbetrieb entstammen, in der Regel nicht der Fall.

Von besonderem Interesse ist die Möglichkeit zur Variation der zugrundegelegten Zeit. Viele Prozesse laufen in der Realität entweder so langsam ab, daß es nicht möglich ist, mehrere Szenarios zu testen, oder der Prozeßablauf ist so schnell, daß wesentliche Wechselwirkungen nicht unmittelbar beobachtet werden können.

Der Punkt der Sicherheit und Gesetzeskonformität zielt auf Prozesse ab, für die erhöhte Sicherheitsbestimmungen bestehen, etwa beim Umgang mit explosiven, giftigen oder radioaktiven Materialien. Hier würden Untersuchungen an bestehenden Prozessen, innerhalb derer neue Ideen und Abläufe getestet würden, die Sicherheit der Mitarbeiter, der mittel- bzw. unmittelbaren Prozeßumgebung gefährden und gegebenenfalls sogar gegen bestehende Gesetze verstossen.

2.2.2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise bei der Untersuchung von Prozessen anhand von Prozeßprototypen und Prozeßmodellen ist im Prinzip unabhängig von der verwendeten Modellierungsmethode. Dies geht implizit aus der *VDI-Richtlinie 3633 (Blatt 1 1993)* hervor.

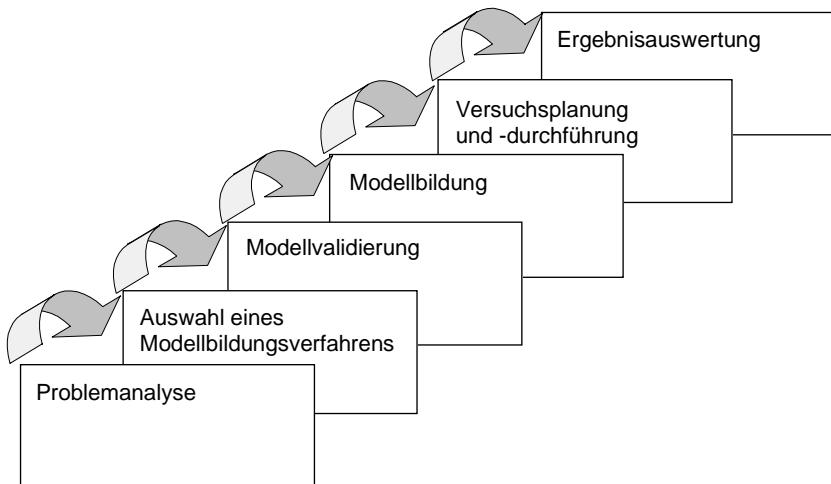


Abb. 2-5: *Sequentielle Einzelschritte bei der Prozeßuntersuchung mit Prozeßmodellen.*

Im folgenden wird das grundsätzliche Vorgehen bei der Untersuchung von Prozessen mit Hilfe von Prozeßmodellen kurz erläutert. Die Vorgehensweise ist dabei an der *VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1 (1993)* angelehnt, die die Simulation von Produktionsystemen beschreibt. Eine nahezu identische Vorgehensweise beschreibt jedoch auch *Dreyer (1993)* für die Untersuchung von Systemen mit Hilfe von mathematischen Modellen, so daß die Methodik als gesichert angesehen werden kann (s. Abb. 2-5).

2.2.2.1 Problemanalyse

Aus der Detaillierung der Problemstellung erwächst ein konkretes Problemverständnis sowie eine konkrete Aufgabenstellung. Dies gilt für die Ebene der gedanklichen Problemdurchdringung ebenso wie für die ingenieurwissenschaftlich-technische Problembeschreibung im engeren Sinne.

Eine gängige Methode, ein bestehendes Problem im Rahmen der Anwendung von Prozeßmodellen zu detaillieren und in eine konkrete Aufgabenstellung überzuführen, ist das Aufstellen eines Zielsystems.

Zielsysteme umfassen Kenngrößen, die das Verhalten eines Systems im Hinblick auf seine Aufgabe charakterisieren. Im Bereich der Simulationsanwendungen kommt der Definition eines Zielsystems vor allem im Hinblick auf die Modellentwicklung und die Experimentplanung große Bedeutung zu (*VDI 3633 1993, S. 10*).

Durch die Verwendung von Prozeßprototypen stehen wesentliche Punkte der Modellbildung wie z. B. der Detaillierungsgrad bereits weitgehend fest. Im Rahmen der Modellentwicklung kann dem Zielsystem eine Bedeutung bei der grundsätzlichen Ent-

scheidung über die Verwendung von Prozeßprototypen sowie bei der Auswahl des für die Modellbildung eingesetzten Modellierungsverfahrens zukommen. Daneben bleibt die Rolle des Zielsystems bei der Experimentplanung bestehen.

2.2.2.2 Auswahl eines Modellbildungsverfahrens

Ein wesentliches Defizit des Standes der Technik stellt das fehlende Wissen um die Auswahl des Modellbildungsverfahrens dar. In nahezu allen Arbeiten, die Prozeßuntersuchungen an Modellen zum Inhalt haben, wird ausschließlich die Lösung des gegebenen Problems mit Hilfe der Simulationstechnik dargestellt. Die Entscheidung für oder gegen ein bestimmtes Simulationsverfahren wird dagegen nicht transparent. Es ist daher zu vermuten, daß sich Simulationsanwender bisher eher intuitiv für ein Modellbildungs- und Simulationsverfahren entscheiden. Dies wird beispielsweise bei Fishwick (1995, S. 5) deutlich, der die Auswahl der Methode, um zu einem Modell zu gelangen, als „*vielleicht das generell schwierigste Problem in der Simulation*“ bezeichnet. Fishwick (1995, S. 2 f.) geht kurz auf die Möglichkeit ein, einen technischen Sachverhalt entweder körperlich oder digital zu modellieren, gibt jedoch dabei keinerlei Entscheidungshilfe und konzentriert sich im weiteren Verlauf seiner Arbeit ausschließlich auf die computerbasierte Simulation.

Es existieren Methoden für die Bewertung technischer Lösungen bzw. Lösungskonzepte, hauptsächlich im Bereich der Konstruktion. Bisher ist keine Anwendung eines Bewertungssystems für die Auswahl eines Modellbildungsverfahrens bekannt.

2.2.2.3 Modellbildung

Die Modellbildung oder Modellierung eines Prozesses umfaßt das Umsetzen eines existierenden oder gedachten Prozesses in ein experimentierfähiges Modell (VDI 3633 1993, S. 11). In der Regel kann der reale Prozeß in einem Modell nicht exakt nachgebildet werden. Aus diesem Grund wird die Modellierung eines Prozesses der jeweiligen Fragestellung an den Prozeß angepaßt. Zäh (1995, S. 43) nennt die Zweckmäßigkeit als maßgebliches Kriterium für ein Modell. Den Regeln der Zweckmäßigkeit folgend, muß ein Modell

- so genau wie nötig und
- so einfach wie möglich sein (Zäh 1995, S. 43).

Die Umsetzung des Originalprozesses in ein Modell umfaßt zwei Aktivitäten, die Analyse und die Abstraktion. Die Analyse dient der Auflösung und Zergliederung des Prozesses in seine wesentlichen Merkmale und Funktionsprinzipien zum Zwecke der Klarlegung der innerhalb des Prozesses wechselwirkenden Vorgänge. Bei der Analyse des Prozesses soll die Komplexität des Originalprozesses durch sinnfällige Strukturierung aufgelöst werden.

Die Abstraktion führt zu einer Verallgemeinerung des Prozesses und der Loslösung vom Gegenständlichen. Mit Hilfe der Abstraktion soll darüber hinaus die wesentliche

Substanz des Prozesses herausgearbeitet werden. Dazu bedient sich die Abstraktion zweier Verfahren: der Reduktion und der Idealisierung. Die Reduktion führt zu einem Ausschluß unwesentlicher Details bei der Prozeßbetrachtung, während die Idealisierung unverzichtbare Einzelheiten des zu betrachtenden Prozesses vereinfacht.

Die Abstraktion bestimmt den Detaillierungsgrad des Prozeßmodells. Da in bezug auf Modelle mit Prototypenqualität der Detaillierungsgrad im allgemeinen feststeht, ist die Durchführung von Reduktionen und Idealisierungen aus technisch-operativer Sicht nur in engen Grenzen sinnvoll. Dadurch wird die Realisierung des Modells und damit die spätere Untersuchung des Modells vielfach erleichtert oder gar erst ermöglicht.

Dieser Erkenntnisprozeß bestehend aus Analyse und Abstraktion steht am Anfang eines jeden Modellierungsvorganges und ist von der späteren Implementierung oder Realisierung des Modells unabhängig (*VDI 3633 1993, S. 13*).

2.2.2.4 Modellvalidierung

Unter Validierung versteht man die Prüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Original. Die Validierung ist gewöhnlich ein iterativer Prüf- und Korrekturprozeß innerhalb der Modellbildung. Feste Regeln für das Vorgehen bei der Validierung eines Modell existieren nicht (*VDI 3633 1993, S. 17 f.*).

Die Validierung für Modelle bereits existierender Anlagen bzw. Prozesse ist in der Regel wesentlich einfacher als im Falle geplanter Prozesse, da eine breite Datenbasis bezüglich des Originalprozesses entweder bereits vorliegt oder zumindest erarbeitet werden kann. Anhand dieser Daten läßt sich ein Modell dahingehend überprüfen, ob gleiche Eingangsdaten für Modell- und Originalprozeß zu gleichen Ausgangsdaten führen.

Stehen dagegen keine Daten der Originalanlage zur Verfügung, wird die Modellvalidierung deutlich erschwert. Im Prinzip kann in diesem Fall eine Bewertung des Modells lediglich anhand von Erfahrungswissen nach Plausibilitätskriterien durchgeführt werden. Dies erhöht die Anforderungen an den Umfang der erforderlichen Wissens- und Erfahrungsbasis hinsichtlich des geplanten Prozesses.

2.2.2.5 Versuchsplanung und -durchführung

Im Prinzip besteht zwischen Versuchen am Modell und Versuchen am Original kein Unterschied: In beiden Fällen wird die Antwort des Systems auf eine bestimmte Ausgangssituation beobachtet. Da jedes System eine individuelle Verknüpfung von Zustandsgrößen und -übergängen darstellt, existieren für Versuche am Modell keine selbstoptimierenden Algorithmen. Dementsprechend ist bei der Versuchsdurchführung ein iteratives Vorgehen notwendig. Aus diesem Grund ist die Versuchsplanung bei Modellversuchen besonders wichtig. Ihre Aufgabe ist es, die zu variierten Parameter und deren Werte zu definieren und als Reihenfolge so zu systematisieren, daß das Ziel des Versuchs mit möglichst wenigen Experimentierschritten erreicht wird (*VDI*

3633 1993, S. 19). Hier eignen sich grundsätzlich die üblichen Verfahren zur Versuchsplanung, wie die ein-, teil- oder vollfaktorielle Versuchsplanung sowie die Versuchsplanung nach Taguchi oder Shainin (Reinhart u. a. 1996, S. 132 ff.). Die beiden letztgenannten eignen sich besonders bei einer großen Anzahl prozeßbeeinflussender Parameter.

Die Durchführung der Versuche selbst hängt stark von den zuvor definierten Zielen ab (s. Kap. 2.2.2.1), die mit den Experimenten am Modell verfolgt werden. Häufig bedingen sich die Planung zukünftiger Versuche und Ergebnisse bisheriger Experimente. Die Versuchsdurchführung an Modellen kann als systematisches Probieren aufgefaßt werden, bei dem sich der folgende Versuch zu einem mehr oder weniger großen Teil aus den Resultaten vorangegangener Versuche ergibt.

2.2.2.6 Ergebnisauswertung

Im Rahmen der Untersuchung von Prozessen anhand von Prototypen oder Modellen liegen die Ergebnisse mitunter nicht in der für den Originalprozeß üblichen Form vor. In einem derartigen Fall ist es zunächst notwendig, die Ergebnisse formell verständlich zu machen, d. h. sie in eine auf die Originalausführung des Prozesses anwendbare Darstellung zu überführen. Die dazu nötigen Verfahren hängen vom gewählten Modellierungsverfahren ab. Ziel der Ergebnistransformation ist in der Regel, die am Modell gewonnenen Werte in den für den Originalprozeß üblichen und gewünschten physikalischen Größen und Einheiten darzustellen. Dadurch werden Ergebnisse miteinander vergleichbar, die auf unterschiedliche Art und Weise gewonnen werden. Die Ergebnistransformation in das physikalische System des zu untersuchenden Originalprozesses ermöglicht darüber hinaus auch Personen, die mit der Durchführung der Modellversuche weniger bis gar nicht vertraut sind, sich ein realistisches Bild von den tatsächlichen Abläufen zu machen.

2.3 Bestehende Methoden zur Bildung von Prozeßmodellen

Es existieren zahlreiche Methoden, Prozesse in einem Modell abzubilden. Sie alle näher zu erläutern würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Deshalb wird im folgenden eine Auswahl von Modellierungsmethoden in ihrer Funktionsweise und in ihrer bisherigen Anwendung dargestellt. Diese Darstellung ist Grundlage einer späteren Bewertung der Modellbildungsverfahren hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit zur Erzeugung von Prozeßprototypen.

Bei der Vorauswahl der Methoden wurde zunächst die Modellhierarchie des VDI herangezogen (s. Bild Abb. 2-6). Die Prozeßprototypen sollen bei der Prozeßentwicklung dazu dienen, wesentliche Eigenschaften des geplanten Prozesses zu untersuchen.

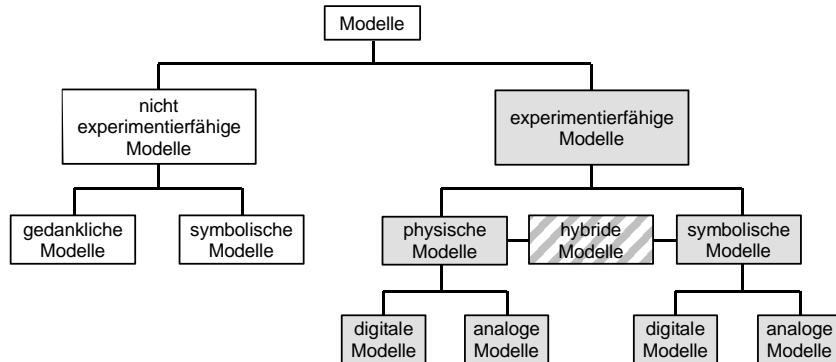


Abb. 2-6: Modellhierarchie nach VDI-Richtlinie 3633. Die in dieser Arbeit betrachteten Modellarten sind hervorgehoben. (VDI 3633, S. 12).

Aus diesem Grund kommen lediglich Modellierungsmethoden in Frage, die zu experimentierfähigen Modellen mit ausreichend hohem Detaillierungsgrad führen. Innerhalb der experimentierfähigen Modelle existieren körperliche und symbolische Modelle. Für beide Arten der Modellbeschreibung wurden Modellierungsmethoden nach ihrer Leistungsfähigkeit bei der Abbildung ausgewählt, d. h. danach, ob die aus ihnen hervorgehenden Modelle ein ausreichend hohes Detaillierungsniveau erwarten lassen (s. Abb. 2-7).

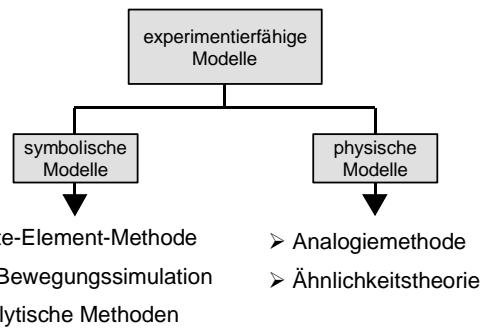


Abb. 2-7: Ausgewählte, nahezu äquivalente Modellbildungsmethoden, die im folgenden dargestellt werden.

2.3.1 Symbolische Modellbildung von Prozessen

Innerhalb der symbolischen Modellbildungsverfahren werden die Finite-Element-Methode, die 3D-Bewegungssimulation sowie analytische Verfahren betrachtet. Diese drei Verfahren werden üblicherweise eingesetzt, um auf Komponentenebene Wissen an Modellen zu erarbeiten (*Amann 1992*).

2.3.1.1 Finite-Element-Methode

Funktionsweise

Die Finite-Element-Methode stellt eine Methode zur Erstellung eines diskreten Modells der Realität dar. Bei der Modellbildung wird ein Kontinuum durch eine diskrete Menge ‘finiter’, d. h. endlich kleiner Elemente abgebildet. Diese Elemente werden als an Knotenpunkten zusammenhängend gedacht. Die Knotenpunkte wiederum sind in ihrer Anzahl begrenzt und befinden sich an den Rändern der Elemente.

Weiterhin wird ein Satz von Näherungsgleichungen bestimmt, der eine Systemvariable innerhalb jedes finiten Elementes in Abhängigkeit anderer Größen beschreibt (z. B. Kräfte im Element in Abhängigkeit der Knotenverschiebungen). Die Näherungsgleichungen sind dabei lediglich an den Knoten exakt. Stoffimmanente Eigenschaften des modellierten Körpers werden durch Matrizen den Knoten der Elementstruktur zugeordnet (*Zienkiewicz 1989*).

Für die Modellierung von Bauteilen existieren eine Reihe von Elementformen, die auf spezielle Klassen von Aufgabenstellungen angepaßt sind.

In der Regel wird die Finite-Element-Methode auf der Basis bestehender, kommerziell erhältlicher EDV-Programme angewendet. In diesen Programmen sind üblicherweise bereits Näherungsgleichungen für unterschiedliche Anwendungsfälle hinterlegt. Auch das Aufstellen großer und komplexer Matrizen und die Diskretisierung der zu untersuchenden Struktur in finite Elemente wird von den Programmen übernommen oder zumindest unterstützt.

Die operative Funktion des Anwenders besteht in der Modellbildung und der Ergebnisinterpretation. Dazu gehört die Auswahl der verwendeten Elementtypen, die problemgerechte Diskretisierung des zu untersuchenden Bauteiles und die Modellierung der Belastungen und Randbedingungen. Gerade für die Modellbildung ist in der Regel beträchtlicher Aufwand nötig, da es darum geht, den natürlichen kontinuierlichen Prozeßablauf ohne allzu große Verfälschungen in ein rechnergestütztes diskretes Modell zu übertragen. Die Qualität des Modells entscheidet maßgeblich über die Qualität der Ergebnisse aus der Modelluntersuchung. Nach Ablauf der Berechnungen können die Ergebnisse in unterschiedlicher Weise dargestellt und interpretiert werden. Die Darstellung selbst wird vom Rechner unterstützt, die Interpretation obliegt dagegen dem Systemanwender.

Bisherige Arbeiten

Die Finite-Element-Methode hat ihren Verbreitungsgrad durch die immense Leistungssteigerung der elektronischen Datenverarbeitungsanlagen und deren gleichzeitigen Preisverfall enorm gesteigert. Nach *Fleischer (1996)* stellt die Finite-Element-Methode mittlerweile das wichtigste Simulationsinstrument dar.

Die Finite-Element-Methode wird in allen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen zur Lösung komplexer Probleme eingesetzt. Eine detaillierte Darstellung der bisherigen Anwendungen der FEM würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Im folgenden werden deshalb konkret die Anwendungen der FEM zur Modellierung von Prozessen betrachtet. Wie *Reinhart & Feldmann (1997, S. 37)* zeigen, ruht der Schwerpunkt der industriellen FEM-Anwendungen auf der Auslegung und Dimensionierung eines Bauteiles (ca. 85%). Lediglich 6% der industriellen Nutzer von FEM-Systemen in Deutschland setzen die Finite-Element-Methode zur technischen Prozeßplanung ein (s. Abb. 2-8) (*Reinhart & Feldmann 1997*).

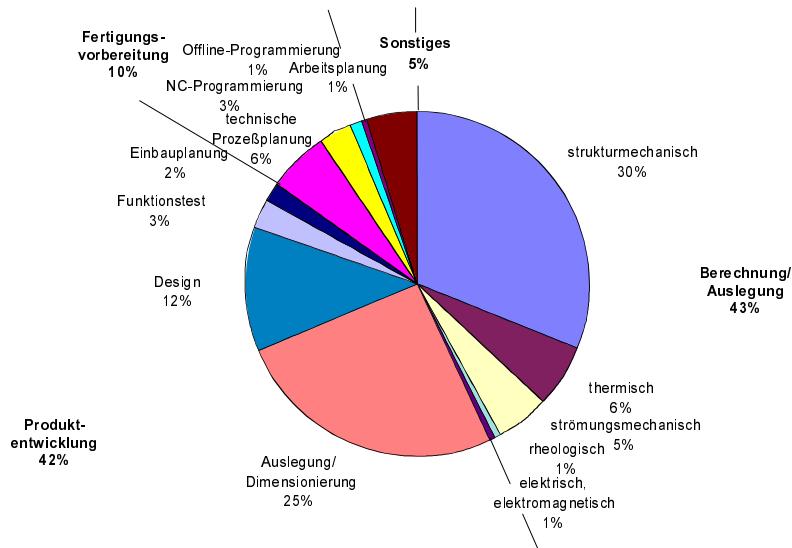


Abb. 2-8: Anwendungsbereiche der FEM-Simulation in der Industrie (*Reinhart & Feldmann 1997, S. 37*).

In der Forschung wird die FEM dagegen immer stärker zur Simulation auch von Prozessen eingesetzt. Die Arbeiten von *Lenz u. a. (1998)* und *Wisbacher (1992)* zeigen, daß eine Prozeßmodellierung mit der Finite-Element-Methode möglich und sinnvoll ist. *Lenz u. a. (1998)* bilden einen Laserschweißprozeß in einem diskreten Modell ab und untersuchen diesen Prozeß mit Hilfe der FEM. Der Schwerpunkt der Arbeiten ruht dabei auf der Ermittlung der zeitveränderlichen Temperaturverteilung innerhalb des

Bauteiles und der Wechselwirkung zwischen Laser und Material in Form des Wirkungsgrades der thermischen Einkopplung des Lasers.

Im Bereich des Umformes finden sich bereits kommerziell vertriebene FEM-Lösungen. Die FE-Methode wird dabei besonders im Bereich Tiefziehen und Schmieden eingesetzt (*Tekkaya 1998*). Weitere beispielhaft genannte Forschungsarbeiten finden sich ebenfalls auf dem Gebiet der Umformtechnik. *Cho (1987)* untersuchte die generelle Anwendbarkeit der Finite-Element-Methode in der Umformtechnik und wandte die FEM auf Probleme des Freiformschmiedens an. *Weiss (1988)* simulierte Präzisionsschmiedeprozesse mit Hilfe der FEM und *Philipp (1993)* beschäftigte sich mit der Ermittlung der nötigen physikalischen Prozeßdaten für die FEM-Simulation von Warmumformverfahren. Schließlich nutzte *Fleischer (1996)* die Finite-Element-Methode zur Auslegung mehrstufiger Gesenkenschmiedeprozesse sowie für die Einführung neuer Schmiedeverfahren in die Praxis.

2.3.1.2 3D-Bewegungssimulation

Funktionsweise

Die 3D-Bewegungssimulation oder auch nur 3D-Simulation ist bereits mit der Idee des Prototypen eng verknüpft. *Linner (1997)* nennt als Grundprinzip der 3D-Simulation die Überprüfung von Prozeß- oder Produkteigenschaften an einem virtuellen Prototypen. Nach Linner ist der Prototypgedanke sowohl auf das Produkt als auch auf die Produktionsanlage anwendbar. Grundlage des virtuellen Prototypen ist ein dreidimensionales CAD-Volumenmodell des betreffenden Produktes bzw. der betreffenden Anlage. Für das CAD-Modell wird die Kinematik dem Originalobjekt entsprechend definiert. Die Definition der Kinematik beinhaltet die relative räumliche Positionierung der vorhandenen Systemkomponenten sowie die Definition der vorhandenen Bewegungsbahnen hinsichtlich räumlicher Lage und Art (translatorisch, rotatorisch und starr). Als Folge davon werden in der 3D-Simulation kinematische Zusammenhänge und Wechselwirkungen abgebildet (*Eversheim u. a. 1996, S. 3-17*).

Im Anschluß daran wird für das dreidimensionale Kinematikmodell ein Bewegungsprogramm erstellt, das anhand des virtuellen Modells abgearbeitet und überprüft wird (*Linner 1992*). Weiterführende Darstellungen zur Funktionsweise der 3D-Bewegungssimulation finden sich in der Literatur beispielsweise bei *Wrba (1990)*, *Tauber (1990)* und *Schrüfer (1992)*.

Bisherige Arbeiten

Es existieren mehrere kommerziell vertriebene Produkte zur Durchführung von 3D-Simulationen. Die dadurch ermöglichte Verbreitung der Technologie führt zu zahlreichen in der Literatur dargestellten Anwendungsfällen. Darüber hinaus werden die Funktionalitäten der Programme für die 3D-Simulationen aufgrund der Leistungssteigerungen in der Rechnertechnik ständig erweitert.

Einen Überblick über den derzeitigen Leistungsstand der 3D-Simulation zeigt *Linner (1997)*. Die 3D-Simulation findet demnach in verschiedenen Bereichen der techni-

schen Auftragsabwicklung Anwendung. Im Rahmen der Konstruktion werden mit Hilfe der 3D-Simulation in Einbau- und Kinematikstudien die Montierbarkeit und die Funktionsweise von Produkten und Produktionsmitteln überprüft. Es existieren darüber hinaus Menschmodelle, mit deren Hilfe die ergonomischen Eigenschaften eines Produktes untersucht werden können.

Im Bereich der Produktion werden beispielsweise NC-Programme für Werkzeugmaschinen und Bewegungsprogramme für Roboterzellen off-line erstellt und simuliert. Ein Beispiel für den Einsatz der 3D-Simulation innerhalb der Produktion zur Kollisionskontrolle bei einer Fräsbearbeitung bis hin zum Werkstoffabtrag zeigt *Linner (1994)*. Allerdings erfolgt die Berechnung und Darstellung des Werkstoffabtrags nicht durch Berücksichtigung physikalischer Verhältnisse beim Zerspanprozeß, sondern lediglich auf Basis der aus dem simulierten NC-Programm resultierenden zeitveränderlichen Werkstückgeometrien. In diesem Fall wird demnach ein NC-Programm prozedural abgearbeitet, die tatsächlichen physikalischen Verhältnisse an der Zerspanstelle werden jedoch nicht betrachtet.

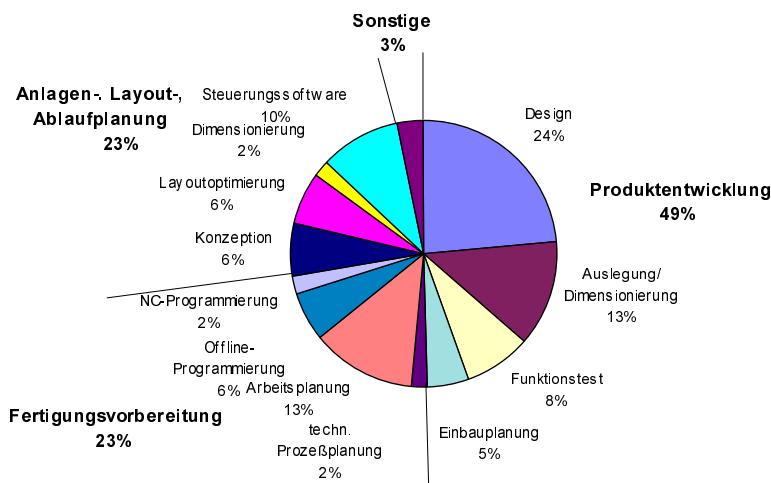


Abb. 2-9: Anwendungsgebiete der graphischen 3D-Simulation in der Industrie (Reinhart & Feldmann 1997, S. 32).

Stetter (1994) führte mit Hilfe der 3D-Simulation eine automatische Bahn- und Greifplanung durch und setzte somit die 3D-Simulation zur Off-line-Programmierung von Robotern ein. Der Einsatz der 3D-Simulation zur Programmierung und Simulation von Abläufen im Produktionszellen wird bei *Raith (1995)* beschrieben. Darüber hinaus können an Modellen von manuellen Arbeitsstationen Taktzeiten ermittelt und die Arbeitsplatzergonomie verbessert werden. Eine Arbeit, die den Einsatz der 3D-Simulation zur Planung manueller Montagesysteme beschreibt, findet sich z. B. bei *Kum-*

metsteiner (1994), Woenckhaus (1994) nutzte die 3D-Simulation zur automatisierten Layoutoptimierung von Produktionsanlagen.

Trotz der schon umfangreichen und weiter zunehmenden Anzahl von Funktionalitäten liegt im Gegensatz zur Forschung der Schwerpunkt der industriellen Anwendungen der 3D-Simulationen immer noch in der Produktentwicklung. Der Anteil der technischen Prozeßplanung an den industriellen Anwendungen in Deutschland beträgt für die 3D-Bewegungssimulation nach strenger Auslegung der Prozeßdefinition lediglich zwei Prozent (s. Abb. 2-9) (*Reinhart & Feldmann 1997*).

2.3.1.3 Analytische Methoden

Funktionsweise

Ein analytisches Modell, in der Literatur häufig auch mathematisches Modell genannt, ist die Beschreibung eines Systems durch mathematische Gleichungen. Als Grundlage, auf der ein mathematisches Modell errichtet wird, dienen die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, denen die Systemkomponenten und deren Wechselwirkungen gehorchen. Mathematische Modelle können dabei in unterschiedlichen Komplexitäts- und Detaillierungsniveaus erzeugt werden.

Für die analytische Modellierung selbst existieren im wesentlichen zwei Ansätze: zum einen gibt es einen systemtechnischen Ansatz, der das zu beschreibende System als „Black Box“ mit Eingangs- und Ausgangsgrößen auffaßt. Bei der Modellerstellung nach dieser Vorgehensweise werden Gleichungen gesucht, die Eingangs- und Ausgangsgrößen in einen unmittelbaren Zusammenhang setzen. Zur Anwendung dieser Methode reicht eine phänomenologische Darstellung der Vorgänge aus. Die Kenntnis der zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten ist zwar hilfreich aber nicht zwingend notwendig. Zum anderen existiert ein Modellierungsansatz, bei dem ein Satz von voneinander linear unabhängigen Zustandsvariablen eingeführt wird, der gewöhnlich nicht mit den Ausgangsvariablen übereinstimmt. (*Close & Frederick 1993, S. 2 ff.*). Die Zustandsvariablen überbrücken gleichsam als Zwischengrößen den Raum zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen. Durch die Einführung von Zwischengrößen erfolgt der Übergang von Eingangs- zu Ausgangsgrößen mathematisch in kleineren Schritten. Die Zustandsvariablen dieser Zwischenschritte orientieren sich häufig nah am Prozeßgeschehen bzw. an den physikalischen Gesetzmäßigkeiten des untersuchten Prozesses. Diese Modellierungsart liegt dementsprechend näher an der tatsächlichen physikalischen Realität des zu untersuchenden Prozesses. Näheres dazu findet sich auch bei *Dreyer (1993)*.

Bisherige Arbeiten

Die meisten in der Literatur anzutreffenden Anwendungsfälle analytischer Modelle innerhalb der Produktionstechnik befassen sich mit der Darstellung technischer Prozesse aus dem Bereich der spanenden Bearbeitung.

Simpfendorfer (1988) entwickelte ein analytisches Prozeßmodell für das Planläppen mit Zwangsführung. Das Ziel Simpfendorfers war es, den Läppprozeß durch ein all-

gemeingültiges Modell zu beschreiben. Letztendlich wurde in Simpfendorfers Arbeit jedoch die Formgenauigkeit als Zielkriterium in den Vordergrund gestellt. Das größtmögliche Zielsystem für die Untersuchung des Planläppens würde jedoch sechs Zielgrößen enthalten. (*Simpfendorfer 1988, S. 35 f.*). Die Betonung der Formgenauigkeit führte im wesentlichen zur Errichtung eines lediglich kinematischen Modells.

Schwermer (1992) erstellte ein analytisches Modell zur Simulation des dynamischen Verhaltens beim Drehen. Dabei verwendete Schwermer zur kompletten Prozeßbeschreibung zwei Modelle, eines zur Darstellung des Schwingungsverhaltens der Werkzeugmaschine sowie ein weiteres Modell zur Darstellung des Zerspanprozesses. Die besondere Schwierigkeit in Schermers Arbeit bestand in der Behandlung nicht-linearer Zusammenhänge innerhalb des Drehprozesses. Schwermer löste dies durch Näherungsannahmen, die allerdings den Gültigkeitsbereich seines Modells einschränkten.

Maulhardt (1991) untersuchte das dynamische Verhalten von Kreissägen während der Bearbeitung. Ziel seiner Arbeit war, durch ein analytisches Prozeßmodell das Betriebsverhalten von Kreissägen zu antizipieren. Als Kriterium des Betriebsverhaltens wählte Maulhardt das Stabilitätsverhalten der Kreissägen. An dieses Prozeßmodell des Kreissägens knüpfte *Zäh (1995)* in seiner Arbeit an. Zäh erweiterte das Prozeßmodell über das Stabilitätskriterium hinaus und schuf, unter Berücksichtigung regelungstechnischer Gesichtspunkte, ein umfassendes Prozeßmodell, das in einer adaptiven Grenzsteuerung bzw. -regelung für das Kreissägen implementiert wurde.

Ein weiteres analytisches Prozeßmodell aus dem Bereich der Produktionstechnik erarbeitete *Zwanzer (1995)* für das Kugelschleifen. Er stellte dabei den Prozeß vereinfacht an einem Ein-Kugel-Modell dar. Durch die Einbindung des analytischen Modells in eine rechnergestützte Prozeßsimulation gelang es Zwanzer, eine Experimentierumgebung zu schaffen, in der der Kugelschleifprozeß nach mehreren Zielgrößen hin optimiert werden konnte. Für die Bedienung des rechnerintegrierten Prozeßmodells war bereits kein Experte aus dem Bereich der Prozeßmodellierung mehr notwendig. Hier reichte qualifiziertes Wissen über den zu untersuchenden Prozeß aus.

2.3.2 Körperliche Modellbildung von Prozessen

Es existieren zwei Verfahren zur körperlichen Modellierung von Prozessen, die imstande sind, Modelle mit hohem Detaillierungsgrad zu liefern. Diese sind die Analogiemethode und die Ähnlichkeitsmethode.

2.3.2.1 Analogiemethode

Funktionsweise

Bei der Analogiemethode werden zwei unterschiedliche Prozesse miteinander verglichen. Genau genommen wird bei der Modellbildung ein physikalischer Vorgang durch

einen anderen, analogen ersetzt. Die Analogie wird dabei anhand der prozeßbeschreibenden Differentialgleichungen überprüft.

Zwei Vorgänge sind im Sinne dieser Methode analog, wenn die den Vorgang beschreibenden Differentialgleichungen formal ähnlich sind, d. h. die gleiche Struktur besitzen. Die in den Differentialgleichungen enthaltenen physikalischen Größen sind dabei jedoch verschieden (*Moog 1985, S. 191*). Beispielsweise ließen sich Vorgänge der Wärmeleitung durch Diffusionsvorgänge untersuchen, da die Differentialgleichungen zur Beschreibung beider Vorgänge die gleiche Struktur aufweisen (s. Abb. 2-10).

$$2. \text{ Ficksches Gesetz: } \frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \rightarrow c(t, x, y, z)$$

$$\text{Fourier-Gleichung: } \frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \rightarrow T(t, x, y, z)$$

c: Konzentration
T: Temperatur

t: Zeit
x, y, z: Raumkoordinaten

D: Diffusionskoeffizient
a: Temperaturleitkoeffizient

Abb. 2-10: Analogie zwischen Diffusion und Wärmeleitung. Daraus folgt die Darstellbarkeit instationärer Temperaturfelder durch ebensolche Konzentrationsfelder und umgekehrt.

In der Technik bekannte Analogien sind in der Abb. 2-11 dargestellt.

- Analogie zwischen dynamischen und elektrodynamischen Vorgängen
- Analogie zwischen Temperaturfeld und elektrischem Feld
- Analogie zwischen Konzentrationsfeld und elektrischem Feld
- Analogie zwischen Potentialströmungsfeld und elektrischem Feld
- Analogie zwischen Temperaturfeld und Konzentrationsfeld

Abb. 2-11: Bekannte Analogien nach Moog (1985, S. 6)

Ziel einer Analogiebetrachtung ist, Zahlenwerte von Analogiegrößen durch Verwendung von Analogiebeziehungen von einem physikalischen System auf ein anderes zu übertragen.

Durch die Ausnützung der Strukturidentität zweier oder mehrerer Differentialgleichungen besteht mit der Analogiemethode die prinzipielle Möglichkeit, einen Vorgang ohne Abstraktion auf einen anderen abzubilden. Der Detaillierungsgrad des zu untersuchenden Vorganges bleibt dabei verfahrensbedingt unverändert.

Bisherige Arbeiten

Moog (1985, S. 196-225) nennt beispielhaft einige Anwendungen der Analogiemethode in der Forschung. Diese erstrecken sich auf die Ermittlung von Temperaturfeldern und Strömungsvorgängen durch elektrische Felder sowie die Untersuchung von Temperaturausgleichsvorgängen durch Stoffaustauschvorgänge. Arbeiten mit industrialem Bezug führte *Mavroudis 1971* aus, der mit Hilfe der Analogiemethode die Ausbildung der Zirkulationszone vor den Blasformen von Hochöfen untersuchte.

In letzter Zeit wurde die Analogiemethode kaum noch zu Untersuchungszwecken eingesetzt. In der Produktionstechnik wurden bisher keine Analogiemodelle zur Prozeßuntersuchung verwendet.

2.3.2.2 Ähnlichkeitstheorie

Funktionsweise

Neben der Analogiemethode stellt die Ähnlichkeitstheorie eine weitere Möglichkeit dar, physikalische Vorgänge in einem körperlichen Modell abzubilden. Im Gegensatz zur Analogiemethode, die Differentialgleichungen aus zwei Prozessen benötigt, versucht man im Rahmen der Ähnlichkeitstheorie, einen Modellprozeß ausschließlich auf Basis der Differentialgleichungen zur Beschreibung des zu untersuchenden Prozesses aufzubauen (*Moog 1985, S. 1*). Man nutzt dabei die mathematische Tatsache, daß Differentialgleichungen, die sich lediglich um einen konstanten Faktor unterscheiden, die gleiche Lösung besitzen (*Mayinger & Götz 1995*). Demzufolge werden im Rahmen der Ähnlichkeitstheorie bei der Modellbildung die in den prozeßbeschreibenden Gleichungen vorkommenden physikalischen Größen durch Faktoren skaliert. Die Faktoren bilden dabei den Skalierungs-Maßstab.

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der ähnlichkeitstheoretischen Modellierung ist in der Literatur beschrieben (*Pawlowski 1971, Sedov 1993, Zlokarnik 1991*) und soll deshalb hier nur kurz wiedergegeben werden: Von dem zu untersuchenden Prozeß wird eine dimensionslose Darstellung erarbeitet (s. Abb. 2-12). Kern dieser Darstellung sind dimensionslose Kennzahlen, die den Prozeß beschreiben. Eng mit der dimensionslosen Prozeßbeschreibung verknüpft ist der Begriff der Ähnlichkeit. Zwei Prozesse gelten dann als ähnlich, wenn alle für die Prozeßbeschreibung nötigen dimensionslosen Kennzahlen in beiden Prozessen paarweise denselben numerischen Wert annehmen (*Zlokarnik 1991, S. 39*).

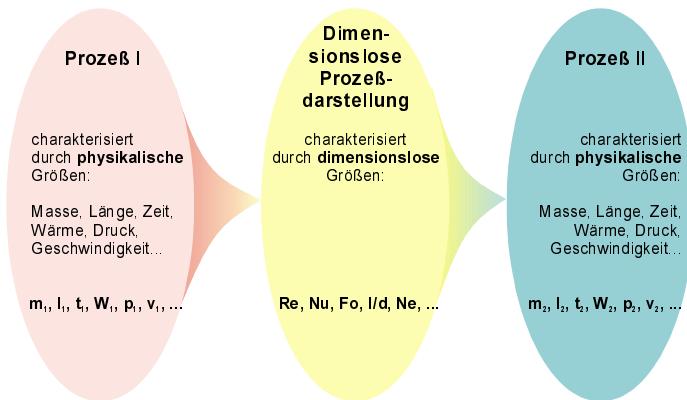


Abb. 2-12: Die dimensionslose Prozeßdarstellung als Bindeglied zwischen mehreren physikalischen Realisierungen eines Prozesses.

Auf Basis dieser dimensionslosen Darstellung werden Maßstabsgleichungen abgeleitet, anhand derer ein Modellprozeß skaliert und konstruiert wird. Untersuchungen werden dann am Modellprozeß durchgeführt und mit Hilfe der Maßstabsgleichungen auf den ursprünglichen Prozeß zurückübertragen (s. Abb. 2-13).

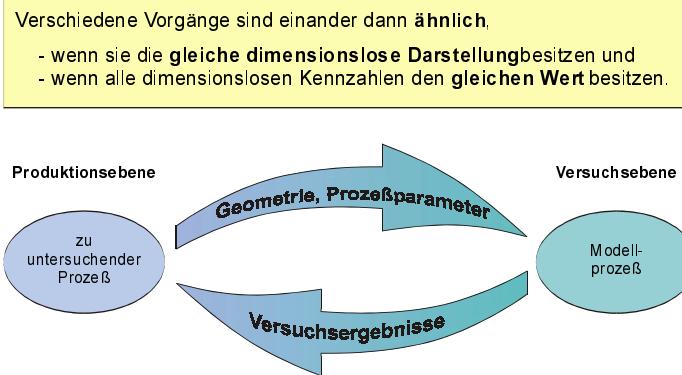


Abb. 2-13: Definition des Ähnlichkeitbegriffes und prinzipielle Zusammenhänge zwischen Modell- und Originalprozeß.

Bisherige Arbeiten

Pawlowski (1971, S. V) nennt die Ähnlichkeitstheorie ein wichtiges Instrument der ingenieurwissenschaftlichen Forschung. Besonders vor der massenhaften Verbreitung elektronischer Rechenanlagen wurde die Ähnlichkeitstheorie im Rahmen von Forschung und Entwicklung angewandt. Der Einsatz der Ähnlichkeitstheorie war und ist

dabei nicht auf einzelne Fachgebiete beschränkt. In der Literatur finden sich zahlreiche Werke, die die Ähnlichkeitstheorie für ausgewählte Disziplinen qualifizieren. Die eher allgemein gehaltenen Werke von *Baker u. a. 1991* und *Sedov 1993* geben neben den theoretischen Grundlagen zahlreiche Beispiele für den Einsatz der Ähnlichkeitstheorie auf dem Gebiet der Mechanik und Dynamik. Darin enthalten sind Anwendungen in der Gasdynamik, der Dynamik starrer Körper und Strukturen, der Flüssigkeitsdynamik und der Wärmeübertragung. *Sedov* erweitert den Anwendungsbereich sogar bis in die Astrophysik hinein. *Złokarnik 1991* und *Pawlowski 1991* konzentrieren sich auf den Einsatz der Ähnlichkeitstheorie in der Auslegung verfahrenstechnischer Prozesse. *Moog (1985)* beschreibt ebenfalls die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie in Dynamik, Thermodynamik, bei Stoffübergangsvorgängen sowie bei chemotechnischen Vorgängen. Zu diesen Disziplinen existieren zahlreiche Anwendungsfälle, die in der Literatur nachzulesen sind. Beispielhaft sei auf *Dehnhardt (1981)*, *Mayerle (1984)* und *Mayinger & Götz (1995)* verwiesen.

Konkrete Anwendungsfälle der Ähnlichkeitstheorie innerhalb der Produktionstechnik finden sich lediglich im Bereich der Umformtechnik. *Hergemöller (1982)* diskutiert allgemein die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie in der Umformtechnik und führt als Anwendungsbeispiele Modelluntersuchungen des Kugelstrahlens und des Kaltflachwalzens an. Hierbei standen die Untersuchung der Kugelleindrücke bzw. die Ermittlung der Walzkräfte im Vordergrund. Kramer richtete seine umformtechnischen Untersuchungen auf das Kaltflachwalzen von dünnem Band und Folien (*Kramer 1994*). Dicks setzte überdies die Ähnlichkeitstheorie zur Untersuchung des Strangpressens ein. Im Rahmen seiner Arbeit konzentrierte er sich auf den Stofffluß in Kammermatrizen sowie im besonderen auf stoffflußbedingte Preßfehler (*Dicks 1995*). Dabei weist Dicks die Einsatzmöglichkeit eines Modellwerkstoffes in der ähnlichkeitstheoretischen Versuchsführung nicht theoretisch nach. Die Auswahl des Ersatzwerkstoffes wurde von Dicks eher phänomenologisch bzw. anhand globaler Werkstoffklassifizierungen, statt durch konkreten Vergleich der betroffenen Stoffwerte geführt.

Allen diesen Arbeiten ist gemeinsam, daß sie sich mit kontinuierlichen oder quasikontinuierlichen Prozessen bzw. Effekten beschäftigen. Ein Einsatz der Ähnlichkeitstheorie zur Bildung eines Modells eines diskontinuierlichen Produktionsprozesses ist nicht bekannt.

2.4 Defizite im Stand der Erkenntnis

Im Vergleich zur Produktentwicklung hinkt die Entwicklung der produktspezifischen Produktionsprozesse hinsichtlich des Reifegrades des Erkenntnisstandes während des Planungsfortschrittes hinterher. Dies wird allgemein auf einen Mangel an systematischen Hilfsmitteln, Werkzeugen und Methoden zurückgeführt, die geeignet sind, frühzeitig Aussagen über Prozeßeigenschaften zu liefern. Neben diesen systematischen Defiziten wurde auf methodischer Ebene gezeigt, daß die meisten der vorgestellten

Verfahren nur in begrenztem Umfang zur Auslegung technischer Prozesse eingesetzt werden.

Im Bereich der körperlichen Modelle existieren besonders wenig Anwendungen in der Produktionstechnik. Die produktionstechnischen Anwendungen der Ähnlichkeitstheorie leiden häufig an dem mangelnden Nachweis der Einsetzbarkeit der verwendeten Ersatzmaterialien. In den erwähnten Beispielen wurden Ersatzwerkstoffe lediglich nach phänomenologischen Gesichtspunkten ausgewählt. Durch den fehlenden wissenschaftlichen Nachweis einer Abbildungsbeziehung zwischen Original- und Ersatzwerkstoff wird nur ein Bruchteil der potentiellen Aussagefähigkeit eines ähnlichkeitstheoretischen Modells erschlossen. Folglich werden auch die Möglichkeiten der Prozeßgestaltung nicht genutzt, die eine Materialrecherche innerhalb einer ähnlichkeitstheoretischen Modellbildung bietet. Es fehlt in diesem Zusammenhang in der Produktionstechnik an konkreten, wissenschaftlich fundierten Verfahren zur Auswahl von Ersatzwerkstoffen für ähnlichkeitstheoretische Modelle. Für den etwas engeren aber wesentlichen Kreis der diskreten Prozesse innerhalb der Produktionstechnik finden sich keine körperlichen Modelle zur Auslegung technischer Prozesse. Vor diesem Hintergrund ist in der produktionstechnischen Forschung ein Mangel an systematischem Wissen in den Bereichen Modellaufbau, Modellrealisierung bis hin zur Versuchsdurchführung offensichtlich.

3 Anwendung der Ähnlichkeitstheorie in der Produktionstechnik

Nachdem im Stand der Technik aufgezeigt wurde, daß die Ähnlichkeitstheorie zur Lösung produktionstechnischer Fragen bisher nur in wenigen Fällen und mit oft unzureichendem theoretischen Hintergrund erfolgte, soll in den folgenden Kapiteln die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie in der Produktionstechnik diskutiert werden. In Kap. 2.3.2.2 wurde die Funktionsweise der Ähnlichkeitstheorie erläutert. In Kap. 3 sollen nun allgemeingültige Hinweise für den Einsatz der Ähnlichkeitstheorie zur Bearbeitung von Fragestellungen der Produktionstechnik gegeben werden (s. Abb. 3-1). Dies betrifft vor allem Punkte wie die Vorgehensweise der Modellbildung unter Berücksichtigung des verfügbaren Prozeßwissens, der Recherche von Modell- und Ersatzwerkstoffen und die Versuchsplanung. Aspekte ohne besonderes Gewicht für produktionstechnische Anwendungen werden der in der Standardliteratur genannten Vorgehensweise überlassen (s. hierzu bspw. Baker u. a. 1991, Pawłowski 1971, Sedov 1993).

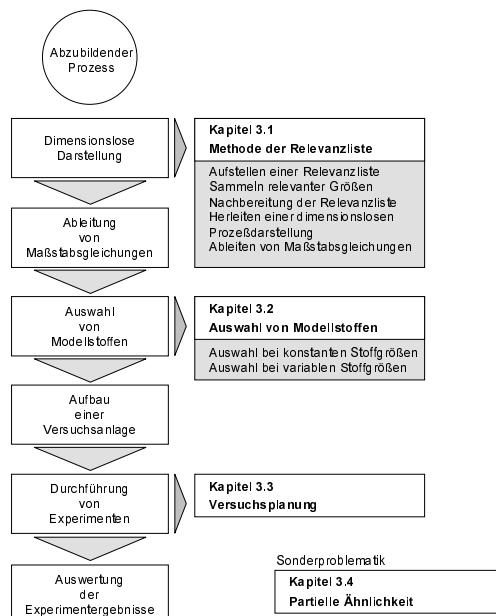


Abb. 3-1: Allgemeine Vorgehensweise bei Anwendung der Ähnlichkeitstheorie. Punkte mit besonderer Bedeutung für die Produktionstechnik werden in Kapitel 3 behandelt.

3.1 Dimensionslose Darstellung – Methode der Relevanzliste

Die Ähnlichkeitstheorie basiert auf dimensionstheoretischen Erkenntnissen über die Art und Weise der Klassifizierung und Quantifizierung physikalischer Größen. Den zentralen Punkt bildet dabei die Feststellung, daß Dimensionssysteme in keinerlei inhaltlichem Zusammenhang mit den durch sie beschriebenen Vorgängen stehen. Sie sind als reines Hilfsmittel der Beschreibung nicht selbst Informationsträger. Der Begriff des Dimensionssystems darf dabei nicht mit dem des Einheitensystems verwechselt werden. Ein Einheitensystem beruht in der Regel auf einem Dimensionssystem und trägt durch die Bereitstellung von Vergleichsnormalien Informationen zur Quantifizierung innerhalb einer Prozeßbeschreibung bei. Weder das Dimensions- noch das Einheitensystem befassen sich jedoch mit der Natur der mit ihrer Hilfe beschriebenen technischen oder physikalischen Vorgänge. Dementsprechend kann die Beschreibung eines Vorganges von den dafür verwendeten Dimensionssystemen entkoppelt werden. Dies führt auf eine allgemeingültige dimensionslose Prozeßdarstellung. In diesem Sinne lassen sich Dimensionssysteme auch als „Front End“ begreifen, die die Verständlichkeit der Prozeßbeschreibung für den Anwender erhöht. Für eine erkenntnistheoretisch-philosophische Betrachtung der Ähnlichkeitstheorie und ihres dimensionstheoretischen Hintergrundes sei auf Kap. 1.1 f. in *Pawlowski (1971)* verwiesen.

Die dimensionslose Darstellung des zu untersuchenden Prozesses bildet den Kern der Ähnlichkeitstheoretischen Modellbildung. Von der dimensionslosen Darstellung ausgehend lassen sich später die Maßstabsgleichungen ableiten, die für die Konstruktion eines Prozeßmodells und die Umrechnung der dort erarbeiteten Ergebnisse auf die Originalanlage entscheidend sind.

Es existieren unterschiedliche mathematische Verfahren, diese dimensionslose Darstellung eines Prozesses zu erarbeiten. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des zu ihrer Anwendung nötigen Prozeßwissens. In der Literatur finden sich unterschiedliche Benennungen und Einteilungen der einzelnen Methoden. Im wesentlichen sind dies die Methoden der Dimensionsanalyse und DGL-basierte Methoden.

Methoden der Dimensionsanalyse

Die Methoden der Dimensionsanalyse werden bei *Baker u. a. (1991)*, *Pawlowski (1971)* und *Sedov (1993)* erläutert. Es handelt sich dabei unabhängig von der konkret angewendeten mathematischen Prozedur um parameterbasierte Verfahren, d. h. eine Sammlung der prozeßbeschreibenden Parameter ist ohne Rücksicht auf ihre Anordnung in Gleichungen ausreichend.

DGL-basierte Methoden

Methoden zur Herleitung dimensionsloser Prozeßbeschreibungen, die auf den prozeßbeschreibenden Differentialgleichungen aufsetzen, werden bei *Baker u. a. (1991)* und *Elsner (1980)* beschrieben. Bei diesen Verfahren wird der Umstand genutzt, daß Diffe-

rentialgleichungen, die sich lediglich um einen konstanten Faktor unterscheiden, die gleiche Lösung besitzen. Die Differentialgleichung selbst wird dabei nicht gelöst.

Anhand des benötigten Prozeßwissens lässt sich ein Verfahren für die Herleitung einer dimensionslosen Prozeßdarstellung für die Anwendung auf produktionstechnische Prozesse auswählen. Dazu wird im folgenden kurz diskutiert in welcher Form Prozeßwissen innerhalb der Produktionstechnik in der Regel vorliegt. Eine besondere Berücksichtigung erfährt dabei die Situation in der verarbeitenden Industrie, da Process Prototyping für eine betriebliche Anwendung konzipiert wurde.

Produktionstechnische Prozesse sind in der Regel sehr komplex, da sie mehrere physikalische Wirkprinzipien in sich vereinigen. Dadurch wird ihre Beschreibung durch mathematisch geschlossene Gleichungssysteme erschwert. Da die Lösung solcher prozeßbeschreibender Gleichungen sehr aufwendig ist und üblicherweise nur numerisch durchgeführt werden kann, existieren mathematische Prozeßbeschreibungen in Form von Differentialgleichungen lediglich in begrenzter Anzahl sowie für idealisierte Prozesse. Prozeßbeschreibungen in Form von Zahlenwertgleichungen sind aufgrund ihrer fehlenden Dimensionshomogenität (s. Pawłowski 1971, S. 11) nicht als Ausgangsbasis für die Herleitung einer dimensionslosen Darstellung geeignet.

Die Verfahren der Dimensionsanalyse erfordern lediglich eine Sammlung prozeßrelevanter Parameter. Die Wissens- oder Erkenntnisbasis ist bei Einsatz dimensionsanalytischer Methoden zunächst weniger abgesichert als im Falle der Verfahren auf Basis prozeßbeschreibender Differentialgleichungen. Die Dimensionsanalyse liefert jedoch immer eine erste Ausgangsbasis, die durch weiterführende Diskussion und Argumentation detailliert und verfeinert werden kann. Gerade vor dem Hintergrund eines Einsatzes auf betrieblicher Ebene besitzen die dimensionsanalytischen Verfahren einen entscheidenden Vorteil: im Gegensatz zu gleichungsbasierten Verfahren ermöglichen dimensionsanalytische Methoden die Einbeziehung des unmittelbar am Originalprozeß eingesetzten Personals in die Erstellung des Modellprozesses. Durch Diskussion mit dem Maschinenpersonal können prozeßrelevante Parameter ermittelt oder bestehende Parametersätze abgesichert werden. Selbst wenn das Personal über keine Kenntnisse der Parameterzusammenhänge innerhalb eines Prozesses verfügt, lässt sich aufgrund der Prozeßerfahrung des Personals im Gespräch klären, welche Parameter den Prozeß entscheidend beeinflussen. Somit bieten diese Verfahren die Möglichkeit, Erfahrungen und Kenntnisse, die beim Maschinen- bzw. Prozeßpersonal häufig unstrukturiert vorliegen, für die Errichtung eines Modellprozesses nutzbar zu machen.

Aus diesem Grund wird empfohlen, die Verfahren der Dimensionsanalyse für die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie auf dem Gebiet der Produktionstechnik zur Erarbeitung einer dimensionslosen Darstellung einzusetzen. Götz (1995, S. 35) nennt die Ermittlung dimensionsloser Kennzahlen aus Differentialgleichungen die „physikalisch anschaulichste Methode“. Dies ist vom wissenschaftlichen Standpunkt mit Sicherheit richtig, da aus den DGL-basierten Verfahren deutlich hervorgeht, wie dimensionslose Kennzahlen entstehen und warum sie funktionieren. In der vorliegenden Arbeit geht es jedoch darum, die für einen Einsatz innerhalb der Produktionstechnik effektivste Methode zu bestimmen. Dies sind aufgrund der Struktur des in den meisten Fällen verfügbaren

baren Prozeßwissens die Verfahren der Dimensionsanalyse. Innerhalb dieser ist die Methode der Relevanzliste aus produktionstechnischer Sicht die geeignetste, da sie eine klare Vorgehensvorschrift besitzt, wie aus den relevanten Prozeßparametern ein Satz dimensionsloser Kennzahlen zu bilden ist. An dieser Vorschrift können sich auch mathematisch weniger geübte Personen orientieren und dadurch einen Satz dimensionsloser Kennzahlen erfolgreich herleiten.

3.1.1 Aufstellen einer Relevanzliste

Die Relevanzliste enthält alle für einen Prozeß wesentlichen Einflußgrößen. Dies bedeutet, daß keine Parameter mit signifikantem Einfluß vergessen und keine Parameter von zweitrangiger Bedeutung hinzugefügt werden dürfen. Pawłowski (1971, S. 32 ff.) beschreibt prinzipielle Anforderungen an die Relevanzliste mit eher wissenschaftlichem Hintergrund. Die dortige Orientierung an der Praxis weist einen starken Bezug auf die Verfahrenstechnik auf.

In der Literatur über die Ähnlichkeitstheorie werden keine Standardverfahren für die Sammlung prozeßrelevanter Parameter vorgeschlagen. Zlokarnik (1991, S. 24) schlägt eine Einteilung der relevanten Einflußgrößen in zunächst drei Gruppen (Geometrie-, Prozeß- und Stoffgrößen) vor. Die Trennung der prozeßrelevanten Einflußgrößen in diese drei Gruppen ist sinnvoll, jedoch muß sie um eine vierte Gruppe, die der universellen physikalischen Konstanten erweitert werden, was Zlokarnik (1991, S. 26) im Prinzip erkannt hat, jedoch lediglich implizit durchführt. Für eine ähnlichkeitstheoretische Betrachtung können auch globale bzw. universelle Konstanten eine entscheidende Rolle spielen und müssen dementsprechend in der Relevanzliste berücksichtigt werden. Damit werden prozeßrelevante Parameter für vier Gruppen gesammelt (s. Abb. 3-2).

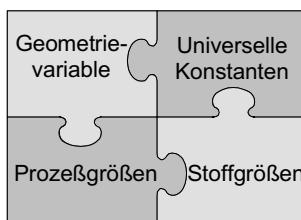


Abb. 3-2: Vier Gruppen relevanter physikalischer Größen als Basis einer vollständigen Prozeßbeschreibung.

Aus produktionstechnischer Sicht ist bei der Sammlung prozeßrelevanter Parameter oder Einflußgrößen unbedingt zu beachten, daß es sich bei den Parametern ausschließlich um physikalische Größen handeln kann. Dies läßt sich aus den Rahmenbedin-

gungen für die Anwendbarkeit der Ähnlichkeitstheorie ableiten, vor allem aus der Forderung nach Dimensionshomogenität der beschreibenden Gleichungen des Prozesses.

Die in der produktionstechnischen Literatur beschriebenen Verfahren zur Auswahl und Ermittlung von Parametern sind hier methodisch lediglich bedingt einsetzbar. Die meisten dieser Methoden sind Verfahren, die im Vorfeld der Versuchsplanung eingesetzt werden und deshalb eine andere Zielrichtung haben. Methoden zur Auswahl von Parametern nach Shainin oder nach Taguchi haben den Nachteil, daß sie erst bei vorhandener Hardware anzuwenden sind. Im vorliegenden Fall wird jedoch ein theoretisches Modell vorbereitet, um daraus erst einen Versuchsaufbau abzuleiten.

Hilfreich für die Auswahl prozeßrelevanter physikalischer Größen ist dagegen die Methodik der Ishikawa-Analyse, bzw. Teile daraus. Sie bietet eine strukturierte Vorgehensweise an, erscheint aber als vollständige Methode für das Auffinden von physikalischen Größen überdimensioniert. So ist es sinnvoll, die Ermittlung der prozeßrelevanten Einflußgrößen mit einem Ishikawa-Diagramm zu begleiten, wobei an vier Ästen je eine der genannten Variablengruppen gesetzt wird, die zu dem zu modellierenden Prozeß hinführen (s. Abb. 3-3).

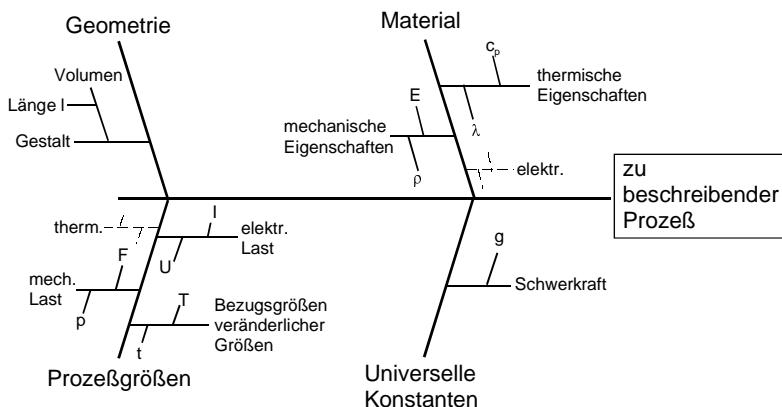


Abb. 3-3: Ishikawa-Diagramm zur Unterstützung und Dokumentation der Parameterrecherche eines zu modellierenden Prozesses.

Die einfachste aber wirkungsvollste Methode, relevante physikalische Größen eines Prozesses zu ermitteln, beginnt mit einer groben Prozeßbetrachtung. Die Prozeßbetrachtung wird in weiteren Schritten immer stärker detailliert. Dazu werden in einem Zustandsübergangsdigramm die Prozeßschritte und -zustände betrachtet. In einem weiteren Detaillierungsschritt werden den Zuständen und Vorgängen des Prozesses die eingesetzten Maschinen und Werkzeuge zugeordnet. Mit den Maschinen und Werkzeugen lassen sich wiederum deren Wirkprinzipien sowie den damit verbundenen physikalischen Effekten verbinden. Für viele physikalische Effekte lassen sich direkt we-

sentliche physikalische Größen angeben. Darunter fallen beispielsweise alle an der Anlage direkt einstellbaren Größen. Sollte eine direkte Benennung physikalischer Größen in einigen Fällen noch nicht möglich sein, werden zur weiteren Betrachtung die Gleichungen herangezogen, die den Effekt beschreiben. Die darin enthaltenen physikalischen Größen sind in die Relevanzliste aufzunehmen.

Im folgenden Abschnitt werden Hinweise zur Ermittlung von physikalischen Größen innerhalb der vier genannten Gruppen gegeben. Die parallele Verwendung eines Fischgrät-Diagramms bietet die Möglichkeit einer strukturierten Dokumentation.

3.1.1.1 GeometrievARIABLE

Die Geometrieparameter beschreiben die äußere Gestalt eines Gegenstandes bzw. einer gesamten Anlage. Hier genügt es, lediglich eine charakteristische geometrische Abmessung auszuwählen, um die Geometrie einer Anlage zu berücksichtigen. Die gesamte Anlagenkonstruktion kann aus den Verhältnissen sämtlicher Abmessungen zu den gewählten charakteristischen rekonstruiert werden.

Es empfiehlt sich, als charakteristische geometrische Größe eine Abmessung mit direktem Bezug zum Prozeßgeschehen zu wählen. Zwingend nötig ist dies jedoch nicht.

3.1.1.2 Stoffwerte

In der Relevanzliste müssen diejenigen Stoffwerte aufgenommen werden, die zur Beschreibung der Funktion eines Werkstoffes nötig sind. Die Einschränkung auf die Beschreibung des Werkstoffes in seiner Funktion anstatt einer vollständigen Werkstoffbeschreibung ist dabei entscheidend. Dient ein Werkstoff beispielsweise dazu, einer Struktur eine gewisse mechanische Festigkeit zu verleihen, sind alle elektrischen und thermischen Stoffwerte irrelevant und brauchen nicht berücksichtigt zu werden. Trägt ein Werkstoff nicht wesentlich zum Prozeßerfolg bei, können seine charakteristischen Eigenschaften sogar ganz vernachlässigt werden.

Bei der Sammlung relevanter Stoffwerte sollte deshalb nach folgendem Schema vorgegangen und die nachfolgenden Fragen in der gegebenen Reihenfolge beantwortet werden:

1. Welche Werkstoffe werden im Prozeß verwendet (in der Anlage, bzw. im Produkt)?
2. Welche Werkstoffe unter diesen kann man sich nicht durch beliebige andere Materialien ausgetauscht denken, ohne daß sich der Prozeßablauf deutlich verändert?
3. In welcher Weise, durch welche physikalischen Vorgänge sind die aus Frage 2 resultierenden Werkstoffe am Prozeß beteiligt?
4. Durch welche physikalischen Größen lassen sich die physikalischen Vorgänge an denen die Werkstoffe beteiligt sind beschreiben?

5. Welche Größen daraus sind Werkstoffgrößen?

In der Regel sind die aus Frage 5 resultierenden Größen als prozeßbeeinflussende Stoffwerte in die Relevanzliste aufzunehmen.

3.1.1.3 Prozeßgrößen

Die Prozeßgrößen sind die am schwierigsten bestimmmbaren Größen innerhalb der vier Parametergruppen. Während es lediglich eine begrenzte Anzahl von Stoffwerten und universellen Konstanten gibt, die einen Prozeß beeinflussen können, hängen die relevanten Prozeßgrößen stark von der Ausprägung des Prozesses ab.

Da ein Prozeß definitionsgemäß eine Umwandlung, einen Transport und/oder eine Speicherung von Materie, Energie oder Informationen impliziert, ist auf jeden Fall die Zeit als physikalische Größe zu berücksichtigen. Eine instantane Umwandlung, Speicherung bzw. Transport kommt in der realen Welt nicht vor. Die Zeit wird ähnlich der Geometrie in Form einer charakteristischen Prozeßzeit, evtl. der Takt- oder Zykluszeit berücksichtigt.

Die meisten relevanten Prozeßgrößen werden durch die vorgeschlagene detaillierende Prozeßbetrachtung ermittelt. Ergänzend dazu können Methoden wie FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluß-Analyse) oder FBA (Fehlerbaumanalyse) zur Ermittlung weiterer Prozeßgrößen, bzw. zur Absicherung des bereits ermittelten Satzes relevanter Prozeßgrößen herangezogen werden. Ein wichtiges Indiz relevanter Größen eines Prozesses sind innerhalb des Prozesses möglicherweise auftretenden Fehler. Darin einbezogen sind Mängel am Produkt als Folge falsch eingestellter Prozeßparameter. Dem liegt der Gedanke zugrunde, daß ein Parameter, dessen fehlerhafte Einstellung zu einem Defekt am Produkt führt, auf jeden Fall prozeßrelevant ist. Auch die FMEA und FBA werden als Methode nicht vollständig zur Lösung dieser Aufgabe benötigt. So ist die Risikoanalyse der FMEA für die Ermittlung prozeßrelevanter Parameter nicht notwendig. Teile und Ansätze dieser Verfahren können jedoch in einzelnen Bereichen zielführend sein. Eine Rückverfolgung der Kausalkette, die den bekannten Fehler verursacht, führt schließlich auf den oder die fehlerverursachenden und damit prozeßbeeinflussenden Prozeßgrößen. Hier ist vor allem die Methodik der FBA zielführend. Ein Überblick über die FMEA und FBA geben Reinhart u. a. (1996, S. 86-93).

3.1.1.4 Universelle Konstanten

Häufig werden bei der Sammlung prozeßrelevanter physikalischer Größen universelle Konstanten nicht berücksichtigt. Die Ursache dafür liegt vermutlich gerade im universellen Charakter der Konstanten, der verhindert, sie konkret mit einem betrachteten Prozeß in Verbindung zu setzen.

Speziell in der Produktionstechnik spielt innerhalb der universellen Konstanten in der Regel hauptsächlich die Gravitationskonstante g eine Rolle. Die Gravitationskonstante ist immer dann mit in die Relevanzliste aufzunehmen, wenn die Schwerkraft einen si-

gnifikanter Einfluß auf das Prozeßgeschehen hat. Dies ist beispielsweise bei der freien Konvektion der Fall und könnte für die Auslegung von Prozessen in Rein- und Reinsträumen interessant sein.

Als Gedankenexperiment sollte man zur Klärung der Relevanz von g die Frage beantworten, ob der Prozeß in seinen wesentlichen Grundzügen in der Schwerelosigkeit unverändert ablaufen könnte. Dies trifft z. B. für alle Zerspanprozesse zu, vorausgesetzt, den Trajektorien der Späne wird keine entscheidende Bedeutung beigemessen.

Darüber hinaus sind Dimensionskonstanten in der Relevanzliste zu berücksichtigen, wenn das System der Grunddimensionen erweitert oder reduziert wird. Zur Erweiterung von Dimensionssystemen siehe Pawłowski (1971, S. 56 ff.). Es handelt sich dabei eher um eine mathematisch-physikalische Notwendigkeit, als um eine anschaulich-vollständige Prozeßbeschreibung.

3.1.1.5 Nachbereitung der Relevanzliste

Wichtig ist zunächst, daß die Relevanzliste keine hinsichtlich ihrer Dimension linear abhängigen Größen enthält (sinngemäß Pawłowski 1971, S. 33). Gruppen von Größen mit linear abhängigen Dimensionen (z. B. Dichte ρ , kinematische Viskosität η und dynamische Viskosität ν) können so lange reduziert werden, bis eine lineare Unabhängigkeit der vorkommenden Dimensionen erreicht ist.

Darüber hinaus kann die Relevanzliste vereinfacht werden. Ziel ist es dabei, die Anzahl der Parameter durch Kombination oder Reduktion zu verringern. Eine geeignete Möglichkeit dazu bietet das sinnvolle Kombinieren physikalischer Größen. Dazu ist jedoch Erfahrung im Umgang mit der Ähnlichkeitstheorie hilfreich. Größen, die in unmittelbarem Zusammenhang miteinander stehen, können unter bestimmten Umständen miteinander zu einer einzigen Größe kombiniert werden. Voraussetzung für die Kombination von zwei oder mehr Größen ist, daß durch Streichung der einzelnen Größen keine Information über den Prozeß verlorengeht bzw. ein Effekt des Prozesses nicht mehr vollständig beschrieben wird.

Größen, die unmittelbar miteinander in Zusammenhang stehen, sind beispielsweise bezogene Größen und ihre entsprechenden Bezugsgrößen. Beispielsweise ist die Wärmekapazität eine auf die Masse bezogene Werkstoffgröße und kann deshalb, falls oben genannte Voraussetzung erfüllt ist, mit der Dichte des Werkstoffes zu einer einzigen Größe zusammengefaßt werden. Dies ist zulässig, wenn die Dichte an anderer Stelle nicht alleine zur Beschreibung eines Effektes des Prozesses benötigt wird. In diesem Falle geht das Produkt aus Dichte und Wärmekapazität in die Relevanzliste ein, die einzelnen Größen werden nicht weiter berücksichtigt.¹

¹ Statt der echten Bezugsgröße „Masse“ wird in der Regel die Dichte verwendet, da die Geometrie (charakt. Länge, s. Kap. 3.1.1.1) auf jeden Fall in der Relevanzliste enthalten ist und die Dichte als direkte Werkstoffkenngröße unmittelbar aussagekräftiger ist als die Masse eines Körpers. Masse, Länge und Dichte stellen eine linear abhängige Größengruppe dar, so daß eine der drei Größen gestrichen werden kann. Dies ist in der Regel die weniger aussagekräftigere Masse.

Eine weitere Möglichkeit, die Parameteranzahl der Relevanzliste zu reduzieren, bieten zulässige vereinfachende Annahmen. Diese Vereinfachungen führen dazu, daß die Parameter vernachlässigt werden können, die nur mit den durch die Vereinfachung kassierten Effekten im Zusammenhang stehen.

Im Vergleich zu der zuvor beschriebenen Kombination ist die hier angesprochene Reduktion weniger formal begründet und birgt deshalb größere Risiken. Die Richtigkeit einer Reduktion aufgrund vereinfachender Annahmen muß experimentell nachgewiesen werden.

3.1.2 Herleitung einer dimensionslosen Prozeßdarstellung aus einer Relevanzliste

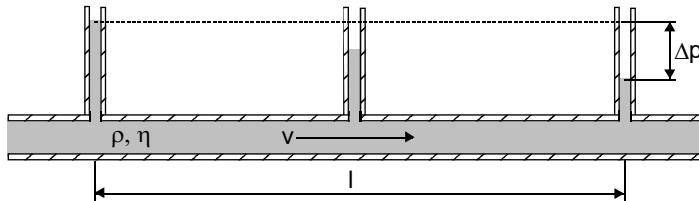
Die mathematische Verarbeitung von Relevanzlisten ist in der Literatur beschrieben (Baker u. a. 1991, S. 23 ff.; Pawłowski 1971, S. 40 ff.; Zlokarnik 1991, S. 29 f.) und ist deshalb nicht Gegenstand dieser Arbeit. Es wird lediglich aus Gründen der Vollständigkeit und des besseren Verständnisses ein kurzer Überblick über das angewandte Verfahren gegeben.

Aus den Größen der Relevanzliste wird eine Dimensionsmatrix gebildet. Jede Spalte repräsentiert dabei eine physikalische Größe der Relevanzliste, jede Zeile der Dimensionsmatrix eine Basisdimension des zugrundeliegenden Dimensionssystems. In der Dimensionsmatrix stehen als Zahlenwerte die Exponenten, mit denen eine Basisdimension (Zeile) in die Dimension der jeweiligen physikalischen Größe der Relevanzliste (Spalte) eingeht. Das Aufstellen einer Dimensionsmatrix ist immer möglich, da sich die Dimensionen aller physikalischer Größen als Potenzprodukte der Basisdimensionen ausdrücken lassen.

Auf die Dimensionsmatrix wird der Gauß'sche Lösungsalgorithmus angewandt. Dadurch wird die Dimensionsmatrix in eine Einheits- und eine Restmatrix unterteilt. Die Größen, die zu den Spalten der Einheitsmatrix gehören, werden nun als neue Basisdimensionen aufgefaßt. Die Inhalte der Restmatrix stellen spaltenweise die Exponenten bezüglich der neuen Basisdimensionen (Einheitsmatrix) dar. Sie geben spaltenweise an, wie die Dimension der Größe der jeweiligen Spalte mit den neuen Basisdimensionen zu bilden ist. Diese Dimension ist wieder ein Potenzprodukt, gebildet aus den neuen Basisdimensionen (s. Abb. 3-4).

Dividiert man nun eine physikalische Größe der Restmatrix durch ihre neue Dimension erhält man eine dimensionslose Kennzahl. Die Kennzahl kann als dimensionslose Variante der betreffenden physikalischen Größe aufgefaßt werden.

Gegeben: Fluid der Dichte ρ und der Viskosität η strömt mit einer Geschwindigkeit v durch ein Rohr der Länge l . Längs des Rohres tritt ein Druckunterschied Δp auf.



Dimensionsmatrix:

	ρ	l	v	η	Δp	Relevanzliste
M	1	0	0	1	1	
-L	-3	1	1	-1	-1	
-T	0	0	-1	-1	-2	

Basisdimensionen

Bereich der Einheitsmatrix Bereich der Restmatrix

Gauß-Algorithmus

ρ	l	v	η	Δp
1	0	0	1	1
0	1	0	1	0
0	0	1	1	2

Dimensionslose Kennzahlen

$$\Pi_1 = \frac{\eta}{l v \rho} \quad \text{Reynolds-Zahl}$$

$$\Pi_2 = \frac{\Delta p}{\rho v^2} \quad \text{Euler-Zahl}$$

Abb. 3-4: Vorgehensweise bei der Ermittlung prozeßrelevanter dimensionsloser Kennzahlen mit Hilfe einer Relevanzliste.

Ein Großteil der produktionstechnischen Probleme wird durch eine drei- oder vierzeilige Dimensionsmatrix erfaßt. Dies beruht auf der Tatsache, daß die Basisdimensionen Länge L, Masse M und Zeit T, gegebenenfalls um die Temperatur Θ erweitert, zur Beschreibung der meisten produktionstechnischen Prozesse ausreichen. Da die dimensionslosen Kennzahlen lediglich aus der Restmatrix gebildet werden, ist die Anzahl der Kennzahlen um den Rang der Dimensionsmatrix geringer als die Anzahl der in der Relevanzliste enthaltenen physikalischen Größen. Bis auf einige wenige entartete Fälle entspricht der Rang der Dimensionsmatrix der Anzahl der Basisdimensionen (Pawlowski 1971, S. 27, Fußnote 1). Dies ist auch in Abb. 3-4 zu erkennen: Die fünf in der dimensionsbehafteten Darstellung prozeßrelevanten physikalischen Größen ρ , l , v , η und Δp werden in der dimensionslosen Darstellung auf die zwei Variablen

Re und Eu reduziert. Dies entspricht einer Verringerung des Variablenatzes um den Rang der Dimensionsmatrix ($r=3$).

Den physikalischen Größen der ersten drei bzw. vier Spalten der Dimensionsmatrix kommt eine herausragende Bedeutung zu. Sie dienen später als prozeßbezogene Basisdimensionen. Darüber hinaus stellen sie aufgrund der Reduzierung der Parameteranzahl beim Übergang zu einem dimensionslosen Koordinatensystem die Freiheitsgrade der Modellbildung dar. Die Maßstäbe für die Größen im Bereich der Einheitsmatrix sind frei wählbar, die Maßstäbe der Größen im Bereich der Restmatrix sind von den Größen der Einheitsmatrix abhängig. Wird die Ähnlichkeitstheorie eingesetzt, um Beobachtungshindernisse der Realität zu umgehen, sollten dementsprechend die ersten r Spalten (r entspricht dem Rang der Dimensionsmatrix) mit Größen besetzt werden, die unmittelbar das Beobachtungshindernis betreffen.

Läuft der Originalprozeß beispielsweise sehr schnell ab und wird deshalb eine Verlangsamung im Modell gewünscht, muß die charakteristische Prozeßzeit als Parameter eine Spalte des Bereiches der Einheitsmatrix besetzen. Dadurch wird die freie Wahl eines Zeitmaßstabes gewährleistet.

In der Regel ist mit dem Einsatz der Ähnlichkeitstheorie die Verwendung eines Modellwerkstoffes verbunden, um damit Beobachtungshindernisse zu umgehen.

Es empfiehlt sich aus diesem Grund generell, die Größen Zeit und Länge (Geometrie) in den Bereich der Einheitsmatrix zu stellen, da dadurch die Realisierbarkeit der Versuchsanlage gesichert wird. In den restlichen verfügbaren Spalten der Einheitsmatrix sollten dann die relevanten Stoffwerte eines Modellwerkstoffes berücksichtigt werden, um dessen Einsetzbarkeit in der Versuchsanlage zu gewährleisten. Übersteigt die Anzahl der Stoffwerte des Modellstoffes die Anzahl der freien Spaltenplätze des Bereiches der Einheitsmatrix, können Geometrie und/oder Zeit zugunsten der Stoffgrößen in den Bereich der Restmatrix verschoben werden. Dann ist jedoch darauf zu achten, welche Werte der nun von den Stoffgrößen abhängige Längen- und/oder Zeitmaßstab annimmt. Die Realisierung einer Versuchsanlage ist unter diesen Umständen nicht mehr a priori sichergestellt.

3.1.3 Ableiten von Maßstabsgleichungen

Für die Herleitung von Maßstabsgleichungen existiert eine konkrete Vorgehensweise. Es gibt keine Aspekte des Herleitungsschemas, die aus produktionstechnischer Sicht besonders zu berücksichtigen wären. Der Vollständigkeit halber wird das Vorgehen zur Herleitung von Maßstabsgleichungen kurz beschrieben. Ausführliche Informationen dazu enthält jedes Standardwerk über die Ähnlichkeitstheorie (Pawlowski 1971, S. 94 ff.; Pawlowski 1991, S. 10 f.; Zlokarnik 1991, S. 39 ff.).

Ausgehend von den dimensionslosen Kennzahlen werden Maßstabsgleichungen abgeleitet. Dies geschieht mittels der sogenannten idem-Bedingung. Die idem Bedingung fordert, daß dieselbe dimensionslose Kennzahl in Modell- und Originalausführung eines Prozesses den gleichen numerischen Wert annimmt (s. Abb. 3-5). Aus jeder di-

mensionslosen Kennzahl folgt somit eine Gleichung, die nach einer darin enthaltenen physikalischen Größe aufgelöst werden kann. Enthält die Relevanzliste m physikalische Größen und beträgt der Rang der Dimensionsmatrix r, so resultieren daraus m – r Maßstabsgleichungen und r frei wählbare Maßstäbe.

Für das Beispiel aus Abb. 3-4 bedeutet dies die freie Wählbarkeit der Dichte ρ des Fluids, der Geometrie l und der Fließgeschwindigkeit v. Von diesen Größen sind die Maßstäbe der Größen in der Restmatrix, η und Δp , abhängig (s. Abb. 3-5).

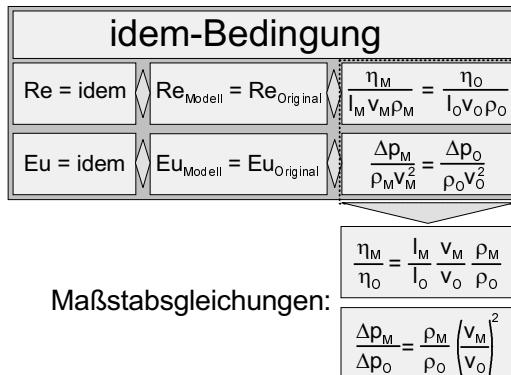


Abb. 3-5: Ableitung von Maßstabsgleichungen ausgehend von der idem-Bedingung

3.2 Auswahl von Modellstoffen

Mit dem Aufstellen von Maßstabsgleichungen wurde der allgemeine Teil eines Ähnlichkeitstheoretischen Modells abgeschlossen. Bis zu diesem Punkt sind theoretische Vorarbeiten ohne Kenntnis der Parameterquantifizierung eines konkreten Prozesses möglich. Der nächste Schritt, die Ermittlung geeigneter Ersatz- oder Modellstoffe für ein Ähnlichkeitstheoretisches Modell, kann nur anhand eines definierten Prozesses mit eindeutigen bestimmten numerischen Parameterwerten erfolgen.

Modellstoffe werden in nahezu allen Anwendungen der Ähnlichkeitstheorie eingesetzt. Der Zweck der Verwendung von Modellwerkstoffen liegt darin, durch Einsatz eines neuen Werkstoffes im Modellprozeß Beobachtungshindernisse des Originalprozesses zu umgehen. In den Anwendungsfällen, die in der Literatur beschrieben sind, wird der Modellstoff in der Regel ohne systematische Suche oder qualifizierte Auswahl als Ergebnis präsentiert. Deshalb und wegen der zentralen Bedeutung von Ersatzstoffen in der Ähnlichkeitstheorie soll in diesem Kapitel eine allgemeine Methode zur Auswahl von Modellstoffen aufgezeigt werden.

In der Ähnlichkeitstheorie unterscheidet man grundsätzlich zwischen konstanten und veränderlichen physikalischen Stoffgrößen. Stoffgrößen können unter zwei Bedingungen konstant sein: zum einen ist dies der Fall, wenn eine Stoffgröße von keinen weiteren physikalischen Größen abhängig ist. Zum anderen kann eine Stoffgröße aus ähnlichkeitstheoretischer Sicht als konstant betrachtet werden, wenn sie zwar von anderen Größen abhängt, diese jedoch ihren Wert innerhalb des betrachteten Prozesses nicht verändern.

3.2.1 Ermittlung eines Modellstoffes bei konstanten Stoffgrößen

Die Ermittlung eines Modellstoffes bei konstanten Stoffgrößen ist weitgehend unproblematisch, wird aber der Vollständigkeit halber beschrieben.

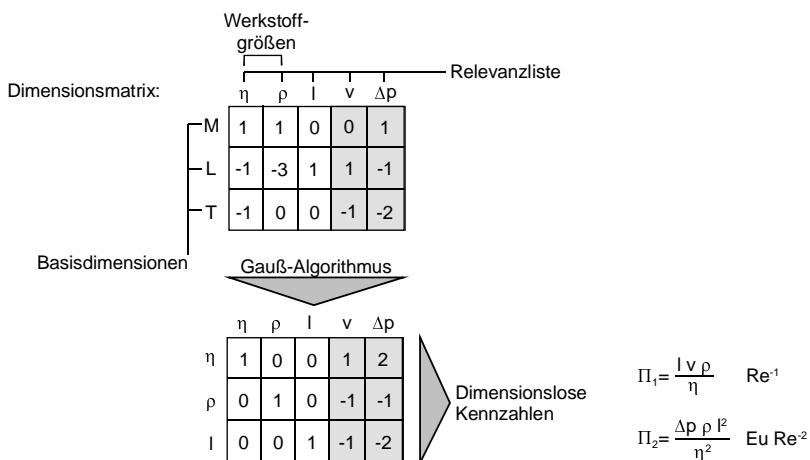
Aufgrund der Unveränderlichkeit der Stoffwerte werden im Gegensatz zu variablen Stoffwerten nicht Stoffverhalten, sondern vielmehr Stoffeigenschaften betrachtet.

Zunächst sind die Stoffwerte des zu ersetzenen Werkstoffes zu betrachten. Wie beschrieben enthält die Relevanzliste alle Stoffwerte, die den betreffenden Werkstoff hinsichtlich seiner Funktion eindeutig beschreiben. Der Werkstoff wird in der Regel nur hinsichtlich eines Stoffwertes skaliert, um ein Beobachtungshindernis des Originalprozesses im Modellprozeß zu umgehen. Ein Ersatzwerkstoff wird dementsprechend hinsichtlich dieser Skalierungsgroße recherchiert. Dabei müssen jedoch die restlichen relevanten Stoffwerte des Werkstoffes berücksichtigt werden. Wie bereits in Kap. 3.1.2 beschrieben, sollte auf jeden Fall die Skalierungsgroße, wenn möglich auch weitere Stoffgrößen des Werkstoffes, der im Modellprozeß ersetzt werden soll, in den ersten r Spalten der Dimensionsmatrix stehen. Dies erleichtert die freie Wahl und die Einsetzbarkeit des Modellwerkstoffes im Modellprozeß erheblich. Da die dimensionslosen Kennzahlen die physikalischen Größen aus dem Bereich der Einheitsmatrix der Dimensionsmatrix als Basisgrößen verwenden, folgt daraus bei der Bildung von Maßstabsgleichungen die Abhängigkeit einiger Maßstäbe von den Stoffwerten des Original- und des Modellstoffes.

Durch Rückwärtsrechnung der Maßstabsgleichungen kann für die Stoffwerte des zu ermittelnden Modellwerkstoffes ein Akzeptanz-Wertebereich errechnet werden. Kriterium ist dabei die Realisierbarkeit der Versuchsanlage.. Man erhält somit für jede relevante Stoffgröße des betreffenden Werkstoffes einen Akzeptanz-Wertebereich, der dann als Ausgangspunkt für eine Werkstoffrecherche dient. Jeder Werkstoff, dessen Stoffwerte innerhalb der Akzeptanz-Wertebereiche liegen, ist ein möglicher Modellwerkstoff.

Die Akzeptanz-Wertebereiche der einzelnen relevanten Stoffgrößen des zu verändernden Werkstoffes sind bei einer derartigen Recherche UND-verknüpft, d. h. sie müssen alle gleichzeitig erfüllt werden. Die Wahrscheinlichkeit, eine solche Recherche erfolgreich abzuschließen sinkt somit drastisch mit dem Anstieg der Anzahl der relevanten Stoffgrößen eines Werkstoffes.

Das folgende Beispiel soll die Ermittlung von Akzeptanzwertebereichen anhand technischer Randbedingungen beim Modellaufbau erläutern. Zur Illustration wird der in Abb. 3-4 bereits beschriebene Effekt des Druckabfalls in durchströmten Rohren verwendet. In Abb. 3-4 waren die Größen der Relevanzliste so angeordnet, daß sich daraus direkt die bekannten dimensionslosen Kennzahlen Reynolds-Zahl und Euler Zahl ergaben. Für Ähnlichkeitstheoretische Untersuchungen ist diese Anordnung der Relevanzliste jedoch ungünstig, da sich daraus eine Viskosität des Modellfluids in Abhängigkeit der Übertragungsverhältnisse von Dichte, Länge und Strömungsgeschwindigkeit ergäbe. Dies erschwert eine Materialrecherche erheblich, da so die Dichte des Modellfluids frei gewählt werden kann, dessen Viskosität jedoch eindeutig durch andere Größen determiniert wird.



Konsequenz: Die Werkstoffgrößen η , ρ und der Geometriemaßstab sind frei wählbar!

Abb. 3-6: Kennzahlengenbildung für das Anwendungsbeispiel aus Abb. 3-4 mit umgeordneter Dimensionsmatrix.

Diese andere Anordnung der Größen in der Relevanzliste in Abb. 3-6 im Vergleich zu Abb. 3-4 führt zu veränderten dimensionslosen Kennzahlen. Diese erleichtern, wie im folgenden gezeigt wird, eine Materialrecherche. Alle Kennzahlausätze, die mit der gleichen Relevanzliste errechnet werden, sind linear voneinander abhängig und beinhalten deshalb identische Informationen. Für einzelne Aspekte des Versuchsaufbaus können sie jedoch unterschiedlich gut geeignet sein. Die Kennzahlen aus Abb. 3-6 führen zu den nachfolgend dargestellten Maßstabsgleichungen. Nun bestehen Maßstabsgleichungen nicht mehr wie zuvor für die Viskosität und die Druckdifferenz, sondern für Fließgeschwindigkeit und Druckdifferenz.

Maßstabsgleichungen	
Geschwindigkeit:	$\frac{v_M}{v_O} = \frac{\rho_O}{\rho_M} \frac{l_O}{l_M} \frac{\eta_M}{\eta_O}$
Druckdifferenz:	$\frac{\Delta p_M}{\Delta p_O} = \frac{\rho_O}{\rho_M} \left(\frac{l_O}{l_M} \right)^2 \left(\frac{\eta_M}{\eta_O} \right)^2$

Abb. 3-7: Maßstabsgleichungen, abgeleitet aus den Kennzahlen Π_1 und Π_2 der Abb. 3-6.

Bestehen nun Randbedingungen für die Gestaltung des Versuchsprozesses, lassen sich daraus Akzeptanzwertebereiche für die Recherche des Ersatzwerkstoffes definieren, wie im folgenden Beispiel gezeigt wird:

Aus technischen Gründen soll die Fließgeschwindigkeit im Modell nur halb so groß sein wie im Originalprozeß. Um die Beobachtbarkeit zu erhalten, soll der Druckverlust im Modell trotzdem mindestens dem Druckverlust im Original entsprechen. Das Modell soll darüber hinaus nach Möglichkeit geometrisch unskaliert hergestellt werden, um nicht im Modell unerwünschte, geometriebedingte Nebeneffekte hervorzurufen. Zielgröße einer ähnlichkeitstheoretischen Versuchsdurchführung ist der Druckverlust. Abb. 3-8 zeigt die Randbedingungen an die Versuchsdurchführung in mathematischer Notation.

Randbedingungen des Modells	
Bedingte Fließgeschwindigkeit im Modell:	$\frac{v_M}{v_O} \leq 0,5$
Erhalt der Beobachtbarkeit:	$\frac{\Delta p_M}{\Delta p_O} \geq 1$
Vermeidung von Nebeneffekten:	$\frac{l_O}{l_M} = 1$

Abb. 3-8: Mathematisch formulierte Beispiel-Randbedingungen zur Ermittlung von Akzeptanzbereichen.

Ziel der Akzeptanzwertebereiche ist, die Recherche nach einem Ersatzwerkstoff zu unterstützen, indem Wertebereiche für die relevanten Stoffgrößen definiert werden. Im vorliegenden Beispiel sind dies die Viskosität η und die Dichte ρ .

Im folgenden Schritt werden die Randbedingungen in die Maßstabsgleichungen eingesetzt und die Modell- und Original-Variablen getrennt. Die so erhaltenen Gleichungen

werden ineinander eingesetzt und ergeben den ersten Akzeptanzwertebereich (Viskosität). Aus diesem läßt sich in Verbindung mit denselben Gleichungen der zweite Akzeptanzwertebereich (Dichte) ermitteln (s. Abb. 3-9).

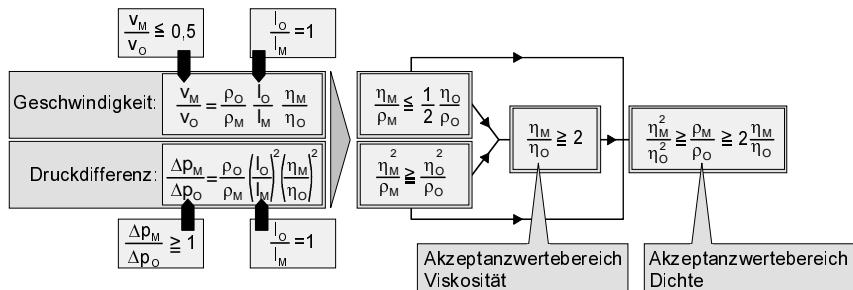


Abb. 3-9: Ermittlung von Akzeptanzwertebereichen für Stoffgrößen aus den Maßstabsgleichungen und den Randbedingungen für die Modellrealisierung.

So ist in Kenntnis der Stoffwerte des Originalwerkstoffes die Recherche eines Ersatzwerkstoffes möglich. Jeder Stoff, dessen Stoffwerte innerhalb des Akzeptanzwertebereiches liegen, kann in einem ähnlichkeitstheoretischen Modell eingesetzt werden, das allen Randbedingungen genügt.

3.2.2 Ermittlung eines Modellstoffes bei variablen Stoffgrößen

Im Gegensatz zu konstanten Stoffgrößen wird bei variablen Stoffgrößen nicht nur eine Stoffeigenschaft, sondern ein bestimmtes Werkstoffverhalten betrachtet. Ein eventueller Ersatzwerkstoff muß daher nicht nur in seinen dimensionslosen Kenngrößen, sondern auch in seinem dimensionslosen Stoffverhalten mit dem Originalwerkstoff übereinstimmen.

Ein Verfahren zur Behandlung variabler Stoffwerte in der Ähnlichkeitstheorie wird in Pawłowski 1991 ausführlich beschrieben. Die dort aufgezeigte Methodik wurde für den chemischen Anlagen- und Apparatebau entworfen, ist jedoch allgemein gültig. Aus den Gleichungen des Verfahrens heraus lassen sich darüber hinaus weitere Eigenschaften ableiten, die für eine Werkstoffrecherche hilfreich sind und die Suche nach einem geeigneten Ersatzwerkstoff verkürzen.

Bei der Behandlung veränderlicher physikalischer Größen, wird das betreffende Stoffverhalten als Funktion zunächst in eine dimensionslose Darstellung übertragen. Dazu wird die von Pawłowski eingeführte Standardtransformation verwendet (s. Pawłowski 1991, S. 19 ff.).

Es sei $s(p)$ die Stoffeigenschaft s in Abhängigkeit von der Größe p . Durch die Standardtransformation wird die Funktion $s(p)$ in eine dimensionslose Funktion $\Phi(u)$ überführt, wobei folgende Randbedingungen gelten:

$$\Phi(0) = 1 \quad \text{Gl. 1}$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial u} \right|_{u=0} = 1 \quad \text{Gl. 2}$$

Man erreicht dies durch die folgende Vorgehensweise: Zunächst wählt man einen beliebigen Punkt auf einem relevanten Funktionsabschnitt der Funktion $s(p)$ als Bezugspunkt $(p_0; s_0)$. Davon ausgehend ermittelt man die p -Sensitivität γ_0 der Funktion $s(p)$ am Bezugspunkt. Diese lautet:

$$\gamma_0 = \frac{1}{s_0} \cdot \left. \frac{\partial s}{\partial p} \right|_{p=p_0} \quad \text{Gl. 3}$$

Die dimensionslose p -Größe u , sowie die dimensionslose s -Größe Φ ergeben sich dann aus:

$$u = \gamma_0 (p - p_0) \quad \text{Gl. 4}$$

$$\Phi(u) = \frac{s(u)}{s_0} \quad \text{Gl. 5}$$

Ein Werkstoff ist nun als Modellwerkstoff tauglich, wenn sich die dimensionslosen Stofffunktionen von Original- und Modellwerkstoff entsprechen. Dies stellt eine idem-Bedingung für das Stoffverhalten $\Phi(u)$ dar. Wichtig dabei ist, daß das Stoffverhalten von Original- und Modellwerkstoff in seiner dimensionslosen Form und nicht anhand der üblichen dimensionsbehafteten Darstellung verglichen wird. Aufgrund der entscheidenden Bedeutung dieser Transformationsvorschrift sind die Größen s_0 , p_0 und γ_0 in die Relevanzliste aufzunehmen.

Die Gestalt der dimensionslosen Stofffunktion hängt stark vom gewählten Bezugspunkt ab. Gelingt es jedoch, das betreffende Werkstoffverhalten durch eine sogenannte bezugsinvariante Approximation zu beschreiben, hat der Bezugspunkt keinen Einfluß mehr auf die dimensionslose Stofffunktion. Dies vereinfacht eine Ähnlichkeitstheoretische Betrachtung, da dann der Parameter p_0 nicht mehr in die Relevanzliste eingeht (Pawlowski 1991, S. 55). Die Funktion, die bezüglich der Standardtransformation bezugsinvariant ist, besitzt die Gestalt:

$$\chi(u; \mu) = (1 + \mu \cdot u)^{\frac{1}{\mu}} \quad \text{für } \mu \neq 0 \quad \text{Gl. 6}$$

$$\chi(u; \mu) = e^u \quad \text{für } \mu=0 \quad (\text{Pawlowski 1991, S. 35}). \quad \text{Gl. 7}$$

Dementsprechend können Stofffunktionen mit Gl. 4 dimensionsbehaftet folgendermaßen bezugsinvariant dargestellt werden:

$$s(p; \mu) = s_0 \cdot [1 + \mu \cdot \gamma_0 \cdot (p - p_0)]^{\frac{1}{\mu}} \quad \text{für } \mu \neq 0 \quad \text{Gl. 8}$$

$$s(p; \mu) = e^{\gamma_0 \cdot (p - p_0)} \quad \text{für } \mu=0 \quad (\text{Pawlowski 1991, S. 36). Gl. 9}$$

Inwieweit ein Stoffverhalten durch die Gleichungen 8 oder 9 darstellbar ist, muß im Einzelfall geprüft werden. Sollten die Gl. 6 oder 7 für die standardtransformierte bzw. Gl. 8 oder 9 für die dimensionsbehaftete Stofffunktion nicht verwendet werden können, muß auf die Standardtransformation mit Berücksichtigung von p_0 in der Relevanzliste zurückgegriffen werden.

Hinsichtlich der Recherche nach einem möglichen Ersatzwerkstoff gilt für die aus der Relevanzliste entspringenden dimensionslosen Kennzahlen und Maßstabsgleichungen das bereits unter Kap. 3.2.1 gesagte. Auch hier spielt die Realisierbarkeit der Versuchsanlage das entscheidende Auslegungskriterium um zu Akzeptanz-Wertebereichen für die Stoffwerte des Ersatzwerkstoffes zu gelangen. Hinzu kommt bei der Betrachtung variabler Stoffgrößen jedoch die idem-Bedingung für das Stoffverhalten. Damit wird das vorhandene Problem um eine Dimension erweitert.

Das Problem bei der Recherche nach einem Werkstoff mit ähnlichem Werkstoffverhalten ergibt sich aus der dimensionslosen Darstellung des Stoffverhaltens. Diese ist in der Regel für keinen Werkstoff verfügbar und wird nicht in der Literatur geführt. Damit entziehen sich die Werkstoffe zunächst einer Überprüfung. Eine Beurteilung ist erst nach der Durchführung der Standardtransformation möglich. Die oben angegebenen Gleichungen erlauben jedoch Einschränkungen der in Frage kommenden Werkstoffe oder zumindest lassen sich aus den Transformationsgleichungen Startpunkte für eine Werkstoffrecherche ableiten.

Die Gleichungen der Standardtransformation sind aus mathematischer Sicht eindeutig und hinreichend. Aus diesen mathematischen Eigenschaften und den Randbedingungen der Modelluntersuchung folgt die ‘Regel der gleichen Art’. Aufgrund der Eindeutigkeit der Standardtransformation bleiben charakteristische Funktionsverläufe des Stoffverhaltens, wie z. B. Sprünge, Knicke oder ähnliche Unstetigkeiten, in der dimensionslosen Darstellung qualitativ erhalten. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, Modell- bzw. Ersatzwerkstoffe unter den Materialien zu suchen, die hinsichtlich der zu skalierenden Eigenschaft artgleiches Verhalten aufweisen. Dies bedeutet beispielsweise, daß bei der Darstellung von Phasenübergängen ein kristallin erstarrender Werkstoff aufgrund der mit der Erstarrung verbundenen Charakteristik (Änderung von Stoffeigenschaften am Kristallisierungspunkt) nur durch einen anderen kristallinen Werkstoff ersetzt werden kann. Ähnliches gilt für thixotrop einstellbare Fluide, wie sie beispielsweise als Kleb- und Dichtstoffe in der Montage eingesetzt werden.

Für die Werkstoffrecherche bedeutet die „Regel der gleichen Art“, daß auf der Suche nach einem Ersatzwerkstoff mit technisch äquivalentem Stoffverhalten zunächst bei möglichst nahen Verwandten des Originalwerkstoffes begonnen werden sollte, d. h. möglichst innerhalb derselben Werkstofffamilie (z. B. Metalle, Kunststoffe, Gläser, Keramik, etc.).

3.3 Versuchsplanung

Die Planung und Durchführung von Versuchen an einer nach Ähnlichkeitstheoretischen Gesetzmäßigkeiten konstruierten Anlage erfolgt nach denselben Regeln wie an der Originalanlage. Dies sind üblicherweise die ein-, teil oder vollfaktorielle Versuchsplanung, die Versuchsplanung nach Taguchi sowie nach Shainin. Diese Planungsmethoden sind ausführlich bei *Reinhart u. a. (1996)* beschrieben.

Für Versuche, die auf Ähnlichkeitstheoretischen Überlegungen fußen, kann aber eine besondere Parameterbetrachtung bei der Versuchsplanung sinnvoll sein. Die Methodik der Versuchsplanung selbst bleibt davon unberührt, betroffen sind lediglich die Prozeßparameter.

Geht es bei der Versuchsdurchführung nämlich vor allem darum, allgemeine Wechselwirkungen zwischen den beteiligten relevanten Einflußgrößen festzustellen, ist es sinnvoll, die Versuche nicht anhand der dimensionsbehafteten sondern auf Basis der dimensionslosen Parameter zu planen. Der Vorteil dieser Methode liegt in der reduzierten Anzahl dimensionsloser gegenüber dimensionsbehafteter Einflußgrößen (s. Kap. 3.1.2). Dadurch wird der nötige Versuchsaufwand in der Regel verringert.

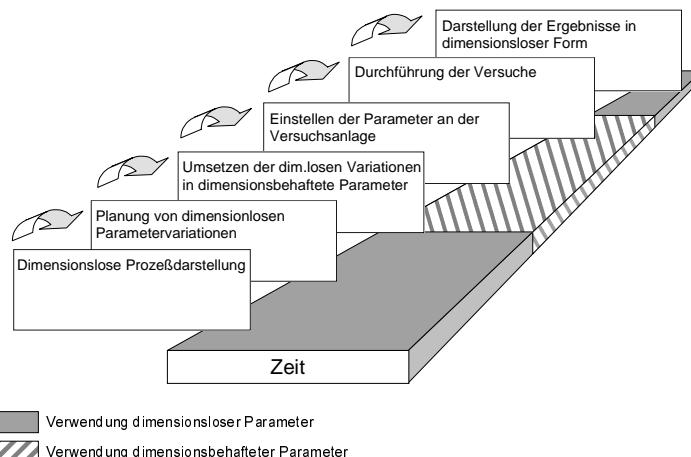


Abb. 3-10: "Dimensionslose" Versuchsplanung. Die Methodik der Versuchsplanung bleibt unverändert, jedoch wird mit dimensionslosen Parametern (Kennzahlen) geplant.

Selbstverständlich können an der Versuchsanlage nur dimensionsbehaftete Größen eingestellt werden. Deshalb müssen in diesem Fall die Parametervariationen mit den dimensionslosen Kennzahlen geplant und anhand der formalen Struktur der einzelnen dimensionslosen Kennzahlen in Einstellungen dimensionsbehafteter Größen an der

Versuchsanlage "übersetzt" werden. Der Unterschied zur herkömmlichen Vorgehensweise liegt darin, daß die einzelnen dimensionsbehafteten physikalischen Größen an der Versuchsanlage nicht mehr unabhängig voneinander eingestellt werden können. Als Ergebnis erhält man Abhängigkeiten dimensionsloser Kennzahlen voneinander. Diese dimensionslosen Beziehungen sind ebenso aussagefähig wie dimensionsbehaftete Prozeßbeschreibungen. Sie können durch die Einbeziehung von Werten eines bestimmten betrachteten Prozesses auf diesen Anwendungsfällen konkretisiert werden (s. Abb. 3-10). Eine derartige Parameterverdichtung erscheint im Prinzip immer sinnvoll, wenn es darum geht, Parameterzusammenhänge und -wechselwirkungen in einem Prozeß aufzudecken. Sie wird jedoch erst durch eine Ähnlichkeitstheoretische Aufbereitung des Prozesses ermöglicht. Diese Vorgehensweise empfiehlt sich besonders dann, wenn viele gleichartige Prozesse mit unterschiedlichen Parametern realisiert werden. Eventuell ist es dann möglich, alle Prozesse einer Art durch eine einzige dimensionslose Parameterbeziehung zu beschreiben, anstatt für jede Prozeßrealisierung eine neue dimensionsbehaftete Parameterbeziehung zu ermitteln.

Ein mögliches Anwendungsgebiet für diese vorgehensweise bietet bspw. das Auftragen fluider Klebe- und Dichtmedien. Hier existieren viele verschiedene Realisierungen eigentlich eines einzigen Prozesses. Die einzelnen Prozeßgestaltungen unterscheiden sich durch u. a. Leitungslänge, Förderdruck und Düsengeometrie (Schuller 1999). Hier ist es denkbar die Fördercharakteristik zumindest eines Fluids in einem einzigen dimensionslosen Gleichungssatz zu beschreiben und für einzelne Anwendungsfälle durch Einsetzen von Prozeßdaten zu konkretisieren.

3.4 Partielle Ähnlichkeit

Die einfachste Form der Modellübertragung liegt vor, wenn alle interessierenden Zustände an einem einzigen Modell geeigneter Größe untersucht werden können. Eine exakte Modellübertragung liegt vor, wenn sämtliche dimensionslosen Prozeßvariablen (Kennzahlen) des zu untersuchenden Vorgangs der idem-Bedingung genügen. Dieser Fall sollte in der Regel stets angestrebt werden. Partielle Ähnlichkeit liegt dagegen vor, wenn es aufgrund der mathematischen Struktur einiger Kennzahlen nicht möglich ist, alle idem-Bedingungen gleichzeitig zu erfüllen. Es ist ganz offensichtlich ein Nachteil der Ähnlichkeitstheorie, daß der Umstand der partiellen Ähnlichkeit nicht a priori sondern erst nach gewisser theoretischer Vorarbeit zu erkennen ist.

In der Literatur finden sich einige Ansätze und Anwendungsbeispiele dafür, wie trotz lediglicher partieller Ähnlichkeit eine sinnvolle Modellübertragung möglich ist und anhand eines Modells Aussagen über Parameter der Originalanlage getroffen werden können. Dabei ist jedoch ein deutlich fundierteres theoretisches Verständnis der Ähnlichkeitstheorie nötig als im Falle einer exakten Modellübertragung in einem einzigen Modell.

Prinzipiell wird das Problem der partiellen Ähnlichkeit durch mehrere Modellversuche in der Regel an mehreren unterschiedlichen Modellen gelöst. Die unterschiedlichen Modelle und Modellversuche decken dabei jeweils einen (Teil-)Aspekt der Modellübertragung ab. Die Vielzahl an Versuchsergebnissen muß dann zu einem aussagekräftigen Endergebnis zusammengeführt werden. Beispiele für Modellübertragung bei partieller Ähnlichkeit finden sich bei Pawłowski (1971, S. 99 ff., S. 149 ff.) sowie bei Zlokarnik (1991, S. 42 ff.).

Aus dem Blickwinkel einer produktionstechnischen Anwendung der Ähnlichkeitstheorie unter der Bedingung partieller Ähnlichkeit lassen sich folgende Folgerungen treffen:

Bei produktionstechnischen Prozessen handelt es sich um komplexe Vorgänge, die in der Regel mehrere physikalische Wirkprinzipien in sich vereinigen. Als Folge davon entstehen daraus ebenfalls komplexe ähnlichkeitstheoretische Modellprozesse. Vor diesem Hintergrund wird die Option, Untersuchungen an Mehrfachmodellen durchzuführen zu einer Frage der Wirtschaftlichkeit. Im ungünstigsten Fall kann es nötig werden, den zu untersuchenden Prozeß mehrfach anlagentechnisch abzubilden. Dies erhöht die entstehenden Kosten. Gleichzeitig wird die Versuchsdurchführung und besonders die Ergebnisauswertung und -interpretation erschwert, was sich negativ auf die Qualität der Ergebnisse hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit und Vorhersagbarkeit am Originalprozeß auswirken kann. Vor allen Dingen werden im Falle partieller Ähnlichkeit höhere Anforderungen an die Qualifikation des Personals an der Modellanlage gestellt. Während bei exakter Modellübertragung Erfahrung mit dem abgebildeten Prozeß zur Bedienung der ähnlichkeitstheoretischen Versuchsanlage ausreichend ist, sind bei partieller Ähnlichkeit Kenntnisse der Modellierungsmethodik zur Experimentplanung und -auswertung erforderlich. Die Modelluntersuchung eines produktionstechnischen Prozesses bei partieller Ähnlichkeit wird also aufwendiger und im Ergebnis unsicherer als bei exakter Modellübertragung. Daher sollte im Falle partieller Ähnlichkeit überprüft werden, ob die Konzentration auf die Untersuchung lediglich eines wesentlichen Aspektes oder Teilproblems an einem einzigen Modell zur Problembewältigung ausreichend ist. Steht kein durch Methodenwissen in der Ähnlichkeitstheorie qualifiziertes Personal zur Verfügung, sollte wenn möglich auf eine ähnlichkeitstheoretische Untersuchung zugunsten einer anderen Modellierungsmethode verzichtet werden.

4 Anwendungsbeispiel: Glaspressen

Anhand eines Anwendungsbeispiels wird in diesem Kapitel die ähnlichkeits-theoretische Modellbildung eines produktionstechnischen Prozesses durchgängig dargestellt. Die Vorgehensweise entspricht im wesentlichen einer Detaillierung des in Kap. 3 vorgestellten Ablaufes. Ein Glaspreßprozeß wird dabei zunächst allgemeingültig betrachtet und nicht in seinen Parametern quantifiziert.

4.1 Beschreibung des Produktionsprozesses

Glaspressen ist ein urformendes Verfahren. Bei der industriellen Erzeugung von Glasartikeln durch Pressen wird ein zyklischer Prozeß eingesetzt. Üblicherweise werden dabei Massenartikel ohne Variation in Gestalt und Material hergestellt.

4.1.1 Prozeßablauf

Aus einer temperierten Wanne wird heißes zähflüssiges Glas entnommen und in eine Form portioniert abgelegt. Mit Hilfe eines Preßstempels wird dieser sogenannte Glasposten, der ohne definierte Gestalt vorliegt, in der Form ausgepreßt, d. h. die Formwerkzeuge definieren eine Kavität, die vom heißen Glas ausgefüllt wird. Beim Pressen gibt das Glas konduktiv Wärme an die Formwerkzeuge ab und erhöht dadurch seine Viskosität.

Nach dem Anheben des Preßstempels verweilt das fertige Produkt in der Form. Unter Umständen wird das Produkt an seiner freien Oberfläche oder die Form durch Anblasen mit Preßluft konvektiv gekühlt. Schließlich wird das Produkt aus der Form entnommen und Nachbearbeitungsschritten wie z. B. Tempern oder Oberflächenveredelung bis hin zur Verpackung zugeführt. Die leere Form wird wieder mit einem Glasposten beladen und der Preßprozeß wird erneut durchlaufen.

4.1.2 Eingesetzte Maschinen und Werkzeuge

Industrielles Glaspressen ist ein vollautomatisierter Produktionsprozeß. Alle Prozeßschritte werden an Produktionslinien sequentiell starr verkettet abgearbeitet. Das Liniенpersonal ist mit der Anlagenüberwachung und -steuerung sowie der Qualitätssicherung betraut.

Für die Entnahme aus der Wanne und die Portionierung des heißen Glases kommen in der Industrie zwei unterschiedliche Verfahren und Maschinen zum Einsatz: das Kugel-speiser- und das Feederverfahren.

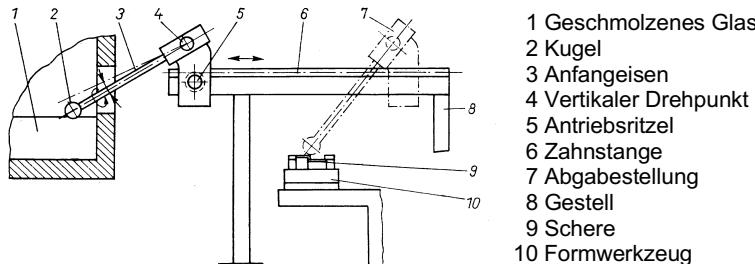


Abb. 4-1: Arbeitsweise des Kugelspeiserverfahren nach Richter u. a. (1987, S. 156).

Beim Kugelspeiserverfahren wird zähflüssiges Glas an einer rotierenden Kugel angefangen, die in das Glasbad eintaucht. Die Kugel wird mit dem Glas an ihrer Oberfläche über die Form bewegt. Dort wird die Rotation gestoppt und das Glas beginnt, von der Kugel in die Form abzulaufen. Der in der Form befindliche Glasposten wird durch einen Scherenschnitt vom restlichen Glas des Kugelspeisers getrennt (s. Abb. 4-1).

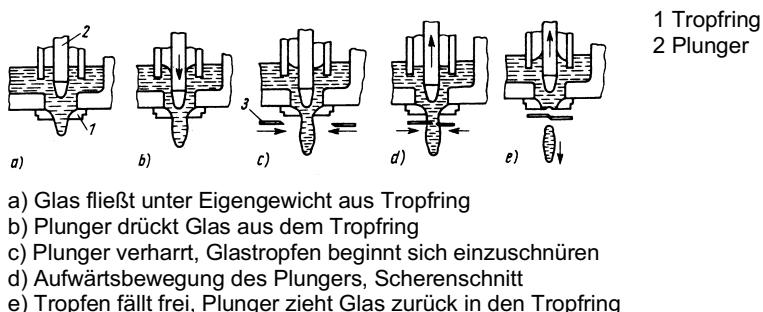


Abb. 4-2: Arbeitsweise eines Feeders (Tropfenspeiser) nach Schumann & Schier (1980, S. 166).

Das Feederverfahren nutzt ein Prinzip, daß dem eines Kolbendosierers ähnelt. Es fehlt beim Feeder jedoch der Zylinder, so daß es sich nicht um eine reine Volumendosierung handelt. Ein sich auf- und abbewegender Kolben (Plunger) drückt zähflüssiges Glas durch eine Öffnung. Durch die Aufwärtsbewegung des Plumbers wird der austretende Glasstrom eingeschnürt und wie beim Kugelspeiser durch einen Scherenschnitt abgetrennt (s. Abb. 4-2).

Die Formwerkzeuge bestehen in der Regel aus Stempel, Form und Niederhalterring (s. Abb. 4-3). Bei sogenannten frei gepreßten Glasartikeln wird kein Niederhalterring verwendet, die Kavität ist in diesem Fall nach oben nicht begrenzt. Die Form kann je nach geometrischer Komplexität mehrteilig sein und Schieber aufweisen. Der Stempel

wird in der Regel konvektiv gekühlt, Form und Ring können mit einer Kühlung versehen sein.

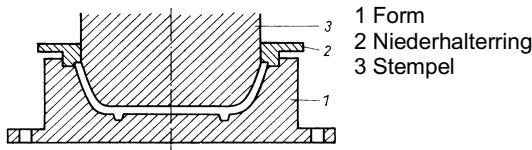


Abb. 4-3: Beispielhafte Darstellung eines Preßwerkzeuges für eine Glasschale (Richter u. a. (1987, S. 192)).

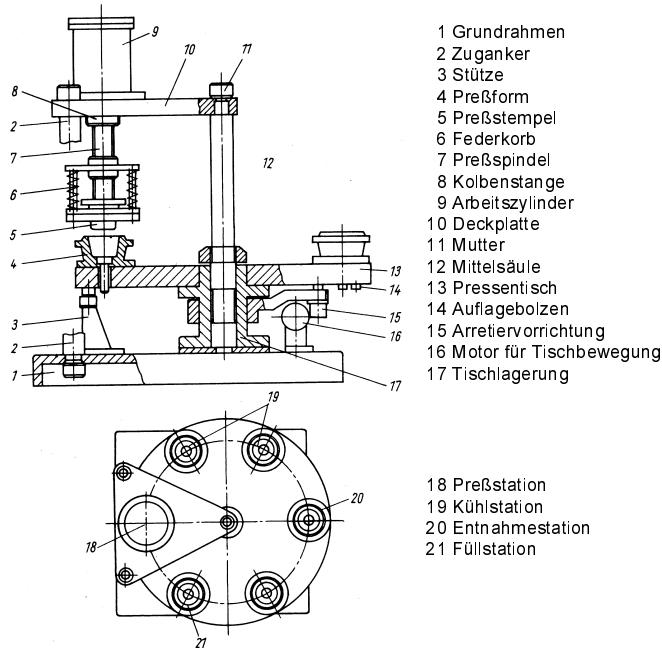


Abb. 4-4: Darstellung einer Glaspreßanlage mit sechs Stationen (Schumann & Schnier 1980, S. 207).

An industriellen Glaspreßanlagen sind mehrere Formen auf einen getakteten Rundtisch montiert. Dort werden die einzelnen Prozeßschritte (Beladen, Pressen, Kühlen, Ent-

nahme) als Stationen realisiert. Daraus ergibt sich, daß unabhängig von der Anzahl der Formen lediglich ein Preßstempel existiert (s. Abb. 4-4). Je nach Produktkomplexität erzeugen übliche Preßanlagen zwischen 2 und 30 Artikel pro Minute. Statt einer Rundtisch-Anlage ist auch eine Reihenbauweise denkbar, wie sie für Preß-Blas-Prozesse existiert. Tatsächlich findet man in der Glasindustrie für das Glaspressen fast ausschließlich die Rundtischbauweise.

4.1.3 Verwendete Werkstoffe

Als Materialien für die Herstellung der Formwerkzeuge werden hauptsächlich Stahlwerkstoffe verwendet. Dabei kommen hochlegierte CrNi-Stähle, Einsatz- oder Qualitätsstähle und Gußstähle zum Einsatz.

Glas als Produktwerkstoff ist besonders gekennzeichnet durch seine amorphe Molekülstruktur. Bei der thermischen Erstarrung des Glases findet keine Kristallisation statt. Glas erstarrt über einen je nach Glasart mehr oder weniger breiten Temperaturbereich, innerhalb dessen seine Zähigkeit mit fallender Temperatur zunimmt. Bei der amorphen Erstarrung wird im Gegensatz zur kristallinen keine latente Wärme frei. Der Zustand des amorphen Festkörpers gilt thermodynamisch betrachtet als metastabil, da die ungeordnet vorliegenden Moleküle gegenüber einer Gitteranordnung, wie sie in einem Kristall vorliegt, ein höheres Energieniveau besitzen.

4.2 Aufgabenstellung

Die Struktur eines glasproduzierenden Betriebs ist gekennzeichnet von zentralen Schmelzöfen, von denen aus in der Regel mehrere Produktionsstraßen gespeist werden. Der Schmelzprozeß verläuft aus technischen und wirtschaftlichen Gründen kontinuierlich. Der um die Schmelzöfen verfügbare Raum wird vollständig für direkt wertschöpfende Tätigkeiten genutzt. Produktionstechnische Versuchsanlagen existieren in den Betrieben zumeist nicht. Dies gilt unabhängig von der Größe des glasproduzierenden Betriebs.

Die Einführung neuer Produkte, bspw. als Reaktion auf veränderte Marktanforderungen, führt zwangsläufig zu neuen Formwerkzeugen. Diese sind aufgrund der Sensibilität des Werkstoffes Glas für Veränderungen in den thermischen Verhältnissen der Formwerkzeuge nicht sofort für die Produktion einsatzfähig, sondern müssen zunächst in einem sogenannten Bemusterungsprozeß getestet werden. In Ermangelung produktionstechnischer Versuchsanlagen wird die Bemusterung derzeit vollständig auf den Produktionsanlagen durchgeführt. Im Falle des Glaspressens besteht eine Bemusterung durchschnittlich aus 3 Phasen zu je 3h, d. h. insgesamt 9h. Während dieser Zeit wird die Produktion erheblich eingeschränkt, da die Bemusterung Variationen der Maschinenparameter und Veränderungen der Formwerkzeuggeometrie beinhaltet. Durch Bemusterungen werden laufend zusätzliche Kosten erzeugt.

Mit Hilfe eines Prozeßprototypen soll die Bemusterung eines Glaspreßprozesses von der Produktionsanlage auf eine Versuchs- bzw. Modellanlage verlagert werden. Dadurch könnte die Produktionsanlage vom Versuchsbetrieb entlastet und statt dessen wertschöpfend eingesetzt werden.

4.3 Erarbeitung einer dimensionslosen Prozeßdarstellung

Die notwendigen Schritte bei der Erstellung einer dimensionslosen Prozeßdarstellung wurden in ihrer natürlichen Ablauffolge bereits in Kap. 3.1 aufgezeigt. Die Schritte werden nun am Anwendungsbeispiel Glaspressen ausgeführt.

4.3.1 Aufstellen einer Relevanzliste

In Kap. 4.1.1 wurde der Ablauf des Preßprozesses bereits dargestellt. Abb. 4-5 zeigt die Aktionen und Zustände des industriellen Preßprozesses im Überblick.

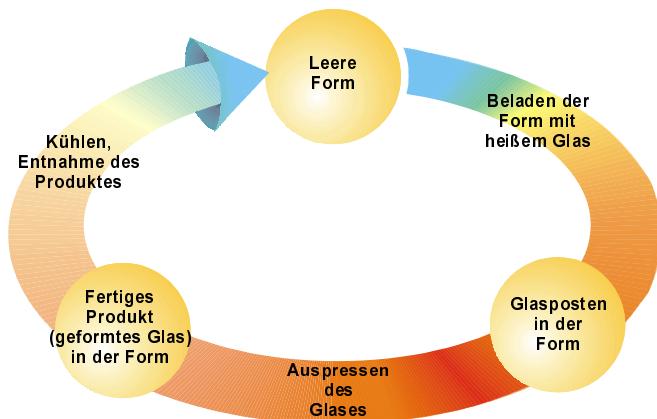


Abb. 4-5: Prozeßaktionen und -zustände während eines Glaspreßzyklus

Ein detaillierterer Blick auf den eigentlichen Preßvorgang ermöglicht eine erste Identifikation von relevanten physikalischen Größen und Vorgängen. Abb. 4-6 zeigt zwei Zustände einer Preßstation.

Als frei aber sinnvoll zu wählende charakteristische geometrische Größe wird eine Abmessung der Form gewählt, in diesem Fall der Durchmesser der Preßform.

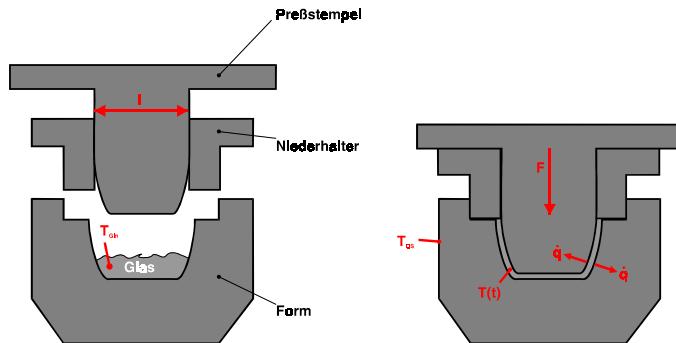


Abb. 4-6: Ein erster Überblick über relevante physikalische Größen und Vorgänge beim Glaspressen.

Relevante Werkstoffe des Prozesses sind die Materialien der formgebenden Werkzeuge und das Glas selbst. Das Glas fließt viskos in die von den Formwerkzeugen bereitgestellte Kavität und gibt dabei Wärme an die Werkzeuge ab. Mit der Wärmeabgabe erhöht sich die Viskosität des Glases. Entscheidende physikalische Vorgänge mit Beteiligung des Glases sind demnach thermo-viskoses Fließen sowie Wärmeleitung. Die formgebenden Werkzeuge nehmen die vom Glas abgegebene Wärme auf und geben sie an die Umgebung ab. Für die Werkzeuge ist Wärmeleitung der einzige relevante physikalische Vorgang.

Das thermo-viskose Fließverhalten des Glases wird durch eine Funktion $\eta(T)$ dargestellt. Die Viskosität des Glases ändert sich während des Preßvorganges um mindestens drei Größenordnungen (Reinhart und Trossin 1998). Von allen prozeßrelevanten Größen ist die Viskosität damit die am stärksten veränderliche. Bei einer Änderung um drei Größenordnungen muß die Viskosität als variable Stoffgröße betrachtet werden. Nach Pawłowski (1991) müssen dazu eine beliebige Bezugstemperatur T_0 , die Viskosität des Glases bei dieser Temperatur $\eta_0 = \eta(T_0)$ und die Temperatursensitivität γ_0 bei der Bezugstemperatur in die Relevanzliste aufgenommen werden (s. Kap. 3.2.2). Außer der Viskosität des Glases werden alle anderen Werkstoffwerte als konstant aufgefaßt.

Die Wärmeleitung von Glas und Form werden durch dieselbe Gleichung beschrieben. Aus versuchstechnischer Sicht ist dabei die zeitabhängige Ausbreitung des instationären Temperaturfeldes in der Form und im Glas interessant. Aus diesem Grund wird zur Beschreibung der Wärmeleitung in den Materialien die Fourier-Gleichung (Mayinger 1990, S. 374) herangezogen. Für die Ermittlung relevanter Parameter genügt eine eindimensionale Betrachtung:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{Gl. 10}$$

Aus Gl. 10 werden die Temperatur T , die Zeit t und die stoffabhängigen Größen Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und spezifische Wärme c_p als prozeßrelevante Größen offensichtlich. Die geometrische Größe x wurde bereits zuvor durch die Definition einer charakteristischen Länge berücksichtigt. Im Falle der Temperatur ist es aus mathematischer Sicht im Hinblick auf die spätere Ähnlichkeitstheoretische Behandlung des thermo-viskosen Stoffverhaltens günstiger, statt der absoluten Temperaturen die Temperaturdifferenzen zur Bezugstemperatur T_0 in die Relevanzliste aufzunehmen:

$$\Theta_x = T_x - T_0 \quad \text{Gl. 11}$$

Dies gilt für alle folgenden prozeßrelevanten Temperaturen. Damit stehen die relevanten Stoffgrößen fest. Hinsichtlich ihrer Funktion beschreiben die Stoffwerte η_0 , γ_0 , λ_i , ρ_i und c_{pi} , (mit $i = \text{Glas, Formwerkzeug}$), die im Prozeß verwendeten Werkstoffe vollständig. Hinzu kommt die Bezugstemperatur T_0 aus der Behandlung variabler Stoffgrößen. Die Größen T , bzw. Θ und t werden als prozedurale Größen den Prozeßgrößen zugerechnet.

Als Prozeßgrößen wurden die Zeit und die Temperatur bereits identifiziert. Aufgrund der instationären Betrachtung der Wärmeleitung ist die Temperatur eine orts- und zeitveränderliche Größe $T(x, t)$, bzw $\Theta(x, t)$, analog zu Gl. 11. Zur Berücksichtigung der Zeit wird analog zur Geometrie eine charakteristische Prozeßzeit, etwa die Preßdauer herangezogen.

Wie man in Abb. 4-6 erkennt, spielt beim Glaspressen selbstverständlich die Preßkraft eine Rolle. Da bereits eine charakteristische Länge in der Relevanzliste enthalten ist, ist es aus mathematisch-physikalischer Sicht egal, ob die Preßkraft F oder der Preßdruck p in die Relevanzliste aufgenommen werden, da Kraft, Druck und Länge voneinander linear abhängig sind.

Daneben sind für die Prozeßbetrachtung sinnvolle Randbedingungen zu definieren. Für das Glaspressen ist das zum einen die Einlegetemperatur T_{ein} des Glases beim Befüllen der Form. Darüber hinaus stellt die Außentemperatur T_a der Form eine Randbedingung dar. *Trier (1955)* hat mit seinen Temperaturmessungen gezeigt, daß die Außen-temperatur der Form konstant bleibt. Die äußere Oberfläche der Form kann deshalb als Systemgrenze und ihre Temperatur als Randbedingung betrachtet werden.

Als Prozeßgrößen wurden demnach eine charakteristische Zeit Δt , der Preßdruck p , die Temperatur $\Theta(x, t)$ im Glas und in den Werkzeugen sowie die Randbedingungen Θ_{ein} (Einlegetemperatur des Glases) und Θ_a (Außentemperatur der Form) identifiziert und zur Relevanzliste hinzugefügt.

Bisher unberücksichtigt blieb der Einfluß der Strahlung während des Pressens. Der Strahlungsanteil an der Wärmeübertragung während des Pressens wird durch die sogenannte effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} erfaßt. Diese besteht aus zwei additiven Anteilen, einer reinen Wärmeleitung und einer Strahlungswärmeleitung. Die Strahlungswärmeleitung selbst ist temperaturabhängig. *Scholze (1991, S. 362)* erklärt, daß die Strahlungsleitfähigkeit und damit die Strahlung als wärmeübertragender Mechanismus ab einer Temperatur von etwa 700 K oder höher bestimmend wird. Damit liegt der

Temperaturbereich des Glases bei der Preßverarbeitung im strahlungsrelevanten Bereich. Eine detailliertere Berücksichtigung der Strahlungsvorgänge erscheint dennoch nicht notwendig. Dies erklärt Zarzycki in einer Abhandlung über Gläser und amorphe Werkstoffe: „*Radiation does, however, play ... a negligible role in a typical glass no more than a few millimeters thick being rapidly cooled or heated*“ (Zarzycki 1991, S. 28). Genau diese hier beschriebenen Umstände einer Wandstärke im Millimeterbereich sowie einer schnellen Abkühlung treffen für industriell erzeugte Preßglasartikel zu.

Universelle Konstanten sind beim Glaspressen nicht zu berücksichtigen. Es kommt ohnehin nur die Gravitationskonstante g als mögliche Einflußgröße in Frage. Überträgt man den Vorgang in einem Gedankenexperiment bspw. in den schwerelosen Raum, so würde sich am Prozeßverlauf unter den veränderten Umständen nur die eventuell einsetzende natürliche Konvektion ändern. Eine natürliche Konvektion ist beim Glaspressen jedoch aus mehreren Gründen nicht zu erwarten: nach Scholze (1991, S. 160) findet Glaspressen in einem Viskositätsbereich von ca. 10^6 bis 10^9 dPas statt. Aus dem Umfeld industrieller Anwender wird der Viskositätsbereich teilweise bis zu einer Viskosität von 10^4 dPas ausgedehnt. Es sind daher sehr große Auftriebskräfte nötig, um ein Fließen des heißen Glases selbst bei 10^4 dPas zu erreichen. Im Vergleich dazu: Olivenöl besitzt bei Raumtemperatur eine Viskosität von weniger als 10^2 dPas (Kuchling 1994, S. 611). Selbst wenn konvektives Fließen einsetzen würde, steht für Konvektionseinflüsse nur die Dauer des Preßvorganges zur Verfügung. Aus eigenen Messungen ergeben sich dafür Zeiten im Bereich von einer bis drei Sekunden. In dieser kurzen Zeit vermögen Auftriebskräfte eine hochzähe Flüssigkeit kaum merklich zu verschieben. Natürliche Konvektion tritt deshalb sicher nicht in signifikanter Weise auf und die Gravitationskonstante ist deshalb nicht prozeßrelevant.

Nach Abschluß der Prozeßbetrachtung kann mit Blick auf die thermischen Stoffwerte von Glas und Formwerkstoffen folgende Reduktion getroffen werden: Die Größen λ , ρ und c_p treten bei der gesamten Prozeßbetrachtung nur in der in Gl. 10 dargestellten Kombination auf. Sie können deshalb ohne Informationsverlust zur Temperaturleitfähigkeit a zusammengefaßt und als ein Parameter betrachtet werden.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad \text{Gl. 12}$$

Die folgende Tabelle faßt die ermittelten prozeßrelevanten physikalischen Größen des Glaspressens im Überblick zusammen:

Relevante physikalische Größen	Bedeutung
l	Charakteristische Länge
Δt	Charakteristische Zeit
T_0	Bezugstemperatur für die Betrachtung des thermo-viskosen Stoffverhaltens von Glas
η_0	Viskosität des Glases bei T_0
γ_0	Temperatursensibilität der Viskosität des Glases bei T_0
$a_{\text{Glas/Form}}$	Temperaturleitfähigkeit des Glases und der Formwerkstoffe
p	Preßdruck
$\Theta(x, t)$	Temperatur der Werkstoffe als Funktion des Ortes und der Zeit
Θ_{ein}	Einlegetemperatur des Glases in die Form
Θ_a	Konstante Außentemperatur der Formwerkzeuge

Tabelle 4-1: Relevanzliste des Glaspressens.

4.3.2 Herleitung dimensionsloser Kennzahlen

Ausgehend von der Relevanzliste, die im Kap. 4.3.1 entwickelt wurde, wird nun eine Dimensionsmatrix aufgestellt. Die Dimensionsmatrix wird mit Hilfe des Gauß-Algorithmus umgeformt und so in eine Einheits- und eine Restmatrix aufgeteilt. Aus den Inhalten von Einheits- und Restmatrix ergibt sich direkt ein erster Satz dimensionsloser Kennzahlen.

Vor dem Aufstellen der Dimensionsmatrix sind Überlegungen zur geeigneten Aufteilung der Größen der Relevanzliste auf die Spalten der Einheitsmatrix notwendig. Als thermo-mechanischer Vorgang werden alle relevanten Größen als Potenzprodukt der vier Basisdimensionen Länge L , Zeit T , Masse M und Temperatur Θ beschrieben. Der Freiheitsgrad der ähnlichkeittheoretischen Modellbildung beträgt deshalb in diesem Fall vier. Die ersten vier Spalten der Dimensionsmatrix sind deshalb gemäß Kap. 3.1.2 mit Größen zu belegen, die im Modellprozeß die Durchführbarkeit von Experimenten erleichtern. Es ist bei der erklärten Absicht, die Prozeßtemperaturen im Modell zu senken, offensichtlich, daß das Original-Glas im Modell keine Verwendung finden

kann. Folglich muß es durch eine andere, bei niedrigeren Temperaturen schmelzende¹ Substanz ersetzt werden. Um dies zu ermöglichen, müssen die Freiheitsgrade der Modellierung auf die Größen verwendet werden, die das Glas in seiner Funktion innerhalb des Prozesses beschreiben. Dies sind die Größen T_0 , η_0 , γ_0 und a_{Glas} . Da T_0 und γ_0 jedoch dimensionstechnisch voneinander linear abhängig sind, kann nur eine dieser Größen in den Bereich der Einheitsmatrix aufgenommen werden. Dies ist γ_0 , da diese Größe eine echte Werkstoffeigenschaft beschreibt, während T_0 lediglich eine zwar festgelegte aber grundsätzlich frei wählbare Bezuggröße darstellt. Damit bleibt ein Freiheitsgrad zu besetzen. Dieser wird zur Einstellung der geometrischen Dimensionen verwendet. Die charakteristische Länge l rückt damit als vierte und letzte Größe in den Bereich der Einheitsmatrix der Dimensionsmatrix.

Die Dimensionsmatrix sieht damit wie folgt aus:

	1	η_0	a_{Glas}	γ_0	a_{Form}	Δt	p	T_0	Θ_x
L	1	-1	2	0	2	0	-1	0	0
M	0	1	0	0	0	0	1	0	0
T	0	-1	-1	0	-1	1	-2	0	0
Θ	0	0	0	-1	0	0	0	1	1

Tabelle 4-2: Dimensionsmatrix der Relevanzliste für das Glaspressen

Nach dem Umformen mit dem Gaußalgorithmus erhält die Dimensionsmatrix folgende Gestalt:

	1	η_0	a_{Glas}	γ_0	a_{Form}	Δt	p	T_0	Θ_x
L+3M+2T	1	0	0	0	0	2	-2	0	0
M	0	1	0	0	0	0	1	0	0
-M-T	0	0	1	0	1	-1	1	0	0
- Θ	0	0	0	1	0	0	0	-1	-1
Einheitsmatrix					Restmatrix				

Tabelle 4-3: Einheits- und Restmatrix aus der Dimensionsmatrix in Tabelle 4-2

Aus Tabelle 4-3 lassen sich nun direkt dimensionslose Kennzahlen ableiten. Diese sind:

$$\Pi_1 = \frac{a_{\text{Form}}}{a_{\text{Glas}}} \quad \text{Gl. 13}$$

¹ Es ist aus Gründen der molekularen Struktur der Gläser wissenschaftlich nicht korrekt, das Verflüssigen von Glas als Schmelzvorgang zu bezeichnen. Trotzdem hat sich in der Literatur der Begriff des „Schmelzens“ von Glas eingebürgert. Er wird deshalb auch in dieser Arbeit verwendet.

$$\Pi_2 = \frac{a_{\text{Glas}} \cdot \Delta t}{l^2} \quad \text{Gl. 14}$$

$$\Pi_3 = \frac{p \cdot l^2}{\eta_0 \cdot a_{\text{Glas}}} \quad \text{Gl. 15}$$

$$\Pi_4 = T_0 \cdot \gamma_0 \quad \text{Gl. 16}$$

$$\Pi_5 = \Theta \cdot \gamma_0 \quad \text{Gl. 17}$$

$$\Pi_6 = \Theta_{\text{ein}} \cdot \gamma_0 \quad \text{Gl. 18}$$

$$\Pi_7 = \Theta_a \cdot \gamma_0 \quad \text{Gl. 19}$$

4.3.3 Diskussion des Kennzahlensatzes

Der im vorhergehenden Kapitel hergeleitete Satz dimensionsloser Kennzahlen wird nun kurz diskutiert. Dabei geht es einerseits um eine Interpretation der erhaltenen Kennzahlen, andererseits um Möglichkeiten einer eventuellen Vereinfachung des Kennzahlensatzes.

Die Kennzahl Π_1 beinhaltet das Verhältnis der Temperaturleitfähigkeiten des Glases und der Formwerkstoffe. Diese Kennzahl stellt die thermische Wechselwirkung zwischen Glas und Formwerkzeugen hinsichtlich der sich ausbreitenden Temperaturfelder dar. Sie gewinnt an Aussagefähigkeit in Zusammenhang mit der folgenden Kennzahl Π_2 . Die Kennzahl Π_2 ist die Fourier-Zahl und damit eine Standard-Kennzahl. In der Literatur wird sie häufig als dimensionslose Zeit in der Wärmeübertragung interpretiert. Sie beschreibt den zeitlichen Verlauf eines instationären Temperaturfeldes. Bei Prozessen mit der gleichen Fourier-Zahl sind die Temperaturfelder zu korrespondierenden Zeiten ineinander überführbar (*Mayinger 1990, S. 380 ff.*). Die Kennzahl Π_1 gewährleistet in Verbindung mit Π_2 , daß die Fourier-Zahl nicht nur für das Glas, sondern auch für die Formwerkzeuge berücksichtigt wird. Dies lässt sich leicht aus dem Produkt $\Pi_1 \cdot \Pi_2$ erkennen.

Die Kennzahl Π_3 ist die am schwierigsten zu interpretierende Größe des Satzes dimensionsloser Kennzahlen. Die Aussagekraft dieser Kennzahl wird jedoch deutlich erhöht, wenn sie mit $v^2 \rho$ erweitert wird. Dabei ist v die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Glases in der Form während des Pressens. Dies führt zu:

$$\tilde{\Pi}_3 = \frac{p \cdot l^2 \cdot v^2 \cdot \rho}{\eta_0 \cdot a_{\text{Glas}} \cdot v^2 \cdot \rho} \quad \text{Gl. 20}$$

$\tilde{\Pi}_3$ lässt sich trennen in:

$$\tilde{\Pi}_3 = \frac{v \cdot l}{a_{\text{Glas}}} \cdot \frac{p}{v^2 \cdot \rho} \cdot \frac{l \cdot v \cdot \rho}{\eta} \Leftrightarrow Pe \cdot Eu \cdot Re \quad \text{Gl. 21}$$

Folglich läßt sich die Kennzahl Π_3 als Produkt dreier Standard-Kennzahlen darstellen. Diese sind die Péclet-Zahl, die Euler-Zahl und die Reynolds-Zahl. Die Péclet-Zahl ist eine wichtige Größe der Wärmeleitung, sie bezeichnet das Verhältnis der konvektiv zur konduktiv transportierten Wärmemenge. Die Euler-Zahl und die Reynolds-Zahl sind Größen zur Strömungsbeschreibung. Die Eulerzahl bezeichnet das Verhältnis von Druckkraft zu Trägheitskraft, die Reynoldszahl das Verhältnis von Trägheitskraft zu Zähigkeitskraft in Strömungen (Lenk 1989). Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Kennzahl Π_3 die Strömung des Glases in der Form sowohl thermisch als auch mechanisch beschreibt.

Die Kennzahl Π_4 ist die sogenannte Arrhenius-Zahl. Sie gibt das Verhältnis von Aktivierungstemperatur zu Bezugstemperatur an. Gemeint ist dabei die Aktivierungstemperatur bezüglich des viskosen Fließens. Die Arrhenius-Zahl ist die einzige dimensionslose Kennzahl, die ausschließlich Größen des für eine dimensionslose Darstellung des thermo-viskosen Stoffverhaltens von Glas gewählten Bezugspunktes enthält. Alle weiteren Kennzahlen Π_5 bis Π_7 können als entartete Arrheniuszahlen, bzw. als dimensionslose Temperaturen aufgefaßt werden.

Die Diskussion der Kennzahlen zeigt, daß eine weitere Reduzierung des erhaltenen Satzes nicht möglich ist. Eine gewisse Reduzierung wurde a priori durch die Einführung der Temperaturleitfähigkeit erreicht. Vor allem die Kennzahl Π_3 beweist, daß der Kennzahlensatz bereits verdichtet ist. Hätte man beispielsweise die Strömungsgeschwindigkeit des Glases in der Form als relevant erachtet, könnte man nun die so erhaltenen Kennzahlen zu Π_3 zusammenfassen. Die Strömung wird jedoch als durchgehend nicht-turbulent betrachtet (s. Kap. 4.3.1, „freie Konvektion“), was gegen die Relevanz der Strömungsgeschwindigkeit spricht.

Der Kennzahlensatz gem. Gl. 13 bis Gl. 19 stellt somit bis zu einer eventuellen Widerlegung durch Experimentergebnisse einen vollständigen Satz dimensionsloser Kennzahlen zur Beschreibung des Glaspressens dar. Als solcher bildet er die weitere Arbeitsgrundlage.

4.4 Aufstellen der Maßstabsgleichungen

Als letzter Arbeitsschritt auf abstrakter Ebene, d. h. ohne einen einzelnen Prozeß in concreto zu betrachten, können durch Anwendung der idem-Bedingung (s. Kap. 3.1.3) Maßstabsgleichungen hergeleitet werden. Dazu werden die Kennzahlen Π_1 bis Π_5 herangezogen. Die Kennzahlen Π_6 und Π_7 stellen als Randbedingungen lediglich festgelegte Werte der Kennzahl Π_5 dar und sind in ihr somit bereits enthalten. Die Werte derjenigen Größen, die die Spalten der Einheitsmatrix bilden sind als Freiheitsgrade der Modellierung frei wählbar. Unter der Voraussetzung, daß ein Originalprozeß quantitativ bekannt ist, ergibt sich dadurch folgendes Bild (Index M: Modell, Index O: Original):

$M^l, M\eta_0, Ma_{Glas}, M\gamma_0$ werden frei gewählt.

Aus der idem-Bedingung für Π_1 ergibt sich das Material für die Formwerkzeuge des Modellprozesses:

$$\Pi_1 = \text{idem} \Rightarrow_M \Pi_1 =_O \Pi_1 \Leftrightarrow \left(\frac{a_{Form}}{a_{Glas}} \right)_M = \left(\frac{a_{Form}}{a_{Glas}} \right)_O \Leftrightarrow_M a_{Form} =_O a_{Form} \cdot \frac{M a_{Glas}}{O a_{Glas}} \quad \text{Gl. 22}$$

Damit ist ein Formwerkstoff im Modellprozeß abhängig vom entsprechenden Formwerkstoff im Originalprozeß sowie vom thermischen Verhältnis zwischen Original- und Modellglas determiniert. Mit der Auswahl und Festlegung eines Modellglases stehen auch die Werkstoffe für die formgebenden Werkzeuge fest.

Analog dazu läßt sich aus Π_2 ein Zeitmaßstab für den Modellprozeß ableiten:

$$\Pi_2 = \text{idem} \Rightarrow \left(\frac{a_{Glas} \cdot \Delta t}{l^2} \right)_M = \left(\frac{a_{Glas} \cdot \Delta t}{l^2} \right)_O \Leftrightarrow_M \Delta t =_O \Delta t \cdot \left(\frac{O a_{Glas}}{M a_{Glas}} \right) \cdot \left(\frac{M l}{O l} \right)^2 \quad \text{Gl. 23}$$

Der Maßstab der Zeitspannen, nach denen sich instationäre Temperaturfelder entsprechen, ist abhängig von den Temperaturleitfähigkeiten und von den Flächen, durch die hindurch die Wärme geleitet werden muß.

Aus Π_3 ergibt sich ein Maßstab für den im Modell erforderlichen Preßdruck:

$$\Pi_3 = \text{idem} \Rightarrow \left(\frac{p \cdot l^2}{\eta_0 \cdot a_{Glas}} \right)_M = \left(\frac{p \cdot l^2}{\eta_0 \cdot a_{Glas}} \right)_O \Leftrightarrow_M p =_O p \cdot \left(\frac{M \eta_0}{O \eta_0} \right) \cdot \left(\frac{M a_{Glas}}{O a_{Glas}} \right) \cdot \left(\frac{O l}{M l} \right)^2 \quad \text{Gl. 24}$$

Der Maßstab des Preßdrucks entspricht dem reziproken Zeitmaßstab, erweitert um das Verhältnis der Bezugsviskositäten der verwendeten Gläser im Original- und im Modellprozeß. Das Auftauchen des inversen Zeitmaßstabes im Kraftmaßstab ist durch den Einfluß der Péclet-Zahl zu begründen. Anschaulich-qualitativ führt etwa eine schlechtere Temperaturleitung aufgrund der Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur zu einer langsameren Erstarrung ($M\Delta t > O\Delta t$). Diese verlangsamte Erstarrung muß logischerweise, gleiche Bezugsviskositäten in Original- und Modellprozeß vorausgesetzt, durch einen niedrigeren Preßdruck ausgeglichen werden, wenn man erreichen will, daß sich nicht nur die thermischen sondern auch die mechanischen Zustände in Modell und Original entsprechen. Dies erscheint plausibel, wie ein Gedankenexperiment illustriert: Es sei η_0 die Viskosität des Glases beim Einlegen in die Form. Würde man nun im Modell gleicher Einlegeviskosität aber bei langsamerer Erstarrung des Modellglases den gleichen Preßdruck wie im Originalprozeß applizieren, würde der Modellpreßprozeß zu schnell ablaufen. Das Modellglas bliebe länger in einem niedrigeren Viskositätsbereich und würde dem Preßstempel somit weniger Kraft entgegensetzen als das Originalglas. Der Modellpreßprozeß würde dadurch gegenüber dem Originalprozeß beschleunigt. Mechanischer und thermischer Zeitmaßstab würden nicht mehr übereinstimmen.

Aus der dimensionslosen Kennzahl Π_5 ergibt sich der viskose Temperaturmaßstab der Modellanlage:

$$\Pi_5 = \text{idem} \Rightarrow {}_M(\Theta \cdot \gamma_0) = {}_O(\Theta \cdot \gamma_0) \Leftrightarrow {}_M\Theta = {}_O\Theta \cdot \left(\frac{{}_O\gamma_0}{{}_M\gamma_0} \right) \quad \text{Gl. 25}$$

Gl. 25 wird deshalb als viskoser Temperaturmaßstab bezeichnet, da sie beschreibt, wie Temperaturen zwischen Original- und Modellprozeß umgerechnet werden müssen, damit zu gleichen dimensionslosen Zeiten auch gleiche dimensionslose Viskositäten im Glas vorliegen. Tatsächlich hängt der Temperaturmaßstab nicht von den Viskositäten der Gläser, sondern von den temperaturleitenden Eigenschaften der verwendeten Formwerkzeuge und Gläser ab. Sie bestimmen die eigentlich auftretenden Temperaturen. Es wird zur Beschreibung der tatsächlich auftretenden Temperatur eine sogenannte effektive dimensionslose Temperatur Ξ gebildet:

$$\Xi = \frac{T - T_B}{T_A - T_B} \quad \text{Gl. 26}$$

Die Temperaturen T_A und T_B sind dabei Temperatur-Konstanten, die zu gleichen Zeiten an gleichen Orten bestimmt werden. Dies muß für Modell- und Originalprozeß geschehen. Idealerweise verwendet man als Konstanten T_A und T_B leicht reproduzierbare, wenig schwankende Temperaturen.

Es ist leicht zu sehen, daß mit Ξ aus Gl. 26 die Fourier-Gleichung der Wärmeleitung (Gl. 10) in eine für Modell- und Originalprozeß identische dimensionslose Fourier-Gleichung übergeführt wird, die bei Einhalten der Ähnlichkeitsbedingungen auch für Modell- und Originalprozeß identische Lösungen produziert:

$$\frac{\partial \Xi}{\partial \text{Fo}} = \frac{\partial^2 \Xi}{\partial \zeta^2} \quad \text{mit } \zeta = \frac{x}{l} \quad \text{Gl. 27}$$

ζ ist in Gl. 27 der Quotient aus der Koordinate x und einer charakteristischen Länge l . Somit ergibt sich aus Gl. 26 als effektiver bzw. tatsächlicher Temperaturmaßstab:

$${}^M T = \frac{({}^M T_A - {}^M T_B)}{({}^O T_A - {}^O T_B)} \cdot ({}^O T - {}^O T_B) + {}^M T_B \quad \text{Gl. 28}$$

Mit dem Modell sind zwei verschiedene Temperaturmaßstäbe verbunden. Dabei ist eine korrekte Ähnlichkeitstheoretische Darstellung der amorphen Erstarrung nur gewährleistet, wenn der viskose und der effektive Temperaturmaßstab in dem für das viskose Fließen des Glases relevanten Temperaturbereich übereinstimmende Ergebnisse liefern. Dies kann abschätzungsweise erfolgen, sobald die Parameter der Prozesse quantifiziert sind. Setzt man für Original- und Modellprozeß T_A gleich der Einlegetemperatur des Glases/Modellstoffs und $T_B = T_0$, wobei T_0 am unteren Ende des viskosen Erstarrungsprozesses gewählt werden sollte, ist die Identität beider Temperaturmaßstäbe gewährleistet, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{{}^O\gamma_0}{{}^M\gamma_0} = \frac{({}^M T_A - {}^M T_B)}{({}^O T_A - {}^O T_B)} \quad \text{Gl. 29}$$

Abschließend lassen sich die hergeleiteten Maßstabsgleichungen angeben:

Geometriemaßstab	1
	η_0
Wahl des Glas-Modellstoffs	γ_0
	a_{Glas}
Bestimmung der Modell-Formwerkstoffe	$M a_{Form} = O a_{Form} \cdot \frac{M a_{Glas}}{O a_{Glas}}$
Zeitmaßstab	$M \Delta t = O \Delta t \cdot \left(\frac{O a_{Glas}}{M a_{Glas}} \right) \cdot \left(\frac{M l}{O l} \right)^2$
Kraftmaßstab	$M p = O p \cdot \left(\frac{M \eta_0}{O \eta_0} \right) \cdot \left(\frac{M a_{Glas}}{O a_{Glas}} \right) \cdot \left(\frac{O l}{M l} \right)^2$
tatsächlicher Temperaturmaßstab	$M T = \frac{(M T_A - M T_B)}{(O T_A - O T_B)} \cdot (O T - O T_B) + M T_B$
viskoser Temperaturmaßstab	$M T = \left(\frac{O \gamma_0}{M \gamma_0} \right) \cdot (O T - O T_0) + M T_0$

Tabelle 4-4: Maßstabsgleichungen für das Glaspressen.

Mit der Darstellung der Maßstabsgleichungen ist der allgemeine ähnlichkeits-theoretische Teil der Beschreibung eines Glaspreßprozesses abgeschlossen. Wie aus Tabelle 4-4 ersichtlich ist, hängt die Quantifizierung der Maßstabsgleichungen stark vom gewählten Ersatzstoff für das Glas des Originalprozesses ab. Ein solcher Modellstoff kann jedoch nur für ein konkretes Glas aus einem Originalprozeß ermittelt werden. Dies ist auf allgemeingültiger Ebene nicht möglich.

5 Evaluierung: Aufbau einer Versuchsanlage

Nach den allgemeingültigen theoretischen Vorarbeiten, die das Glaspressen als Prozeßklasse betreffen, wird nun ein Ähnlichkeitstheoretisches Modell eines konkreten Prozesses abgeleitet.

5.1 Quantifizierung der Parameter

Die Betrachtung eines bestimmten Glaspreßprozesses führt zu einer Quantifizierung der prozeßrelevanten Parameter, da mit Auswahl eines Prozesses diese Parameter entweder bekannt oder bestimmbare sind.

Für diese Arbeit wurde ein industrieller Prozeß zur Herstellung einer Glasschale im Preßverfahren ausgewählt. Die Schale selbst hat einen Durchmesser von 125 mm sowie eine Höhe von 60 mm. Die für eine Schale aufgewendete Masse an Kalk-Natron-Glas beträgt 0,329 kg. Als Formwerkstoffe wurden verwendet:

- Form: 1.2787 (hochvergüteter CrNi-Stahl),
- Stempel: C15, gepanzert (mit Buntmetall-Coating)
- Ring: GGG 40

Der Preßvorgang wurde an einem Rundtakttisch mit 8 Arbeitsstationen eingerichtet. Die Zykluszeit des Prozesses beträgt 60 s. Die Beladung der Formen erfolgt mittels eines Kugelspeisers. Nach dem Beladen folgt das Pressen. Dabei beträgt die Netto-Preßzeit 3,25 s. Die Netto-Preßzeit ist der Zeitraum, innerhalb dessen der Preßstempel im direkten Berührkontakt mit dem Glas in der Form steht.

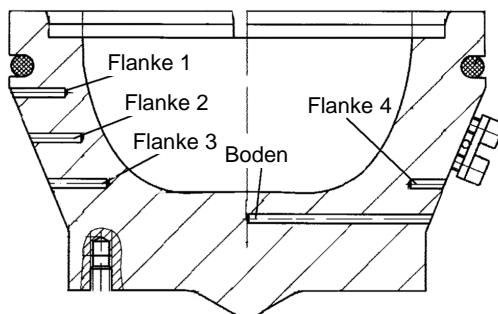


Abb. 5-1: Querschnitt der Form mit den Positionen der Meßpunkte.

Die Temperaturverteilung in der Form während des Pressens wurde durch periodisches Abfragen mehrerer lokal verteilter Temperaturmeßfühler bestimmt. Eine Verteilung der Meßfühler in den Formwerkzeugen zeigt Abb. 5-1.

Die an diesen Positionen gemessenen Temperaturen zeigt die in Abb. 5-2 dargestellte, beispielhaft ausgewählte Auswertung:

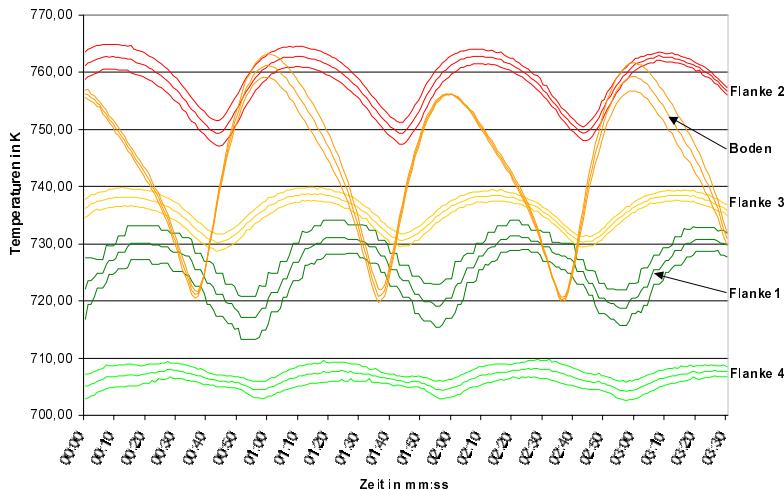


Abb. 5-2: Ergebnis der Temperaturmessungen in der Form. Dargestellt sind die Mittelwerte zzgl./abzgl. ihrer Standardabweichungen als Schwankungsbreite.

Die Temperaturleitfähigkeiten der Formwerkzeug-Materialien werden für eine mittlere Temperatur aus dem gemessenen Temperaturbereich angegeben. Außer der Viskosität des Glases werden alle Parameter als konstant angenommen. Dies trifft aufgrund der um Größenordnungen stärker ausgeprägten Variabilität der Viskosität des Glases näherungsweise zu. Ein Nachweis der Richtigkeit dieser Vereinfachung kann nur experimentell erfolgen.

Etwas problematisch ist die Ermittlung der Formaußentemperatur T_a . Die Ursache dafür ist die mangelhafte Möglichkeit, Temperaturfühler an der Außenfläche der Form zu applizieren. Zum anderen ist die Formaußenwand Einflüssen der Kühlluft ausgesetzt. Die Kühlluft wird zum Abkühlen des Glases in der Form nach dem Pressen eingesetzt. Sie gelangt jedoch ungerichtet auch an die Formaußenwände. Ein Indiz für die Zulässigkeit der Annahme einer konstanten Formaußentemperatur gibt jedoch der Temperaturverlauf in der Meßstelle Flanke 4. Diese Position liegt sehr nahe an der Außenwand und man erkennt in Abb. 5-2, daß die Temperaturschwankungen dort nur noch eine sehr kleine Amplitude besitzen. Man kann offensichtlich davon ausgehen, daß sich die Störungen des Temperaturprofils durch ungerichtete Kühlluft an der Außenseite nur wenige Millimeter ins Forminnere fortsetzen. Im Forminneren selbst wird der

Temperaturverlauf vom Belade- und Entnahmevergäng an der Form bestimmt. Die Formaußentemperatur T_a beträgt ca. 700 K.

Die prozeßrelevanten numerischen Werte der Parameter wurden in der laufenden Produktion ermittelt. Sie sind in Tabelle 5-1 zusammengestellt.

Parameter	Wert
1	0,125 m (Durchmesser der Schale)
Δt	3,25s (Dauer des Netto-Preßvorgangs)
T_0	1148 K (s. Kap. 5.2)
η_0	$1,121 \cdot 10^5$ dPas, $\eta(T)$ bekannt
γ_0	$-0,0249 \text{ K}^{-1}$
a_{Glas}	$8,95 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (bei T_0)
a_{Form}	$4,3761 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (bei 730 K)
a_{Stempel}	$8,1956 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (bei 685 K)
a_{Ring}	$6,86 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (bei 708 K)
p	$2,28 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ (Druck im Glas)
$\Theta(x, t)$	s. Abb. 5-2
Θ_{ein}	125 K
Θ_a	-448 K

Tabelle 5-1: Parameterwerte des betrachteten Originalprozesses.

5.2 Ermittlung eines Modellstoffes für Glas

Die Ermittlung eines Modellstoffes für das Originalglas beginnt mit der Betrachtung der charakteristischen Stoffwerte des Originalglases. Der Viskositäts-Temperatur-Zusammenhang des verwendeten Kalk-Natron-Glases ist bekannt. Der Ausschnitt der $\eta(T)$ -Funktion, der für das Pressen relevant ist, ist in Abb. 5-3 dargestellt. Dabei wurde die $\eta(T)$ -Funktion des Kalk-Natron-Glases durch die in der Glaswissenschaft dafür gebräuchliche Vogel-Fulcher-Tamman-Gleichung beschrieben. Diese lautet im konkreten Anwendungsfall:

$$\log(\eta) = -0,796 + \frac{3176,9}{T - 604,78 \text{ K}} \quad \text{Gl. 30}$$

Daneben wurde dieselbe Funktion durch eine bezugsinvariante Approximation angenähert:

$$\log(\eta) = 9,182 \cdot \left[1 - 0,834 \cdot \left(\frac{T - 923,15 \text{ K}}{-292,574 \text{ K}} \right) \right]^{-1,195} \quad \text{Gl. 31}$$

Die Parameter γ_0 und μ aus Gl. 4 bzw. Gl. 6 wurden durch das Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate so ermittelt, daß die bezugsinvariante Approximation die Vogel-Fulcher-Tamman-Gleichung (Gl. 30) im relevanten Temperaturbereich besonders gut nachbildet.

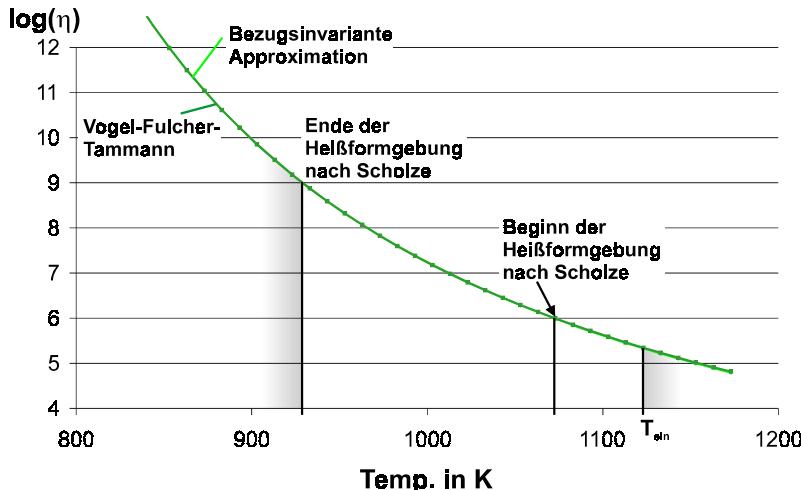


Abb. 5-3: Darstellung der $\eta(T)$ -Funktion des verwendeten Glases durch die Vogel-Fulcher-Tamman-Gleichung und durch eine bezugsinvariante Approximation im Viskositätsbereich der Heißformgebung.

Die Abb. 5-4 zeigt den relativen Unterschied der Werte aus Gl. 30 und Gl. 31.

Aus Abb. 5-3 und Abb. 5-4 geht hervor, daß das Temperatur-Viskositäts-Verhalten des betrachteten Glases im relevanten Temperaturbereich durch eine bezugsinvariante Approximation darstellbar ist. Da die bezugsinvariante Approximation für eine Ähnlichkeitstheoretische Diskussion geeigneter ist, wird nachfolgend die $\eta(T)$ -Funktion gemäß Gl. 31 verwendet. T_0 kann somit aus der Relevanzliste gestrichen werden. Alle Stoffeigenschaften des Glases sind frei wählbar. Darüber hinaus erkennt man in Abb. 5-3, daß der Einwand seitens der Industrie, daß der von Scholze angegebene Viskositätsbereich für die Heißformgebung von Glas über die 10^6 dPas hinaus zu niedrigeren Viskositäten hin ausgedehnt werden müsse, durch die Messungen bestätigt wird.

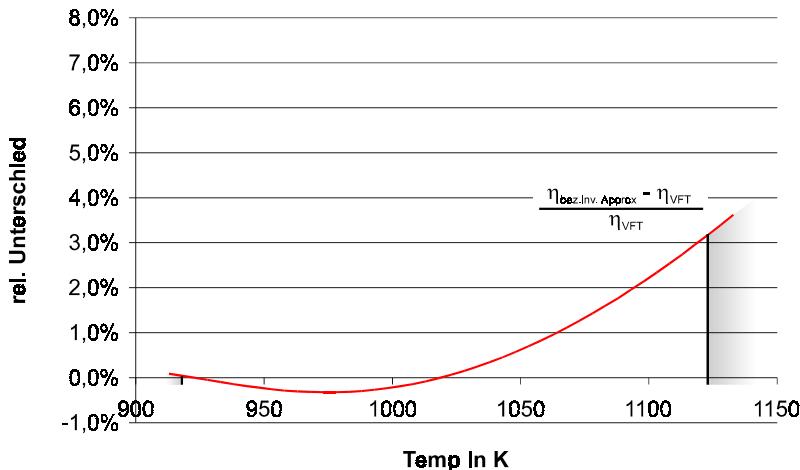


Abb. 5-4: Der rel. Unterschied zwischen den $\eta(T)$ -Beschreibungen nach Gl. 30 und Gl. 31 betragen im relevanten Temperaturbereich unter 3,5%; in weiten Bereichen sogar unter 1%.

Die Ermittlung von Akzeptanzbereichen der Parameter des Modellstoffes kann im vorliegenden Fall vereinfacht werden. Die Temperaturleitfähigkeit a des Modellstoffes beeinflußt den Zeit- und den Kraftmaßstab. Diese Größe beinhaltet jedoch hauptsächlich molekülstrukturabhängige Größen, wie z. B. Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärme. Die „Regel der gleichen Art“ läßt erwarten, daß der Ersatzstoff für das Originalglas wieder eine amorph erstarrende Substanz sein wird. Da in diesem Falle die molekularen Strukturen von Original- und Modellstoff sehr ähnlich sein werden, ist zu erwarten, daß sich Ma_{Glas} und oa_{Glas} nicht um Größenordnungen unterscheiden.

Aus den Zeit- und Kraftmaßstäben der Tabelle 4-4 geht hervor, daß eine Temperaturleitfähigkeit des Modellstoffes erwünscht ist, die gleich oder geringer als die des Originalglases ist. Dadurch wird, unter der Voraussetzung der Beibehaltung des geometrischen Originalmaßstabes, die charakteristische Prozeßzeit verlangsamt und der benötigte Preßdruck verringert.

Der frei wählbare Geometriemaßstab kann außerdem noch in engen Grenzen genutzt werden, um den Zeitmaßstab zu korrigieren. Aufgrund der Darstellbarkeit der $\eta(T)$ -Beziehung durch eine bezugsinvariante Gleichung kann der Wert T_0 und damit η_0 beliebig gewählt werden, da T_0 nicht mehr der Relevanzliste angehört. Dadurch kann der Kraftmaßstab nahezu unabhängig von den Temperaturleitfähigkeiten und dem Geometriemaßstab eingestellt werden. Aufgrund dieser weiteren Korrekturmöglichkeiten handelt es sich in Abb. 5-5 lediglich um eine schwache Bedingung für die Temperaturleitfähigkeit des Modellstoffes.

$$\begin{aligned}
 & M \Delta t = O \Delta t \cdot \left(\frac{o a_{\text{Glas}}}{M a_{\text{Glas}}} \right) \cdot \left(\frac{M l}{O l} \right)^2 \\
 & M a_{\text{Glas}} \leq O a_{\text{Glas}} \text{ günstig!} \\
 & M p = O p \cdot \left(\frac{M \eta_0}{O \eta_0} \right) \cdot \left(\frac{M a_{\text{Glas}}}{O a_{\text{Glas}}} \right) \cdot \left(\frac{O l}{M l} \right)^2
 \end{aligned}$$

Abb. 5-5: Ableiten eines Zielbereiches für die Temperaturleitfähigkeit des gesuchten Modellstoffes aus den Maßstabsgleichungen.

Als Bezugstemperatur T_0 für die Transformation der $\eta(T)$ -Funktion des Originalglases in die Standarddarstellung wurde eine Temperatur von 1148 K gewählt, da diese Temperatur zentral im relevanten Temperaturbereich liegt. Die Temperatur des Glaspottens beim Einlegen in die Form wurde mit optischen Meßverfahren zu $T_{\text{ein}}=1270$ K bestimmt.

Der Preßvorgang endet spätestens bei einer Viskosität von 10^9 dPas, dies ist der Fall bei 928 K. Das viskose Fließen des Glases endet jedoch schon deutlich früher, wenn der Stempel den unteren Totpunkt erreicht.

Das Einlegen des Glases in die Form führt je nach Produktgestalt zu einer heterogenen Anfangsverteilung des Glases. Diese lokale Verteilung des Glases in der Form beeinflußt das Ergebnis des Preßvorganges mit zunehmender Komplexität der Produktgestalt erheblich. Für ein geometrisch einfaches Produkt wie die hier betrachtete Schale spielt die Anfangsverteilung des Glases jedoch noch keine wesentliche Rolle.

Nach der „Regel der gleichen Art“ soll ein Modellstoff für das Glas möglichst in der gleichen Werkstofffamilie gesucht werden. Dies bedeutet im vorliegenden Fall, daß ein Ersatzwerkstoff zunächst unter den anorganischen, amorph erstarrenden Stoffen recherchiert wird. Im Gegensatz zum Originalglas sollte der Modellstoff allerdings den Viskositätsbereich 10^4 dPas bis 10^9 dPas in einem niedrigeren Temperaturbereich aufweisen.

Ein in der Literatur erwähnter Werkstoff mit geeigneten Eigenschaften ist eine Mischung aus 40 %mol $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ und 60 %mol KNO_3 (Tweer u. a. 1971). Abb. 5-6 zeigt die zugehörige $\eta(T)$ -Funktion.

Zum Vergleich der beiden Werkstoffe muß auch die $\eta(T)$ -Funktion des Nitratgemisches in eine Standardabbildung transformiert werden. Dafür muß wie für das Originalglas zuvor eine Bezugstemperatur bestimmt werden. Dies erfolgt aus praktischen Gesichtspunkten: die Modellsubstanz soll einerseits nicht zu niedrigviskos (flüssig) sein, um den Einlegevorgang nicht zu sehr zu verfälschen und am Ende des Preßvorganges ein erstarrtes Produkt zu gewährleisten.

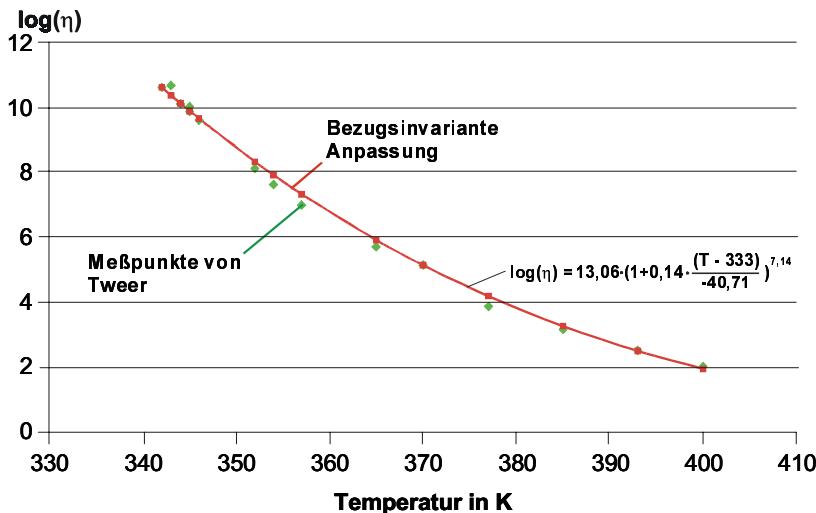


Abb. 5-6: $\eta(T)$ -Funktion eines bei niedrigen Temperaturen erweichenden Gemisches aus Calcium- und Kaliumnitrat.

Andererseits sollte die Viskosität bei der Bezugstemperatur niedriger sein als die vergleichbare Viskosität des Originalglases, um die erforderliche Preßkraft zu reduzieren. In iterativen Vergleichen der Standardtransformationen von Original- und Modellglas bei unterschiedlichen Bezugspunkten des Modellstoffes wurde eine ideale Bezugstemperatur von 373 K identifiziert. Der Überdeckungsgrad der beiden dimensionslosen Stofffunktionen ist bei dieser Bezugstemperatur ausreichend groß; darüber hinaus liegt die Viskosität des Modellstoffes bei der Bezugstemperatur leicht niedriger als die des Originalglases.

Mit den Bezugstemperaturen T_0 sind auch die zugehörigen Viskositäten η_0 bekannt. Der Wert γ_0 lässt sich aus Gl. 31 errechnen. Damit liegen die erforderlichen Werte für die Standardtransformationen der beiden betrachteten $\eta(T)$ -Funktionen fest:

	Originalglas	$0,6 \text{ KNO}_3 - 0,4 \text{ Ca}(\text{NO}_3)_2$
T_0	1148 K	373 K
η_0	$1,121 \cdot 10^5 \text{ dPas}$	$3,43 \cdot 10^4 \text{ dPas}$
γ_0	$-0,0249 \text{ K}^{-1}$	$-0,2977 \text{ K}^{-1}$

Tabelle 5-2: Schlüsselparameter für die Standardtransformation der $\eta(T)$ -Funktionen des Glases und des Modellstoffes.

Damit lassen sich nun beide $\eta(T)$ -Funktionen standardtransformieren. Einen Vergleich der Viskositätsfunktionen der beiden Werkstoffe in dimensionslosen Koordinaten zeigt die folgende Abbildung:

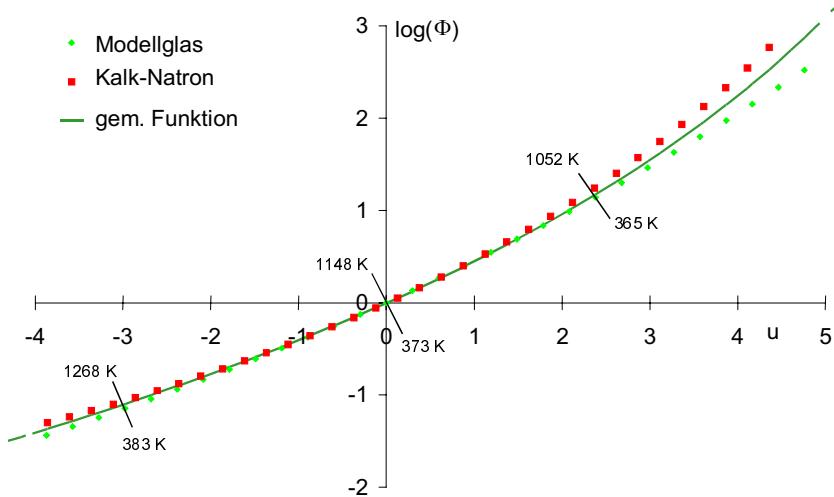


Abb. 5-7: Gegenüberstellung der standardtransformierten thermo-viskosen Funktionen von Originalglas und Modellstoff

Abb. 5-7 zeigt eine Übereinstimmung der Kurven im Bereich von ca. $u \in [-3; 2,5]$. In diesem Bereich ist die idem-Bedingung für die dimensionslosen Werkstofffunktionen erfüllt. Damit ist das Erstarrungsverhalten des einen Stoffes in dem genannten Bereich durch das des anderen darstellbar, falls der effektive Temperaturmaßstab im relevanten Temperaturbereich die gleichen Ergebnisse liefert wie der viskose Temperaturmaßstab (s. hierzu Tabelle 4-4). Als näherungsweise Abschätzung dieser Nebenbedingung wurde die Gleichung 29 entwickelt. Durch die in der Tabelle 5-2 enthaltenen Werte ist diese Abschätzung möglich. Mit den Konstanten $T_A = \text{Einlegetemperatur des Glases}$ und $T_B = T_0$ für Modell- und Originalprozeß ergibt Gleichung 29:

$$\frac{-0,025}{-0,298} \approx \frac{383 - 373}{1268 - 1148} \Leftrightarrow 0,084 \approx 0,083$$

Es lädt sich zeigen, daß der Hauptteil des viskosen Fließen des Glases in der Form tatsächlich zwischen der Einlegetemperatur und T_0 stattfindet. Ein Indiz dafür ist die kurze Zeitspanne vom Eintauchen des Stempels in das Glas bis zum Erreichen des unteren Totpunktes (1,4 sek) verbunden mit der geringen Wärmeleitung des Glases. Nur in dieser kurzen Phase ist ein viskoses Fließen möglich. Während der Stempel anschließend im UT verharrt, ist nur ein konvektiv motiviertes Fließen des Glases in der Form denkbar, dazu ist das Glas jedoch zu viskos. Somit kann das Modell des Pro-

zesses sowohl die sich ausbreitenden Temperaturfelder wie auch die amorphe Erstarrung des Glases abbilden.

Ein Vergleich der letzten relevanten Stoffgröße, der Temperaturleitfähigkeit, zeigt, daß sowohl das im Originalprozeß eingesetzte Kalk-Natron-Glas als auch das Nitratgemisch als Modellsubstanz, wie eingangs vermutet, in der gleichen Größenordnung liegen:

$\text{O}a_{\text{Glas}}$ bei $\text{O}T_0$	Ma_{Glas} bei MT_0
$8,95 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Tabelle 5-3: Vergleich der Temperaturleitfähigkeiten von Originalglas und Modellstoff.

Damit ist offensichtlich, daß das Nitratsystem das Erstarrungsverhalten des Glases im relevanten Temperaturbereich darstellen und aufgrund seiner Stoffwerte als Modellstoff in einem Ähnlichkeitstheoretischen Modell eingesetzt werden kann. Die konkrete Gestaltung der Ähnlichkeitstheoretischen Versuchsanlage kann nun durch die Maßstabsgleichungen erfolgen.

5.3 Dimensionierung der Anlage

Neben den Werten η_0 , γ_0 und a_0 ist die charakteristische Länge l des Modellprozeß frei wählbar. Dies entspricht einer freien Festlegung des Geometriemaßstabes. Dieser sollte aus mehreren Gründen dem Originalmaßstab entsprechen. Zum einen könnten durch eine starke Skalierung der Geometrie Effekte im Modellprozeß an Einfluß gewinnen, die im Originalprozeß keine Rolle spielen. Zum anderen entsteht bei dem geplanten Prozeß als Prozeßergebnis ein Produktprototyp. Dieser Produktprototyp vermittelt einerseits einen ersten optischen Eindruck vom geplanten Glasartikel, andererseits weist er in Form von Produktionsfehlern auf Prozeßmängel hin. Um diese Eindrücke und Informationen optimal nutzen zu können, ist es ebenfalls sinnvoll, einen möglichst originalnahen Geometriemaßstab zu verwenden. Zunächst wird ein Originalmaßstab eingesetzt und dessen Auswirkung auf andere Maßstäbe überprüft. Sollte kein unrealisierbarer Modellaspekt daraus erwachsen, wird der Originalmaßstab sowie alle weiteren Maßstäbe verwendet.

Freigewählte Maßstäbe (s. auch Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3):

$$\frac{\text{M}l}{\text{o}l} = 1 \quad \text{Gl. 32}$$

$$\frac{\text{M}\eta_0}{\text{o}\eta_0} = 0,306 \quad \text{Gl. 33}$$

$$\frac{M \gamma_0}{o \gamma_0} = 11,96 \quad \text{Gl. 34}$$

$$\frac{M a_{\text{Glas}}}{o a_{\text{Glas}}} = 0,156 \quad \text{Gl. 35}$$

Aus den Gleichungen 32 bis 35 in Verbindung mit den Maßstabsgleichungen 22 bis 25 ergeben sich folgende quantifizierte Maßstäbe:

$$\frac{M a_{\text{Form}}}{o a_{\text{Form}}} = 0,156 \quad \text{Gl. 36}$$

$$\frac{M \Delta t}{o \Delta t} = 6,41 \quad \text{Gl. 37}$$

$$\frac{M p_0}{o p_0} = 0,047 \quad \text{Gl. 38}$$

Gleichung 36 stellt eine Vorschrift für die Temperaturleitfähigkeit der Formwerkstoffe dar. Durch Einsetzen der Werte der Formwerkstoffe des Originalprozesses erhält man unmittelbar den entsprechenden benötigten Wert im Modellprozeß. Damit kann eine Werkstoffrecherche zur Ermittlung der Modell-Formwerkstoffe eingeleitet werden.

Der Zeitmaßstab aus Gleichung 37 zeigt an, daß die Prozeßabläufe im Modellprozeß um mehr als das sechsfache langsamer ablaufen müssen, um Ähnlichkeit in den sich ausbreitenden Temperaturfeldern zu erreichen. Angesichts der kurzen Prozeßzeiten im Sekundenbereich beim Originalprozeß ist die Ausdehnung der zeitlichen Abläufe im Modell nicht nachteilig, sondern erhöht eher die Beobachtbarkeit.

Aus Gleichung 38 geht hervor, daß der erforderliche Preßdruck, bzw. durch Beibehaltung des Originalmaßstabes ebenso die Preßkraft, auf weniger als 5% reduziert werden kann. Dies vereinfacht den Aufbau einer Versuchsanlage, da durch die starke Druckreduzierung bei unveränderten geometrischen Abmaßen im Modell auf eine aufwendige hydraulische Presse wie sie im Originalprozeß eingesetzt wird verzichtet werden kann.

Somit sind nun alle wesentlichen Details für die Errichtung einer konkreten Versuchs- bzw. Modellanlage bekannt. Anhand der bestehenden Anlage kann nun ihr Modell realisiert werden.

5.4 Realisierung der Anlage

Für die Realisierung der Anlage sind die Gleichungen 32 (Geometriemaßstab) sowie 36 bis 38 unmittelbar von Bedeutung. Der Geometriemaßstab von 1:1 gewährleistet, daß bereits bestehende Zeichnungen und gegebenenfalls sogar NC-Programme bis auf

wenige werkstoffbedingte Modifikationen weiter verwendet werden können. Durch die Reduzierung der benötigten Preßkraft auf etwas weniger als 5% (dies entspricht einer benötigten Preßkraft von 1336 N im Modell-Glas) kann eine elektrische Presse eingesetzt werden. Tatsächlich wird an der Modellanlage eine elektrische Spindelpresse mit Schiebetisch eingesetzt. Der horizontal verfahrbare Schiebetisch dient zum Be- und Entladen der Form.

Die Verzögerung des Ablaufes aller Prozeßschritte um das 6,4-fache muß über die Steuerung des Modellprozesses realisiert werden. Auch dies erscheint problemlos möglich.

Ein wesentliches Problem, das bei der Realisierung der Modellanlage auftaucht, sind die benötigten Werkstoffe für die Formwerkzeuge des Modellprozesses. Hier werden durch die Maßstabsgleichungen exakte Temperaturleitfähigkeiten gefordert, nach denen die Werkstoffe recherchiert werden müssen. *A priori* läßt sich nicht vorhersagen, ob ein derartiger Werkstoff mit den erforderlichen Stoffwerten existiert.

Im vorliegenden Fall ergeben sich die benötigten Stoffeigenschaften aus Gleichung 36 in Verbindung mit Tabelle 5-1, die im Modell geltenden Bezugstemperaturen liegen zwischen 320 K und 340 K. Diese näherungsweise Abschätzung ergibt sich aus dem Verhältnis der in der realen Form auftretenden Temperaturen zur Einlegetemperatur des Glases. Da Stoffwerte in der Regel für Temperaturbereiche von 0°C bis 100°C, bzw. von 273 K bis 373 K angegeben werden, ist diese Näherung ausreichend genau. Folgende Temperaturleitfähigkeiten werden für die einzelnen Werkstoffe gefordert:

$$M^{\alpha}_{Form} = 6,827 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (bei } 335 \text{ K)}$$

$$M^{\alpha}_{Stempel} = 1,279 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (bei } 330 \text{ K)}$$

$$M^{\alpha}_{Ring} = 1,070 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (bei } 332 \text{ K)}$$

Mit diesen Stoffwerten liegen die gesuchten Materialien zwischen den Kunststoffen ($1\text{-}2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, Marek & Götz 1995, S. 101) und den Metallen ($1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, Marek & Götz 1995, S. 97 f.). Da gerade die Formwerkzeuge in einer Versuchsanlage häufig neu erstellt bzw. abgeändert werden, ist es günstig, sie aus leicht formbaren Werkstoffen fertigzustellen. Weiterhin sollte die Herstellung der Formwerkstoffe möglichst wenig zeitaufwendig sein, um den Zeitvorteil einer prototypenhaften Anlage nicht zu gefährden. Ideal für Anwendungen, die wie in der Glasindustrie häufig vorkommend ohne durchgängige Datenstruktur auf einem Produktprototypen als Ausgangspunkt für die Prozeßentwicklung basieren, ist ein abgießbarer Werkstoff. Glasartikel werden in der Regel zunächst aus plastischem Material prototypenhaft modelliert. Durch einen Abguß vom Wachsmodell ist man innerhalb eines Tages in der Lage, prototypenhafte Formwerkzeuge herzustellen, die auf der Modellanlage einsetzbar sind. Es ist überdies derzeit nicht absehbar, daß die Glasindustrie in Zukunft auf Produktprototypen verzichten wird. Die Erzeugung der Modell-Formwerkzeuge durch Abguß von einem Anschauungsmodell des Produktes erscheint deshalb sowohl als schnelle als auch als dauerhaft einsetzbare Prozeßkette.

Durch Mischungen von Kupferfasern und Polyesterharz können Verbundwerkstoffe mit einstellbaren Temperaturleitfähigkeiten hergestellt werden. Mit zunehmendem Cu-Gehalt steigt die Temperaturleitfähigkeit des Werkstoffes. Problematisch sind dabei allerdings Sedimentierungsvorgänge der Cu-Fasern im Harz während der Aushärtphase. Dem kann durch Zugabe von Cu-Pulver vorgebeugt werden, da dadurch die Viskosität der fasertragenden Grundmasse angehoben wird. Verwendet man Pulver mit ausreichend feiner Korngröße ($<100\mu\text{m}$), setzen sich die Cu-Partikel während der Aushärtphase kaum ab.

Mit drei verschiedenen Mischungsverhältnissen konnten Werkstoffe mit den erwünschten thermischen Eigenschaften erzeugt werden. Dabei wurden die Dichte ρ und die Wärmeleitfähigkeit λ von Probekörpern bekannter Geometrie gemessen und die Wärmekapazität c_p aus dem Massen-Mischungsverhältnis von Kupfer und Harz errechnet. Aus diesen drei Werten wurde dann die Temperaturleitfähigkeit gemäß Gl. 12 errechnet werden.

5.5 Versuchsplanung

Im Rahmen dieser Arbeit geht es um die Validierung des Ähnlichkeitstheoretischen Modells. Eine Versuchsplanung ist deshalb nicht notwendig. Vielmehr muß der Prozeßverlauf des Originalprozesses während der Aufnahme der Meßwerte am Prozeßprototypen nachgebildet werden. Mit dem erfolgreichen Abschluß der Validierung kann der Prozeßprototyp zur Optimierung der Produktion anderer Produkte des gleichen Prozesses (hier: Glaspressen) eingesetzt werden.

5.6 Beschreibung der Versuchsdurchführung zur Validierung

Die Versuche an dem Prozeßprototypen wurden gemäß den aus dem Originalprozeß umgerechneten Parametern durchgeführt. Die Maschineneinstellung zeigt Tabelle 4-1.

Die Form wurde durch Abformverfahren mit den oben erwähnten Cu-Harz-Mischungen hergestellt. Als Positiv des Glasartikels wurde ein Gipsmodell der Original-Schale verwendet. Für die übrigen Formwerkzeuge wurden Rohlinge gegossen. Alle Formwerkzeuge wurden spanend nachbearbeitet. Die Form wurde nur an ihrer Außenseite spanend auf Endmaß bearbeitet. An ihrer Funktionsfläche, der Innenseite fand lediglich eine Oberflächenbearbeitung statt.

Die Modell-Formwerkzeuge wurden wie ihre Pendants des Originalprozesses mit Meßfühlern versehen.

Da die an der Originalanlage vorhandene konvektive Kühlung aus Komplexitätsgründen nicht Teil des Prozeßmodells war, wurde auch der Modellprozeß zunächst ohne Kühlung betrieben. Nachdem die dabei erzielten Ergebnisse nicht zufriedenstellend waren, wurde die Versuchsanlage für eine zweite Versuchsreihe mit einer konvektiven Kühlung versehen. Die Kühlung selbst, eine Preßluftkühlung, wurde nur qualitativ abgebildet. Die Regelparameter, d. h. Temperaturgrenzen für das Einsetzen der Kühlung sowie deren Meßorte, wurden dagegen vom Originalprozeß maßstäblich übernommen.

Parameter	Wert
1	0,06 m (Höhe der Schale, Originalmaßstab)
Δt	21s (Dauer des Netto-Preßvorgangs)
Zyklusdauer	6,4 min.
T_{Ein}	383 K
p	$1,07 \cdot 10^5$ Pa (Druck im Glas)

Tabelle 5-4: Maßstabsgerecht veränderte Parameter der Modellanlage.

Die Versuchsanlage wurde zyklisch betrieben. Alle auftretenden Teilprozesse, wie z. B. Absenken des Stempels, Verweilen des Stempels im UT, Entnahme des Produktes aus der Form, wurden in ihrer Länge und in ihrem Zeitpunkt des Auftretens gemäß Gleichung 37 skaliert.

Weiterhin ist eine exakte Temperaturlösung des Modellstoffes vorzusehen, da es sich dabei um ein „kurzes“ Material handelt. Dies bedeutet, daß die dimensionsbehaftete Viskositätskurve im Vergleich zu anderen Gläsern einen höheren Betrag der Steigung aufweist, bzw. daß die Temperaturdifferenz zwischen zwei Viskositätsfixpunkten (z. B. Littletonpunkt $\log(\eta)=7,6$; Einsinkpunkt $\log(\eta)=4,0$) gering ist. Die genaue Temperaturlösung wird in der Praxis zusätzlich durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Modellstoffes erschwert. Bei tieferen Temperaturen können Temperaturunterschiede im Modellstoffbad aufgrund der hohen Viskosität nicht mehr durch Konvektion ausgeglichen werden. Aus diesem Grund wird eine großflächige Plattenheizung vorgesehen. Es ist sogar eine Beheizung des Modellstoffes unter Ausnutzung seines inneren elektrischen Widerstandes denkbar. Eine derartige Konstruktion ist jedoch sehr aufwendig und wird vorerst nicht realisiert.

Das Beladen der Form mit Modellstoff erfolgt manuell durch temperierte Tiegel, in denen der Modellstoff bereits portioniert bereitsteht. Aufgrund der oben beschriebenen Problematik der Temperierung des schlecht wärmeleitenden Modellstoffes war es nicht möglich, größere Mengen zunächst temperiert bereitzustellen und erst später zu portionieren.

5.7 Darstellung der Versuchsergebnisse

Im folgenden werden die Ergebnisse dargestellt, die in Experimenten an der Versuchsanlage erarbeitet wurden.

Bei den ersten Experimenten zur Validierung der Versuchsanlage wurde aufgrund einer falschen Einstellung des Pyrometers die Einlegetemperatur des Glases in die Form falsch bestimmt (1123 K statt 1268 K) und so von falschen Anfangsbedingungen ausgingen. Die daraus folgenden Parametereinstellungen der Versuchsanlage führten zu keinem intakten Produkt. Entweder ließen sich die Artikel nicht auspressen, oder es kam bei der Entformung zu Schwierigkeiten.

Nachdem die theoretisch berechnete Einstellung der Versuchsanlage vermeintlich fehlgeschlagen war, wurden nun die Parameter produktorientiert ermittelt. Die Anlage wurde nun unabhängig von den theoretisch berechneten Parametern so betrieben, daß intakte Modell-Schalen erzeugt werden konnten. Zur Unterstützung der Entformung wurde ein Trennmittel als Aerosol dünn auf Form und Stempel aufgetragen. Durch diese Versuche wurden folgende Parameter ermittelt:

Einlegetemperatur des Modellstoffs: ca. 383 K

Preßkraft: > 930 N

Preßdauer: 9,5 sek

Haltezeit (Stempel UT): 20 sek

Temp. d. Glases nach dem Pressen: ca. 356 K

Rechnet man die Einlegetemperatur auf Temperaturen am Originalprozeß um, so erhält man statt der zunächst angesetzten 1123 K eine deutlich höhere Einlegetemperatur von ca. 1270 K. Ebenso war die ermittelte Preßkraft gegenüber den theoretischen Berechnungen nahezu um den Faktor 10 zu groß. Lediglich die Preßdauer bewegte sich in der vorgegebenen Größenordnung.

Die fehlerhaften Meßergebnisse am Glasposten traten bei einer parallel durchgeführten FEM-Untersuchung der Verformung des Glaspostens zu Tage. Diese zeigte, daß eine Einlegetemperatur im Originalprozeß von 1123 K kaum mehr zu Verformungen führen kann und deshalb unrealistisch ist. Nachforschungen ergaben, daß das bei den thermographischen Temperaturmessungen eingesetzte Pyrometer auf eine Wellenlänge eingestellt war, die lediglich die Messung der Oberflächentemperatur des Glaspostens ermöglichte. Diese betrug in der Tat ca. 1123 K. Eine erneute Temperaturmessung des Glaspostens am Kugelspeiser mit einer kürzeren Wellenlänge (diese erlauben höhere Eindringtiefen in das Glas) ergab Temperaturen im Inneren des Glaspostens von tatsächlich ca. 1270 K.

Die Erkenntnisse aus diesen Temperaturmessungen machten eine erneute Standardtransformation von Modellstoff und Originalglas mit leicht modifiziertem T_0 notwendig, da der Übereinstimmungsbereich der beiden Gläser bei der bisherigen Anpas-

sung nun in einem zu niedrigen Temperaturbereich lag. Schließlich wurde die endgültige Anpassung gemäß Abb. 5-7 errechnet, die einen ausreichend großen Temperaturbereich in der richtigen Region abdeckte. Nach dieser neuen Korrelation entsprach die Einlegetemperatur von 383 K im Modell einer Temperatur im Original von 1268 K. Damit bewegte sich das Ergebnis aus Versuchen der Modellanlage in einem Genauigkeitsbereich von weniger als 1%.

Die folgende Tabelle zeigt eine Gegenüberstellung der Parameterwerte aus Original- und Modellprozeß, wie sie sich aus den Maßstabsgleichungen unter Berücksichtigung der Stoffwerte und der Anpassung gem. Abb. 5-7 errechnen lässt:

Parameter	Originalprozeß	Modellprozeß
l	1	1
Δt	1 min	6,4 min
F (Preßkraft)	28000 N	1334 N
a_G	$8,95 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
T_0	1148 K	373 K
η_0	112000 dPas	34300 dPas
γ	$-0,0249 \text{ K}^{-1}$	$-0,2977 \text{ K}^{-1}$
T_{Gin}	1270 K	383 K

Tabelle 5-5: Parameter des Originalprozesses und ihre maßstäbliche Entsprechung im Modell.

Die in den Werkzeugen auftretenden Temperaturen lassen sich durch Gl. 28 auf das Temperaturniveau des Original-Prozesses umrechnen. Als Temperaturfixpunkte T_A und T_B dienen die Postentemperatur beim Beladen der Form und die Oberflächentemperatur des Glases unmittelbar nach dem Pressen. Beide Temperaturen wurden durch Versuche am jeweiligen Prozeß (Original und Modell) bestimmt:

	T_A in K	T_B in K
Originalprozeß	1270	1023
Modellprozeß	383	357

Tabelle 5-6: Temperaturfixpunkte nach Gl. 26 für den Original- und den Modellprozeß.

Die neue Korrelation von Modell- und Originalglas wirkte sich ebenfalls auf die Maßstabsgleichung für die Preßkräfte bzw. den Preßdruck aus. Nach Gl. 24 in Verbindung mit den entsprechenden Werten aus Tabelle 5-5 ergibt sich nun eine erforderliche Preßkraft von 1334 N (aufgrund des Geometriemaßstabes von 1:1 sind Preßdruck und Preßkraft aus Modell- und Originalprozeß direkt zueinander proportional). Der im Rahmen der Experimente ermittelte minimale Preßdruck von 930 N liegt niedriger.

Versuche haben jedoch gezeigt, daß auch bei eingestellten Preßkräften an der Modellanlage bis zu 1500 N eine intakte Schale produziert wird, so daß sich daraus statt einer einzelnen geeigneten Preßkraft ein geeigneter Preßkraftbereich folgern läßt. Die an der Originalanlage eingestellte Preßkraft von 28 kN stellt nicht die minimal mögliche dar, sondern ist mit einem Sicherheitsaufschlag versehen. Nach den Ergebnissen an der Modellanlage würde dieser Sicherheitsaufschlag 30% bezogen auf die minimal mögliche Preßkraft betragen. Dieser Wert erscheint plausibel.

Für die Preßdauer ist die Netto-Preßzeit eine charakteristische Größe. Die Nettopreßzeit ist die Zeit, in der der Preßstempel in Kontakt mit dem heißen Glas steht. Die Netto-Preßzeit setzt sich zusammen aus der Eintauch- und der Haltephase. Hierbei ist für den Vorgang des viskosen Fließens des Glases in der Form die Eintauchphase die bedeutende. Während der Haltephase entzieht das Werkzeug dem Glas zwar Wärme, ein Fließen des Glases kann in dieser Phase jedoch nicht zustande kommen, da die Werkzeuge ruhen und das Glas die von den Formwerkzeugen bereitgestellte Kavität bereits lückenlos ausfüllt. Die in Versuchen zunächst ermittelte ideale Netto-Preßzeit von 29 sek. ist deutlich länger als die rechnerisch geforderten knapp 21 sek (= 3,26 s x 6,4). Die Verlängerung von 8 sek geht jedoch ausschließlich auf das Konto der Haltezeit. An der Maschine waren folgende Parameter eingestellt:

Eintauchzeit: 9 sek.

Haltezeit: 20 sek.

Die Ergebnisse einer Gegenüberstellung von errechneten und ermittelten Zeiten zeigt die folgende Tabelle 5-7

	Originalprozeß	Maßstabsfaktor	Modellprozeß errechnet	Modellprozeß ermittelt
Eintauchzeit	1,43	6,4	9,2	9 - 9,5
Haltezeit	1,83	6,4	11,7	20

Tabelle 5-7: Gegenüberstellung errechneter und tatsächlich ermittelter Preßzeiten im Modellprozeß mit den Werten des Originalprozesses. Alle Angaben in sek.

Die Haltezeit mußte aufgrund von Problemen mit der Entformung der Schalen nach dem Pressen verlängert werden. Hebt der Stempel zu früh an, so führt dies zu sogenannten „Gesaugten“. Dabei haftet das noch zähflüssige Glas am Stempel und wird von diesem bei der Aufwärtsbewegung mit angehoben. Dieser Effekt tritt im wesentlichen im thermisch eingeschwungenen Zustand der Formwerkzeuge auf. Preßt man den Modellstoff mit noch kalten Werkzeugen, sind kürzere Haltezeiten durchaus ohne Probleme möglich.

Diese Umstände zeigen an, daß die Haltezeit aus rein praktischen Erwägungen aufgrund der Viskosität des Modellstoffes beim Einlegen länger gewählt wird. Der Modellstoff wird zwar in Original- und Modellprozeß mit gleicher dimensionsloser Viskosität eingelegt. Die dazugehörigen absoluten Viskositätswerte unterscheiden sich jedoch in beiden Prozessen. Die dimensionsbehaftete Viskosität ist im Modellprozeß

niedriger. Folglich läge bei Einhalten des zeitlichen Maßstabs für alle Prozeßschritte der Modellstoff nach dem Pressen gegenüber dem Originalglas immer noch mit niedriger absoluter Viskosität vor. Dies ist aus theoretischer Sicht kein Problem, jedoch geht dadurch das Produkt als Informationsträger verloren. Vom praktischen Standpunkt aus gesehen führt diese niedrigere absolute Endviskosität (die dimensionslosen Endviskositäten sind für beide Prozesse nach wie vor gleich) im thermisch eingeschwungenen Zustand zu Entformungsproblemen, wie z. B. o. g. „Gesaugte“. Verwendet man dagegen kalte Formwerkzeuge, tritt dieser Effekt wegen der höheren Abkühlrate nicht auf. Die längeren Haltezeiten dienen also lediglich dazu, nach dem Preßvorgang ein stabiles Produkt mit ausreichend hoher Viskosität vorliegen zu haben. Die viskosen Fließvorgänge, die hauptsächlich in der Eintauchphase ablaufen, bleiben von der verlängerten Haltephase jedoch unberührt.

Es ist prinzipiell möglich, den Modellstoff ohne wesentlichen Verzicht auf Ähnlichkeit mit höherer absoluter Viskosität einzulegen. Höhere Viskositäten bedeuten niedrigere Temperaturen, was letztendlich zu kürzeren Haltezeiten führt. Dadurch würde aber die erforderliche Preßkraft und damit verbunden der erforderliche Anlagenaufwand steigen. Gleiche absolute Viskositäten in Modell- und Originalprozeß würden für den Modellprozeß den Einsatz der gleichen Presse wie im Originalprozeß bedeuten. Eine andere wichtige Frage bleibt dabei offen, nämlich inwieweit die Modellformen dem erheblichen Preßdruck des Originalprozesses standhalten würden.

Eine weitere Aussage über die Qualität des Prozeßmodells lässt sich durch Vergleich des instationären Temperaturfeldes in der Form von Original und Modellprozeß treffen. Hierzu wurden während des Projektes mehrere Versuchsreihen durchgeführt, die zu einigen Modifikationen des Modellprozesses führten.

Zunächst wurde der Modellprozeß ohne jegliche konvektive Kühlung betrieben. Abb. 5-8 zeigt einen Vergleich der umgerechneten Modelltemperaturen mit den Originaltemperaturen an den entsprechenden Meßstellen

Bis auf die Meßposition im Boden der Form und an der Position Flanke 4 zeigen die meisten Meßpunkte dasselbe Ergebnis: Die Temperaturen in Modell- und Originalprozeß oszillieren an der gleichen Meßstelle um ein gemeinsames Temperaturniveau. Der Fehler hinsichtlich des Temperaturniveaus als Mittelwert der Schwingung beträgt dabei ca. 5-8%. Dabei ist im Modell zum einen die Amplitude der Temperaturschwingungen größer, zum anderen erfolgt der Anstieg der Temperaturen dort früherzeitiger. Beides deutet auf eine zu hohe Temperaturleitfähigkeit des/der Modellformwerkstoffe hin. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Meßstellen im folgenden noch einmal einzeln dargestellt.

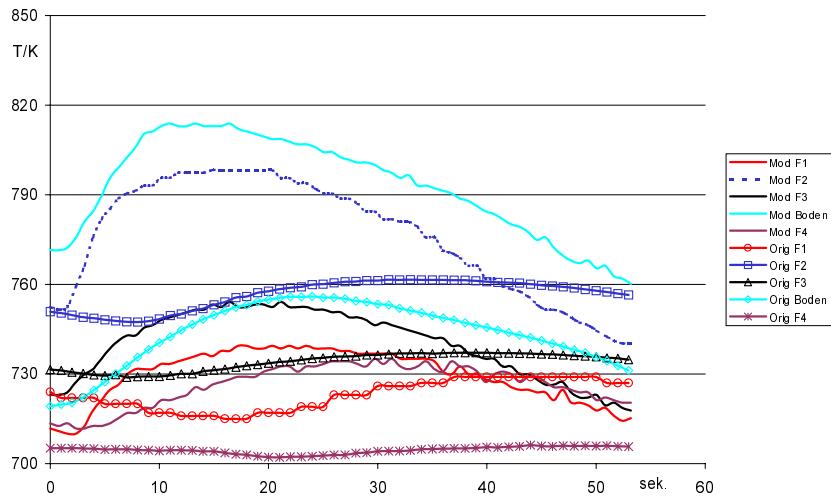


Abb. 5-8: *Meßergebnisse aus Modell- und Originalprozeß. Ergebnisse des Modellprozesses mit Gl. 28 auf Temperaturen des Originalprozesses umgerechnet.*

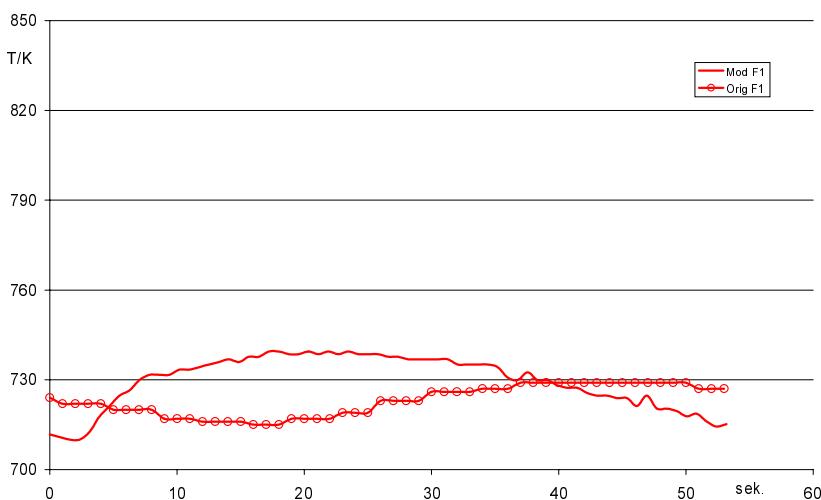


Abb. 5-9: *Vergleich der Temperaturen an Position Flanke 1.*

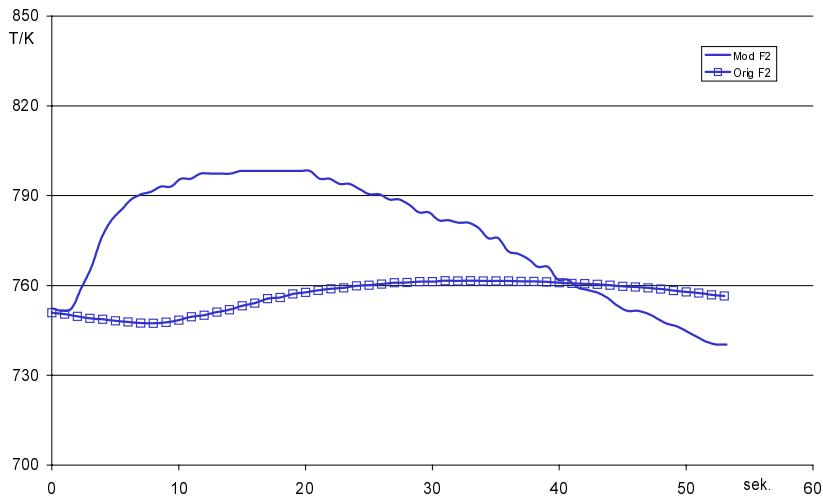


Abb. 5-10: Vergleich der Temperaturen an Position Flanke 2.

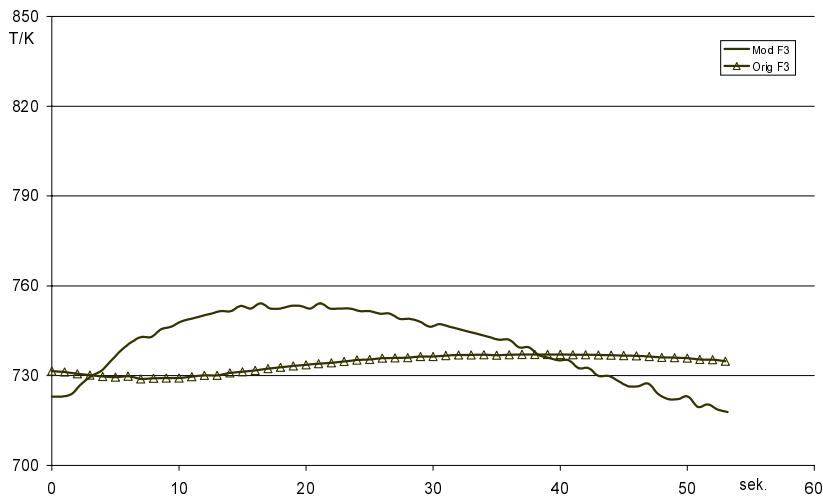


Abb. 5-11: Vergleich der Temperaturen an Position Flanke 3.

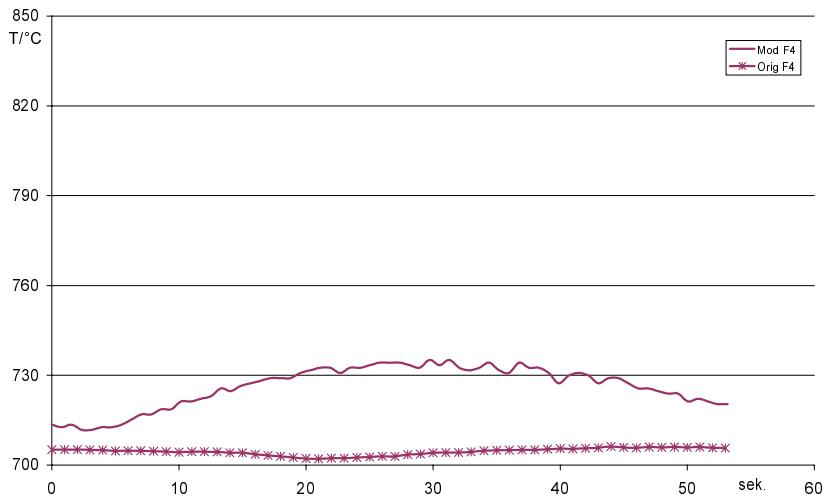


Abb. 5-12: Vergleich der Temperaturen an Position Flanke 4.

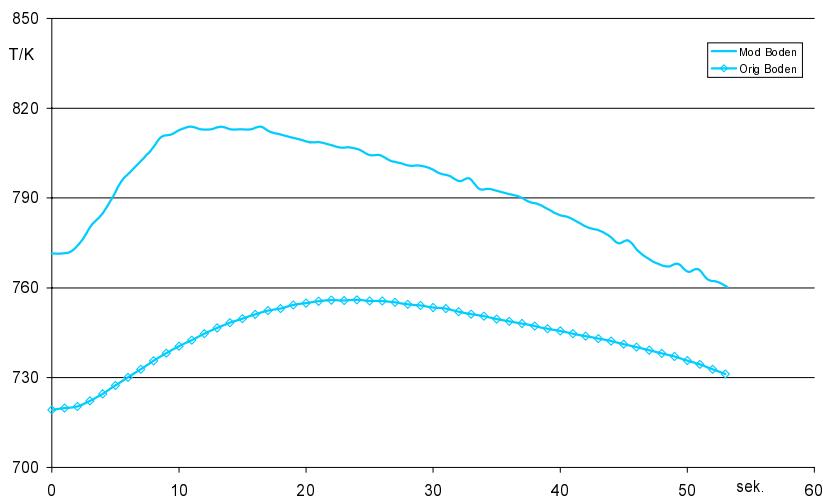


Abb. 5-13: Vergleich der Temperaturen an Position Boden.

Am Boden und in abgeschwächter Form auch an der Position Flanke 4 liegen die Temperaturen im Modell deutlich über denen des Originalprozesses. Auf der Suche nach den Ursachen wurden verschiedene Parameter am Modellprozeß geändert. Schließlich hat die Einführung einer konvektiven Bodenkühlung, wie sie auch im Originalprozeß vorhanden ist, gezeigt, daß durch sie die Temperaturen an den genannten Stellen maßgeblich beeinflußt wird.

Die Bodenkühlung kann jedoch nur qualitativ in das Modell integriert werden. Eine Ähnlichkeitstheoretische Integration würde den Rahmen des Modells sprengen. Die Kühlung wurde so gestaltet, daß sie ab einer nach Ähnlichkeitstheoretischen Gesichtspunkten aus dem Originalprozeß errechneten Schwellentemperatur einsetzt. Für die Bodenkühlung wurde der Boden der Form von unten senkrecht mit Preßluft angeblasen.

Die folgende Abbildung zeigt eine Zusammenstellung aller Meßpositionen des Versuches mit Bodenkühlung.

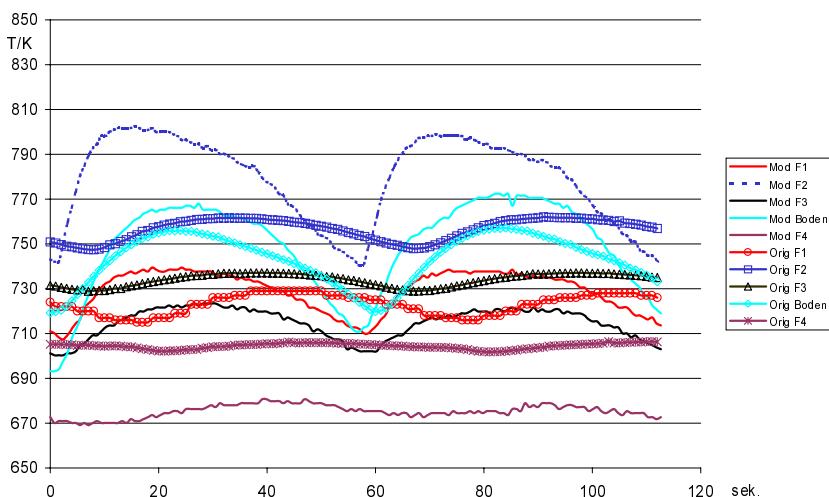


Abb. 5-14: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus einem Versuch mit Bodenkühlung an der Modellanlage und den Werten des Originalprozesses.

Auch in diesem Versuch schwingen die Temperaturen des Modellprozesses mit zu großen Amplituden und die Phasenverschiebungen zwischen den Meßpunkten sind zu gering. Dies dürfte auf eine zu große Temperaturleitfähigkeit, vermutlich aufgrund einer zu großen Wärmeleitfähigkeit, zurückzuführen sein. Flanke 1 und Flanke 2 sind aufgrund ihrer Distanz zur Bodenkühlung gegenüber dem zuvor gezeigten Versuch nahezu unverändert. Flanke 3 ist nun vermutlich unter dem Einfluß der Bodenkühlung

auf einem leicht (ca. 5%) zu niedrigen Temperaturniveau als im Originalprozeß. Die Flanke 4, deren Position noch etwas näher an der Bodenkühlung und dazu näher an der Außenfläche der Form liegt, ist um ca. 7-8% zu kalt. Die zentrale Meßposition am Boden liefert nun jedoch ein sehr genaues Bild des Temperaturverlaufs über einen Preßzyklus.

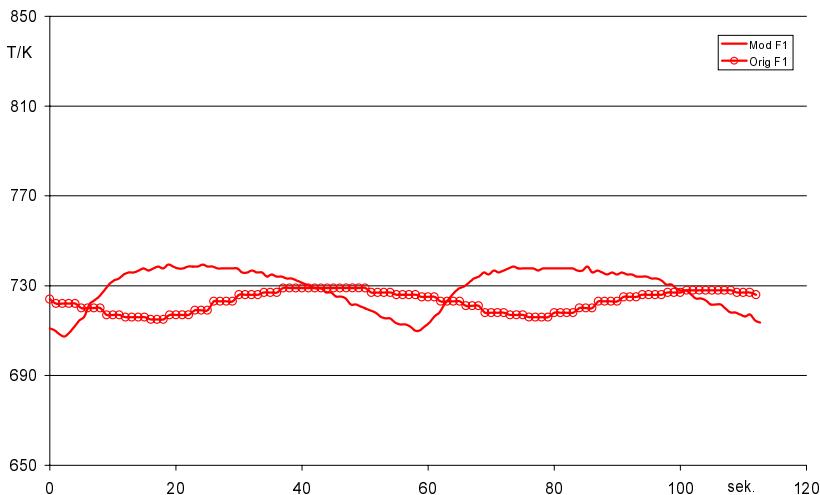


Abb. 5-15: Vergleich der Temperaturen in Position Flanke 1 mit Bodenkühlung im Modell.

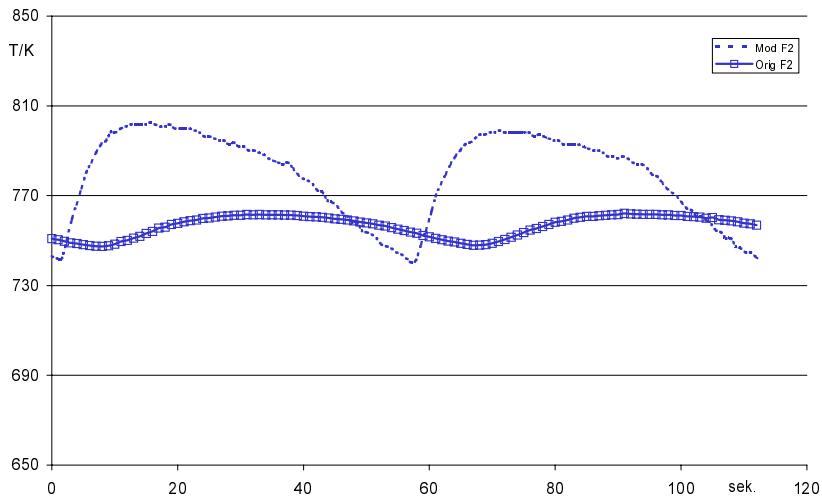


Abb. 5-16: Vergleich der Temperaturen in Position Flanke 2 mit Bodenkühlung im Modell.

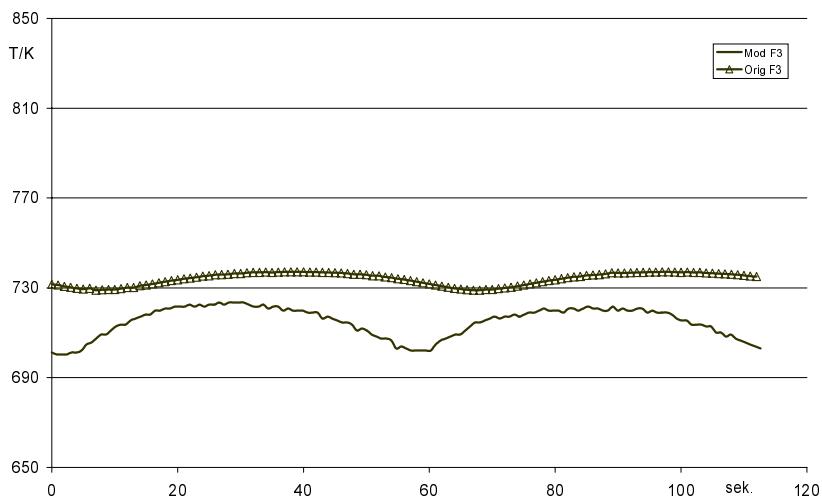


Abb. 5-17: Vergleich der Temperaturen in Position Flanke 3 mit Bodenkühlung im Modell.

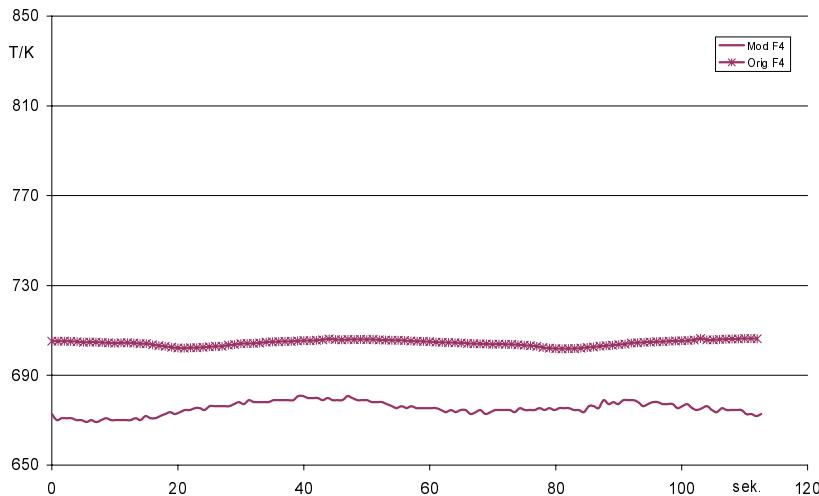


Abb. 5-18: Vergleich der Temperaturen in Position Flanke 4 mit Bodenkühlung im Modell.

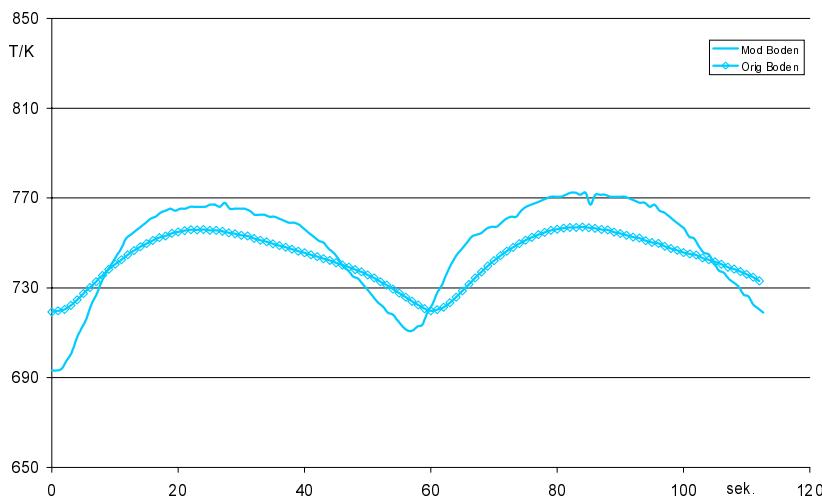


Abb. 5-19: Vergleich der Temperaturen in Position Boden mit Bodenkühlung im Modell.

Die Tatsache, daß die Form auf Ereignisse wie z. B. äußere Kühlung qualitativ richtig reagiert, macht den dadurch in das instationäre Temperaturfeld der Form eingebrachten Fehler mehr als wett. Dem Experimentator wird es weniger darum gehen, eine Temperatur an einer Stelle der Form genau zu ermitteln, als das globale Zusammenspiel von Prozeß und Produkt erkennen.

5.8 Fehlerbetrachtung

Das Modell enthält mehrere Fehlerquellen. Diese sind in Abb. 5-20 dargestellt.

- Fehler in den Eingangsdaten
- Fehler aufgrund von theoretischen Vereinfachungen
- Fehler im Modellaufbau
- Fehler in der Durchführung des Modellprozesses

Abb. 5-20: Fehlerquellen des ählichkeitstheoretischen Prozeßmodells des Glaspressen.

5.8.1 Fehler in den Eingangsdaten

Für die Quantifizierung der Parameter waren ausführliche Meßreihen notwendig. Es ist bei der Anwendung von Meßtechnik leider unvermeidlich, daß trotz sorgfältigen Umgangs mit Meßinstrumenten das Ergebnis mit Unsicherheiten behaftet bleibt. Im vorliegenden Fall waren die mit dem Prozeß unmittelbar verbundenen Messungen weitgehend problemlos. Die Aufnahme von Prozeßzeiten und Preßdrücken oder -kräften war ohne Schwierigkeiten mit einem Fehler von weniger als drei Prozent möglich. Etwa anders lag bereits die Ermittlung der auftretenden Prozeßtemperaturen. Die Ermittlung der Einlegetemperatur kann nur thermographisch erfolgen. Dabei kommt es wiederum auf die am Meßgerät eingestellten Parameter Wellenlänge (entspricht Eindringtiefe in den Glasposten) und Emissionsgrad an. Hier können Meßungenauigkeiten von 5% auftreten. Ebenso zeigt Abb. 5-2, daß die Temperaturen in den Werkzeugen während des eines Prozeßtages durchaus innerhalb einer gewissen Bandbreite schwanken.

Die mit der größten Unsicherheit versehenen Eingangsdaten sind jedoch die Temperaturleitfähigkeiten der beteiligten Gläser und Formwerkstoffe. Zwar wurden die damit verbundenen Stoffwerte in renommierten Labors festgestellt¹. Gerade aber bei thermischen Stoffwerten ist eine genaue Messung schwierig, die auch auf andere Proben des selben Werkstoffes übertragbar ist. Die PTB nennt für die Wärmeleitfähigkeit der Formwerkstoffe eine Meßunsicherheit von 3%. Das IKTS bezeichnet in seinem Bericht B 922 jedoch die Meßunsicherheit der Temperaturleitfähigkeit des Originalglases mit $\pm 15\%$. Diese relativ hohe Meßunsicherheit resultiert aus einem Erweichen der Probe bei Temperaturen über 970 K. Benötigt werden die Stoffwerte des Glases jedoch bei 1050 K bis 1250 K. Diese Fehler wirken sich unmittelbar auf die geforderten Stoffwerte des Modell-Formwerkstoffes aus. Mittelbar wird dadurch das instationäre Temperaturprofil in den Modellformen verfälscht.

5.8.2 Fehler aufgrund theoretischer Vereinfachungen

Das Modell beinhaltet zwei wesentliche Vereinfachungen im Modell gegenüber dem Originalprozeß. Die erste Vereinfachung des Modells betrifft die konvektive Kühlung im Originalprozeß. Die Integration der Kühlung in das Prozeßmodell ist schwierig, da damit weitere Stoffwerte relevant werden (z. B. die des Kühlmediums), die im Modell skaliert werden müßten. Dies bedeutet wiederum, einen weiteren Modellstoff bspw. für das Kühlmedium zu finden, der bestimmte Zielstoffwerte aufweist.

Die konvektive Kühlung wirkt sich, wie die Ergebnisse zeigen, hauptsächlich auf die wand- bzw. kühlungsnahen Bereiche der Form aus. In der Nähe des Glases sieht zwar die Gestalt der zyklischen Temperaturschwankungen im Modell anders aus als im Original, jedoch bewegen sich die Temperaturschwankungen um das erwartete Temperaturniveau mit einer Genauigkeit von ca. 5%. Mehr ist, wie im vorigen Kapitel dargestellt, nicht zu erwarten. Für einen relevanten prozeßtechnischen Erkenntnisgewinn reicht dies zu diesem frühen Stadium der Produktentwicklung jedoch aus.

Die zweite wesentliche Vereinfachung ist das Verhältnis von einem Stempel pro Form im Modell, während im Originalprozeß ein Stempel für vier Formen verwendet wurde. Diese Vereinfachung führt zu einer thermischen Minderbelastung des Stempels im Modell. Dies läßt sich jedoch nicht vermeiden, wenn man den baulichen Aufwand des Modells geringer halten will als den des Originalprozesses. Eine Möglichkeit zur Be seitigung dieses Fehlers liegt folglich in der Verwendung eines Rundtakttisches auch im Modell. Er läßt sich jedoch auch reduzieren, wenn man das Pressen weiterer Gläser durch den Stempel als zyklische Wärmezufuhr in den Stempel, etwa durch eine Heizung modelliert.

¹ Die Formwerkstoffe wurden von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig, das Original-Glas vom Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe in Dresden, der Modellstoff von den Labors der BASF AG in Ludwigshafen vermessene.

Eine weitere modellimmanente Fehlerquelle liegt in der vereinfachenden Annahme konstanter Werkstoffwerte für alle Stoffwerte außer der Glasviskosität. Da die Stoffwerte im relevanten Temperaturbereich nicht stark variieren, ist der durch die Annahme konstanter Stoffwerte bedingte Fehler geringer als 5%. Dies lässt sich aus den Schwankungsbreiten der betroffenen Stoffwerte ableiten.

5.8.3 Fehler im Modellaufbau

Im Modellaufbau liegt die entscheidende Fehlerquelle in der Nutzung der Cu-HarzMischungen als Modell-Formwerkstoffe. Hier ist es unsicher, ob eine homogene Verteilung der Cu-Fasern und Cu-Pulverkörper in der Harzmatrix erreicht wurde. Daneben ist unsicher, inwieweit die Zielgrößen bei der Recherche nach einem Modell-Formwerkstoff korrekt sind, wie in Kap. 5.8.1 dargelegt wurde.

Die weitaus größeren Abmessungen der Formwerkzeuge im Vergleich zu den Proberörpern, die für die Messungen der Stoffwerte erstellt wurden, bieten ein Potential für Sedimentierungsvorgänge der Cu-Bestandteile im Harz. Dies vor allem dadurch, da die Länge der Cu-Fasern bei der Herstellung der Formwerkzeuge im Vergleich zum Gesamtdurchmesser des abgegossenen Volumens klein ist.

Eine weitere Fehlerquelle im Zusammenhang mit der Homogenität der Modell-Formwerkstoffe sind kleine Fehlstellen, wie z. B. Luftblasen, die durch das Rühren in den Werkstoff eingebracht werden.

Eine inhomogene Verteilung der Cu-Bestandteile führt zu inhomogenen thermischen Stoffeigenschaften. Dies wiederum führt zu einer Verfälschung des instationären Temperaturfeldes in den Werkzeugen.

5.8.4 Fehler in der Durchführung des Modellprozesses

Bei der Durchführung des Modellprozesses treten Fehler hauptsächlich infolge ungünstiger Stoffwerte des Glas-Modellstoffes auf. Da die Nitratmischung als Modellstoff mit ca. 0,4 bis 0,5 W/(m K) eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt, ist es sehr schwer sie homogen temperiert bereitzustellen. Durch konduktive Beheizung treten unweigerlich Temperaturspitzen nahe der Heizelemente auf, während der Modellstoff in größerer Entfernung vom Heizelement noch deutlich kälter ist. Eine genaue, homogene Temperierung ist jedoch notwendig, da der Erstarrungsvorgang, der im Originalprozeß in einem Temperaturbereich von ca. 250 K abläuft, nun nur noch 25 K durchläuft.

Als bestmögliche Lösung zur Temperierung des Modellstoffes stellte sich das Überhitzen und anschließende langsame Abkühlen bereits portionierter Mengen heraus. Trotzdem liegt die Ungenauigkeit bei der Temperatureinstellung der Modell-Glasposten bei ca. 3%.

Eine weitere Fehlerquelle, wenn auch im Vergleich zum Problem der Temperierung um eine Größenordnung geringer, ist die Einhaltung der zeitlichen Prozeßvorgaben. Im Vergleich zu den exakt reproduzierbaren Zyklen des automatisierten Originalprozesses wurde der Modellprozeß teilweise manuell betrieben und weist deshalb leicht schwankende Zykluslängen auf. Der Preßvorgang selbst ist davon nicht betroffen, da die Presse auch im Modellprozeß automatisch angesteuert wurde. Bei der Entnahme kann es jedoch z. B. durch Schwierigkeiten bei der Entformung des Produktes zu Verzögerungen kommen. Durch den zeitlichen Maßstab, der zu einer fast 6,5fachen Verlängerung des gesamten Prozesses führt, sind diese Verzögerungen im Vergleich zur gesamten Zykluszeit jedoch gering. Sie betragen nicht mehr als 2%.

5.9 Erfahrungen mit dem Modellprozeß

Neben den meßbaren physikalischen Größen des Prozesses resultiert aus dem Prozeß ein Produkt, das zur Beurteilung des Prozesses herangezogen werden kann. Das folgende Bild zeigt die Original-Schale:



Abb. 5-21: Original-Schale mit 125 mm Durchmesser

Ein Vergleich mit einem Produkt aus dem Modellprozeß zeigt, wie aus dem Originalprozeß bekannte Produktionsfehler auch im Modellprozeß am Glas auftreten. Aus dem Originalprozeß bereits bekannte Ursache-Wirkung-Zusammenhänge bleiben im Modellprozeß erhalten.

Abb. 5-22 zeigt eine Schale, die mit dem Modellprozeß erzeugt wurde. Die Schale wurde zu Beginn einer Versuchsreihe mit noch kalten Preßwerkzeugen erzeugt. Sie zeigt die für diesen Fall typischen Glasfehler wie Fließwellen und Einlegemarken. Die

ebenfalls auftretenden Lufteinschlüsse haben dagegen nichts mit dem Prozeß zu tun, sondern stammen wahrscheinlich noch aus Rührvorgängen im Modellstoff selbst. Mit der Erwärmung der Form über mehrere Preßzyklen hinweg verschwinden sowohl Fließwellen als auch Einlegemarken.

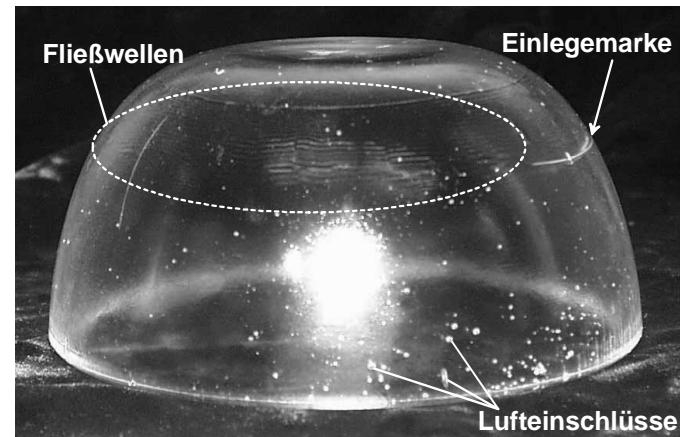


Abb. 5-22: Schale der gleichen Größe aus dem Modellprozeß (auf dem Kopf stehend). Das Glas wurde in eine zu kalte Form gepreßt und zeigt typische Glasfehler.

Neben den physikalisch meßbaren Daten bietet das aus dem Modellprozeß hervorgehende Produkt die Möglichkeit, den Prozeß zu evaluieren. Nur über Beurteilung des Produktes ist es beispielsweise gelungen, falsche Ausgangsdaten (zu niedrige Einlegetemperatur) festzustellen und durch Versuche zu korrigieren. Im Rahmen dieser Versuche wurden die geeigneten Parameterwerte anhand des Produktes ermittelt. Zielgröße war dabei ein intaktes Produkt aus dem Modellprozeß zu erhalten. Die mit dem Modellprozeß festgestellte notwendige umgerechnete Einlegetemperatur stimmte mit der tatsächlichen des Originalprozesses auf ein Prozent genau überein. Die auf das Niveau des Originalprozesses umgerechneten Preßzeiten und -kräfte deckten sich ebenfalls mit den Werten des Originalprozesses.

Die beschriebenen Versuche wurden von einem produktionserfahrenen Meister durchgeführt. Aufgrund seiner bisher in der Produktion gewonnenen Kenntnisse und Erfahrungen war er ohne weiteres in der Lage, die Versuchsanlage auf Anhieb zu bedienen und sogar das zuvor beschriebene Modell des Produktionsprozesses der Original-Schale zu optimieren. Die Optimierung wurde, wie an der Produktionslinie, aufgrund der Beurteilung des Produktes und ohne nähere Prüfung der erhaltenen Meßwerte durchgeführt. Dabei zeigten sich weitere phänomenologische Übereinstimmungen zwischen Modell- und Originalprozeß. Beispielsweise war es im Modell möglich, das Ablöseverhalten der Glasschalen aus der Form zu beobachten. Dies geschieht in beiden Prozessen durch thermische Volumenkontraktion beim Abkühlen des Glases. Auch spannungsmechanisch war das Verhalten der Modellschalen qualitativ mit den Orig-

nalschalen vergleichbar. Die Modellschale sprangen, wenn man sie unmittelbar nach dem Entformen auf eine kalte, gut wärmeleitende Unterlage stellte. Die Ausbreitung der Sprünge und ihr lokales Auftreten im Glas stimmte qualitativ ebenfalls mit Erkenntnissen aus dem Originalprozeß überein. Damit sind Ursache-Wirkung-Zusammenhänge des Glaspresßprozesses im Modellprozeß so gut erhalten, daß rein über eine phänomenologisch-produktorientierte Optimierung die richtigen Maschinenparameter gefunden werden können. Dies ist ein starkes Indiz dafür, daß das ähnlichkeitstheoretische Prozeßmodell den originalen Prozeß in allen seinen wesentlichen Bestandteilen korrekt abbildet.

5.10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Nach der beispielhaften Anwendung und der technischen Beurteilung des Einsatzes einer ähnlichkeitstheoretischen Versuchsanlage in der Produktionstechnik soll nun dessen Wirtschaftlichkeit diskutiert werden. Dazu werden die Kosten des Einsatzes der ähnlichkeitstheoretischen Versuchsanlage mit denen der bisherigen Versuchsdurchführung an der Produktionsanlage im Rahmen einer Kostenvergleichsrechnung betrachtet. Eine Kostenvergleichsrechnung wird hier anderen statischen Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung (Gewinnvergleichsrechnung, Rentabilitätsrechnung, Amortisationsrechnung) vorgezogen, da den betrachteten betrieblichen Vorgänge zwar Kosten, jedoch keine Umsätze zugerechnet werden können. Über den im Rahmen einer Kostenvergleichsrechnung zu betrachtenden Nutzen der Versuchsanlage werden in Absprache mit industriellen Anwendern der Anlage realistische Annahmen getroffen.

5.10.1 Kosten der Versuche am Originalprozeß

Die Kosten der Versuchsdurchführung werden durch eine Betrachtung der Produktionsvollkosten je produzierte Schale zuzüglich der Formkosten für die Versuchsdurchführung abgeschätzt. Die Vollkosten pro Schale in der Produktion betragen nach Angaben des Herstellers DM 0,84 ohne Veredelung und Verpackung. In den Kosten sind demnach alle Arbeitsschritte berücksichtigt, die auch im Versuchsbetrieb tatsächlich durchgeführt werden. Eine Aufschlüsselung der Kostenanteile zeigt Abb. 5-23.

Durch den Versuchsbetrieb (Bemusterung) wird die Kostenstruktur gegenüber der normalen Produktion leicht verändert: Das im Versuch verbrauchte Glas bleibt erhalten, d. h. Materialkosten sind nicht zu berücksichtigen. Zwar wird der Energieaufwand beim wiederholten Einschmelzen von Glas gegenüber der Energimenge, die für ein Aufschmelzen von Gemenge benötigt wird, reduziert, jedoch wird die Schmelzwanne mit Rücksicht auf die Produktqualität in der Regel mit konstantem Scherbenanteil betrieben. Folglich sind die Energieeinsparungen durch wiederholtes Einschmelzen bereits in den Energiekosten berücksichtigt. Zusätzlich gilt die Annahme, daß für den Versuchsbetrieb kein zusätzliches Personal benötigt wird, sondern die Versuche vom

Linienpersonal durchgeführt werden. Damit ergeben sich zu berücksichtigende Produktionskosten je Schale von DM 0,78.

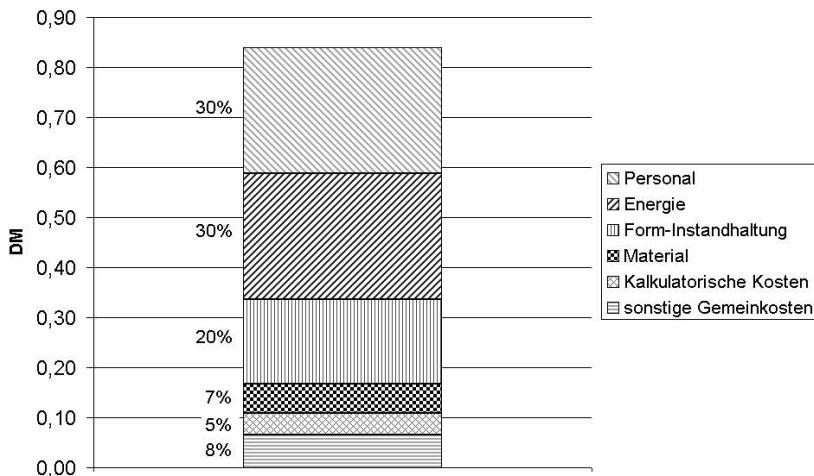


Abb. 5-23: Zusammensetzung der Produktionskosten einer Schale.

Der Versuchsbetrieb zur Bemusterung einer neuen Form besteht in der Regel aus drei Versuchsläufen mit einer Dauer von je drei Stunden. Eine Produktionsanlage mit vier Formen stellt in dieser Zeit mit einer Zyklusdauer von einer Minute vier Schalen pro Minute her. Dies ergibt in den neun Stunden produktionsbedingte Versuchskosten von $9 \times 60 \text{ min} \times 4 \text{ St./min} \times 0,78 \text{ DM/St.} = \text{DM } 1684,80$.

Zu dieser Summe sind die versuchsbedingten Werkzeugkosten zu addieren. Für eine Bemusterung wird ein vollständiger Satz produktionstauglicher Formwerkzeuge hergestellt. Die bemusterten Werkzeuge sind zwar für einen späteren Einsatz in der Produktion vorgesehen, durch den Versuchsbetrieb wird jedoch in der Regel Modifikationsbedarf der Werkzeuge ermittelt, dessen Realisierung zu weiteren Kosten führt. Die Modifikationen können vom Anbringen zusätzlicher Bohrungen bis zum Totalverlust des Formensatzes reichen. Durch den frühen hohen Kapitaleinsatz in Form produktionstauglicher Werkzeuge geht das Unternehmen ein erhöhtes Risiko ein. Dieses Risiko wird nach Absprache mit dem Hersteller mit 30% der Formsatzkosten bewertet. Ein Werkzeugsatz zur Produktion der vorgestellten Schale kostet in seiner Herstellung DM 20.000,-- demnach resultiert daraus ein Risiko von ca. DM 6.600,--. Zusammen mit den Betriebskosten der Produktionsanlage (DM 1684,80) belaufen sich die Kosten der hier beispielhaft vorgestellten Bemusterung auf abgerundet DM 8250,--.

Aufgrund der geometrischen Einfachheit der Form liegen die angegebenen Formkosten am unteren Ende des möglichen Spektrums. Es treten über die gesamte Werkzeug- bzw. Produktpalette Formkosten bis zu DM 50.000,-- auf. Aus den gleichen Gründen liegen die Stückkosten der Schale niedriger als der Durchschnitt. Es sind Stückkosten für komplexe Produkte bis zu DM 4,-- möglich.

5.10.2 Kosten der Versuche an der Versuchsanlage

Den Kosten der Bemusterung an der Original-Produktionsanlage, die durch die Ähnlichkeitstheoretische Versuchsanlage eingespart werden können, stehen die Kosten des Versuchsbetriebs an der Ähnlichkeitstheoretischen Versuchsanlage gegenüber. Die Kosten der Versuchsdurchführung dort setzen sich aus den Betriebskosten der Anlage sowie aus versuchsbedingten Einmalkosten zusammen:

$$\text{Versuchskosten} = \text{Betriebskosten} + \text{versuchsbedingte Einmalkosten} \quad \text{Gl. 39}$$

Betriebskosten

Die Betriebskosten werden über einen Arbeitsstundensatz errechnet. Dieser errechnet sich nach Warnecke u. a. (1993, S. 74) aus dem Maschinenstundensatz und dem Lohn für das Bedienungspersonal pro Stunde. Für den Maschinenstundensatz geben Warnecke u. a. (1993, S. 77) folgende Gleichung an:

$$K_{MH} = \frac{K_A + K_Z + K_R + K_E + K_I}{T_N} \quad \text{Gl. 40}$$

mit

K_{MH} : Maschinenstundensatz in DM/h

K_A : Abschreibungskosten/Jahr

K_Z : Zinskosten/Jahr

K_R : Raumkosten/Jahr

K_E : Energiekosten/Jahr

K_I : Instandhaltungskosten/Jahr

T_N : Jährliche Nutzungszeit

Für die jährliche Nutzungszeit T_N wird angenommen, daß die Anlage für ca. 20 Produktentwicklungen im Jahr in Anspruch genommen wird. Dies entspricht in etwa dem Entwicklungspotential eines mittelständischen glasproduzierenden Unternehmens. Jede Versuchsdurchführung dauert im Mittel drei Schichttage, das entspricht 24 h. Somit erhält man eine jährliche Nutzungszeit von $T_N = 480$ h.

Die Anlage wird als Versuchsanlage über einen Zeitraum von fünf Jahren abgeschrieben. Der Wiederbeschaffungswert der Anlage beträgt DM 30.000,--. Dies ergibt jährliche Abschreibungskosten von $K_A = 6.000,--$ DM.

Zur Berechnung Kalkulatorischen Zinsen K_Z wird ein Zinssatz von 5,5% angenommen. Die Kalkulatorischen Zinsen selbst berechnen sich aus dem halben Wiederbeschaffungswert, multipliziert mit dem Zinssatz. Im vorliegenden Fall bedeutet dies $K_Z = 15.000,-- \text{ DM} \times 0,055 = 825,-- \text{ DM}$.

Die Grundlage zur Berechnung der Raumkosten der Versuchsanlage bilden die Grundfläche der Anlage sowie die flächenbezogenen Raumkosten (Mietzins). Der Flächenbedarf der Anlage beträgt ca. 20 m². Der Preis pro Quadratmeter Industriefläche in außerstädtischen Industriegebieten beträgt ca. 150 DM/Jahr. Somit ergeben sich Raumkosten in Höhe von $K_R = 3.000,-- \text{ DM}$ pro Jahr.

Die Energiekosten berechnen sich aus dem Energieverbrauch der Anlage, multipliziert mit dem aktuellen Strompreis. Derzeit beträgt der Strompreis tagsüber für Gewerbe DM 0,44/KWh. Die Anlage selbst hat eine maximale Leistungsaufnahme von insgesamt 4 KW. Die mittlere Leistung der Anlage liegt bei 2 KW. Mit der jährlichen Nutzungszeit ergeben sich somit maximale Energiekosten von

$$K_E = 480 \text{ h/Jahr} \times 2 \text{ KW} \times 0,44 \text{ DM/KWh} = 422 \text{ DM/Jahr}$$

Die Kosten für Instandhaltung und Wartung K_I werden von *Warnecke u. a. (1993, S. 79)* auf Basis der kalkulatorischen Abschreibung K_A berechnet. Die kalkulatorische Abschreibung wird dabei mit einem Faktor multipliziert. Er beträgt für Produktionsanlagen etwa 0,5. Um den erhöhten Wartungsbedarf einer Versuchsanlage zu berücksichtigen wird hier ein Faktor von 0,7 angewandt. K_I beträgt deshalb 70 % von K_A . Dies sind im vorliegenden Fall $K_I = 4.200,-- \text{ DM/Jahr}$.

Aus Gl. 40 errechnet sich somit ein Maschinenstundensatz von:

$$K_{MH} = \frac{6.000 + 825 + 3.000 + 422 + 4.200}{480} \approx 30 \text{ DM/h}$$

Zu dem Maschinenstundensatz ist der stundenbezogene Lohn für das Bedienpersonal zu addieren, um schließlich den Arbeitsstundensatz zu erhalten. Nach einer Anlauf- und Einarbeitungsphase kann die Anlage von einem produktionserfahrenen Meister bedient werden. Dieser benötigt jedoch einen Werker zu seiner Untersützung. für den Meister werden 60,-- DM/h veranschlagt, für den Gehilfen 40,-- DM/h. Aus den Lohnkosten und dem Maschinenstundensatz folgt ein Arbeitsstundensatz von 60DM/h + 40DM/h + 30DM/h = 130,-- DM/h.

Versuchsbedingte Einmalkosten

Die versuchsbedingten Einmalkosten setzen sich aus Kosten für den verwendeten Modellstoff und aus Kosten für den Werkzeug- und Formenbau zusammen.

Die Kosten für den Modellstoff betragen unter der Annahme einer eingesetzten Menge von 10 kg sowie einer Gesamtnutzungsdauer von einem Jahr 50,-- DM/Versuch.

Die Kosten für den Werkzeug- und Formenbau resultieren im wesentlichen aus den Materialkosten, da es sich um einen abgießbaren Werkstoff handelt und Positivformen für den Abformprozeß aus dem Produktentwicklungsprozeß ohnehin abfallen. Es wer-

den zwei Stunden Nachbearbeitung angesetzt. Somit setzen sich die Werkzeugkosten aus DM 200,-- Materialkosten und DM 200,-- Kosten für Nachbearbeitung zusammen. Diese Kosten werden wie die Kosten des Originalwerkzeuges mit einem Risikoauflschlag für eventuelle Modifikationen versehen. Dieser wird ebenso wie für die Versuche am Originalprozeß mit 30% angesetzt, da die Nacharbeit an den Modellformen durch den plastischen bzw. abgießbaren Formwerkstoff einen deutlich verringerten Maschineneinsatz erfordert. Somit sind aus dem Werkzeug- und Formenbau Kosten in Höhe von $(200 \text{ DM} + 200 \text{ DM}) \times 1,3 = 520,-- \text{ DM}$ anzusetzen.

Die versuchsbedingten Einmalkosten betragen somit $520 + 50 = \text{DM } 570,--$.

Tatsächlich entstehen aus der Versuchsdurchführung an der ähnlichkeitstheoretischen Anlage demnach Kosten in Höhe von $24\text{h} \times 130\text{DM/h} + 570\text{DM} = \text{DM } 3.690,--$.

5.10.3 Kostenvergleich

Nach Auswertung der ersten Versuche mit der im Kap. 5 vorgestellten Anlage erschien es nach Absprache mit Vertretern aus der Industrie realistisch, daß durch den Einsatz der ähnlichkeitstheoretischen Versuchsanlage zwei von drei Bemusterungsläufen eingespart werden könnten. In einer ersten Näherung, unter der Voraussetzung, daß das Risiko für Modifikationen im selben Maße sinkt, entsteht durch die ähnlichkeitstheoretische Versuchsanlage im vorliegenden Fall ein Einsparpotential von $0,66 \times 8.250 \text{ DM} = 5.450,-- \text{ DM}$.

Durch den Einsatz der ähnlichkeitstheoretischen Versuchsanlage erhält das Unternehmen innerhalb der eingesparten Versuchszeit die Möglichkeit, die ansonsten durch Versuche belegte Produktionsanlage zur Wertschöpfung zu nutzen. Dadurch entsteht ein zusätzlicher Gewinn, der von den Kosten der ähnlichkeitstheoretischen Versuchsanlage abzuziehen ist. Der zusätzliche Gewinn wird anhand einer angenommenen Umsatzrendite auf Basis der Produktionskosten abgeschätzt. Als Umsatzrendite werden 10% angenommen. Dieser für die produzierende Industrie hoch erscheinende Wert wurde so gewählt, um die Veredelung des Produktes zu berücksichtigen, die ja in der Berechnung der Produktionskosten nicht enthalten ist. Die Produktionskosten während der sechs Stunden eingesparter Zeit betragen auf Basis der Stückkosten von DM 0,84 (ohne Verpackung und Veredelung) $0,66 \times 9 \times 60 \text{ min} \times 4 \text{ St./min} \times 0,84 \text{ DM/St.} = 1197,-- \text{ DM}$. Der zusätzliche Gewinn beläuft sich also auf ca. DM 120,--. Die effektiven Kosten für die Versuchsdurchführung an der experimentellen Anlage betragen demnach DM 3.570,--.

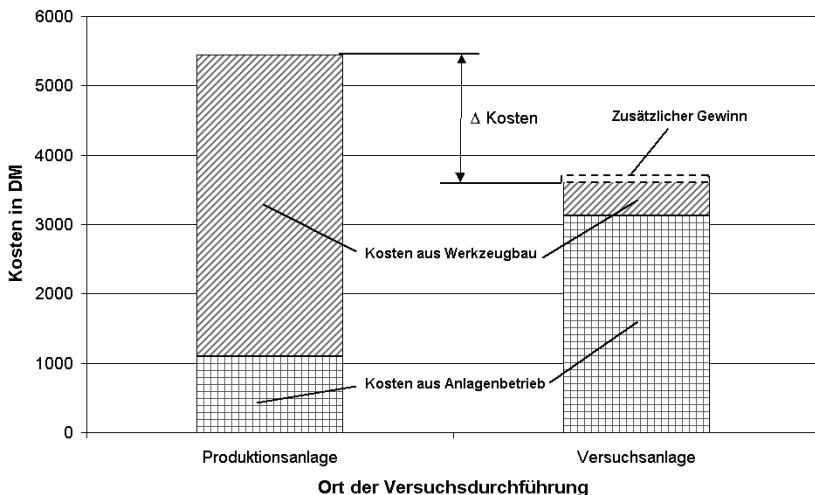


Abb. 5-24: Vergleich der sich direkt gegenüberstehenden Kosten der Versuchsdurchführung.

Somit stehen den Versuchskosten an der Produktionsanlagen in Höhe von DM 5.450,-- Kosten an der ähnlichkeitttheoretischen Versuchsanlage in Höhe von DM 3.570,-- gegenüber (s. Abb. 5-24). Dies entspricht einer Einsparung von DM 1.880,-- für den vorgestellten Versuch. Dabei gilt es zu berücksichtigen, daß die Versuchskosten an der Originalanlage extrem niedrig sind, da es sich bei der gezeigten Schale um ein geometrisch und technologisch einfaches Produkt handelt. Für komplexere Produkte können sowohl die Stück- als auch die Werkzeugkosten um mehr als 100% steigen. Eine ähnliche Steigerung der Kosten ist für die Versuchsanlage gerade aufgrund der abformbaren Werkzeuge nicht zu erwarten. Aus diesem Grunde kann die Höhe der durch Versuche eingesparten Summe in Zukunft eher steigen als sinken.

6 Konzept des Process Prototyping

Im Rahmen dieser Arbeit wurde bisher die Nutzung der Ähnlichkeitstheorie als Methode zur Modellierung produktionstechnischer Prozesse behandelt. In den folgenden Kapiteln wird sie im Kontext mit anderen Modellbildungsmethoden betrachtet. Wie in Kap. 2.3 gezeigt wurde, sind bereits Verfahren bekannt, mit deren Hilfe man prototypenhafte Modelle von produktionstechnischen Prozessen erstellen kann. Aus einer Positionierung der Ähnlichkeitstheorie in der Landschaft der Modellbildungsmethoden erwächst die Idee des Process Prototyping, d. h. dem systematischen Arbeiten mit Prozeßprototypen. Der Ansatz des Process Prototyping auf Prozeßebene ist bezüglich seiner Auswirkungen auf Simultaneous Engineering in Analogie zum Rapid Prototyping auf Produktalebene zu verstehen. Durch die Verfahren des Rapid Prototyping hat der Simultaneous-Engineering-Ansatz bereits wirkungsvolle Impulse erhalten (*Eversheim u. a. 1996, S. 3-23*).

Es existieren bereits einige Arbeiten auf dem Gebiet der Untersuchung produktions-technischer Prozesse anhand von Modellen. Diese Arbeiten haben jedoch den Charakter von singulären Lösungen in dem Sinne, daß ein bestehendes Problem durch die Anwendung einer Methode behandelt wird. Eine systematische Methodenauswahl wird nicht vorgenommen, Hilfsmittel dazu existieren offenbar nicht. Es wird deshalb versucht, mit Process Prototyping ein solches Hilfsmittel zur systematischen Auswahl und Anwendung von Modellbildungsverfahren auf konzeptioneller Ebene zu entwerfen.

Die in Kap. 2.4 geschilderten Defizite des Standes der Technik im Hinblick auf den Reifegrad von Prozeßentwicklungen sollen durch den systematischen Einsatz von Prozeßprototypen überwunden werden. Mit Process Prototyping soll langfristig ein Werkzeug konzipiert werden, das die schnelle Erzeugung und sinnvolle Nutzung von Prozeßprototypen ermöglicht. Im Rahmen dieser Arbeit, deren Schwerpunkt auf der Ähnlichkeitstheorie als Methode ruht, stellt Process Prototyping eine Einordnung der Ähnlichkeitstheorie unter bestehende, äquivalente Modellbildungsmethoden dar.

6.1 Leistungsumfang von Process Prototyping

Vor dem Hintergrund eines breiten Einsatzes von Prozeßprototypen in der Industrie kommt es vor allem auf folgende Aspekte an:

- Die Modelluntersuchungen müssen technisch möglich sein.
- Die Modelluntersuchungen müssen wirtschaftlich sinnvoll sein.

Der geplante Einsatzzweck von Process Prototyping ist die schnelle Erzeugung von Prozeßprototypen, um so frühzeitig Erkenntnisse über produktionstechnische Prozesse bei deren Entwicklung erlangen zu können. Dazu werden geeignete Modellbildungsverfahren benötigt.

Darüber hinaus sollen im Hinblick auf eine betriebliche Anwendung der Technologie nicht nur Simulationsanwender in der Lage sein, Modelluntersuchungen durchzuführen, sondern auch weniger qualifiziertes Personal. Process Prototyping muß deshalb eine Hilfestellung zur problemgerechten Auswahl einer Modellbildungsmethode geben.

Auf die Auswahl folgt die Anwendung der Methode. In diesem Bereich muß Process Prototyping Anwendungswissen bereitstellen. Aus diesem Wissen um den Umgang und der Anwendung mit der Methode ergeben sich Anforderungen an die Qualifikation der Nutzer.

Schließlich ist Process Prototyping für den Einsatz in Unternehmen vorgesehen. Aus den individuellen Umständen in den einzelnen Unternehmen ergeben sich unterschiedliche Anforderungen, ob und wie Process Prototyping in einem Unternehmen eingesetzt und in bestehende Abläufe integriert werden kann.

Dementsprechend ergeben sich auf konzeptioneller Basis vier übergeordnete Leistungsbereiche, die Process Prototyping abdecken muß:

- Bereitstellung geeigneter Methoden
- Erkenntnisse in der Methodenanwendung
- Hilfestellung zur problemgerechten Auswahl einer Methode
- Integration von Process Prototyping in betriebliche Abläufe

Abb. 6-1: Leistungsbereiche des Process Prototyping auf konzeptioneller Basis.

6.2 Methodenbereitstellung

Wie im Stand der Technik dargestellt wurde, existieren bereits einige in Frage kommende Modellierungsmethoden. Diese bilden die operative Basis innerhalb des Process Prototyping. Aus den vorgestellten Methoden müssen diejenigen ausgewählt werden, die die Erstellung von Modellen mit Prototypenqualität ermöglichen. Zu der Auswahl bedarf es einer zielführenden Systematik.

Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz erstellt ausgehend von der vorgestellten Begriffsdefinition der Prototypen eine Anforderungsliste. Eventuell ist es erforderlich, die einzelnen Punkte der Anforderungsliste unterschiedlich zu gewichten. Diese Anforderungsliste wird dann mit den Leistungsmerkmalen der Modellbildungsverfahren ver-

glichen. Ausgehend von den Ergebnissen dieses Vergleichs können die einzelnen Modellierungsmethoden hinsichtlich ihrer Tauglichkeit objektiv bewertet und als Process-Prototyping-Methode identifiziert werden.

6.3 Methodenanwendung

Die ausgewählten Methoden müssen hinsichtlich ihrer Anwendung und Handhabung qualifiziert werden. Der Fokus dieser Arbeit ruht dabei auf der Ähnlichkeitstheorie. Diese wurde bisher innerhalb der Produktionstechnik kaum genutzt. Unter einer Qualifizierung einer Methode für einen bestimmten Einsatzbereich wird die Darstellung einer Vorgehensweise verstanden, die die besonderen Rahmenbedingungen und Anforderungen des Einsatzbereiches berücksichtigt. Der Einsatzbereich der Ähnlichkeitstheorie, auf den sich diese Arbeit konzentriert, ist die Modellierung diskontinuierlicher Produktionsprozesse. Mit Blick auf die anwendungsorientierte Ausrichtung des Gesamtkonzeptes für Process Prototyping soll aus der Qualifizierung der Ähnlichkeitstheorie eine Handlungsanweisung für den Einsatz der Methode innerhalb der Produktionstechnik erwachsen.

Solide Kenntnisse und Erfahrungen in der Anwendung und im Gebrauch der Modellierungsmethoden sind die Grundlage, auf denen weitere Forschungsarbeiten ansetzen können. Diese müssen dann das Ziel haben, systematisches Wissen über die problemgerechte Auswahl von Modellierungsmethoden zu erarbeiten.

6.4 Methodenauswahl

Eine schnelle, sichere und erfolgversprechende Anwendung der Modellierungsverfahren benötigt eine Systematik, die erlaubt, für eine gegebene Problemstellung die richtige Methode auszuwählen.

In der vorliegenden Arbeit geht es um die Modellierung produktionstechnischer Prozesse. Es muß daher der Einfluß der Art und Charakteristik des zu untersuchenden Prozesses auf die Wahl des Modellbildungsverfahrens berücksichtigt werden und in der Problembeschreibung zum Ausdruck kommen.

6.5 Integration in betriebliche Abläufe

Auf die Integration von Process Prototyping in bestehende betriebliche Abläufe wird nur kurz eingegangen. Dies erfolgt aus zwei Gründen: erstens übersteigt die Ausarbeitung einer Vorgehensweise zur Eingliederung einer Technologie, die selbst wieder

aus mehreren geschlossenen Methoden besteht, in betriebliche Abläufe den Rahmen dieser Arbeit. Zweitens, und hier handelt es sich um den wesentlichen Grund, liegt augenblicklich im Bereich der Ähnlichkeitstheorie zu wenig Wissen über die Anwendung innerhalb der Produktionstechnik vor, als daß daraus bereits Schlüsse für eine Integration in betriebliche Abläufe gezogen werden könnten.

Die Zielsetzung der Arbeit (s. Kap. 1.2) dient der unter anderem der Absicherung der Prozeßplanung und -entwicklung im Sinne einer integrierten Produkt- und Prozeßentwicklung. Process Prototyping als Hilfsmittel dient dabei dazu, den Reifegrad der Prozeßentwicklung frühzeitig auf hohem Niveau abzusichern. Process Prototyping besitzt somit eine langfristige Ausrichtung auf einen dauerhaften Einsatz in der Industrie. Für eine Integration von Process Prototyping in betriebliche Abläufe müssen zunächst Prozeßketten in der Industrie identifiziert werden, in denen eine Integration von Process Prototyping sinnvoll erscheint. Darüber hinaus müssen die identifizierten Prozeßketten nach einer möglichen Art und Weise der Integration untersucht werden. Konkret bedeutet dies, Abläufe bestehender betrieblicher Prozesse zu verändern, bzw. neue Abläufe zu definieren.

Auf einem detaillierteren Niveau betrachtet, lässt sich der Begriff des Ablaufs in seine Bestandteile gliedern: eine Ablaufvorschrift gibt Anweisungen, wer wann was zu tun hat. Dementsprechend umfassen Abläufe das benötigte Personal und dessen Qualifikation, die Arbeitsinhalte und deren zeitliche Abfolge. In der Regel sind mehrere Personen mit unterschiedlichen Arbeitsinhalten an einem Prozeß beteiligt. Daher müssen neben der Abarbeitung von Arbeitsinhalten auch benötigte Informationen zeitlich und lokal korrekt vorliegen. Aus diesem Grunde kommt den Schnittstellen innerhalb eines Ablaufs eine wichtige Bedeutung zu. Für eine Integration von Process Prototyping in betriebliche Abläufe müssen demzufolge die folgenden Punkte berücksichtigt bzw. Fragen beantwortet werden:

- Welches Ziel verfolgt, bzw. welche Teilziele beinhaltet der Ablauf?
- Welche Teilziele können durch Process Prototyping erreicht werden?
- In welche Arbeitsinhalte lässt sich der Ablauf sinnvoll aufteilen?
- In welcher Reihenfolge müssen die Arbeitsinhalte abgearbeitet werden?
- Welche Schritte können parallelisiert werden?
- Welche Personalstruktur hinsichtlich Anzahl und Qualifikation wird benötigt?
- Wie sieht der Informationsfluß zwischen den Arbeitspaketen aus?
- Wer muß wann welche Informationen an wen übergeben?

6.6 Zusammenfassung des Gesamtkonzeptes

Im Rahmen von Process Prototyping soll ein Methodenbaukasten konzipiert werden, mit dessen Hilfe qualifiziertes Personal ohne besonderes Simulationswissen Prozeßuntersuchungen an Prozeßprototypen durchführen kann. Dazu müssen zunächst geeignete Modellbildungerverfahren identifiziert werden. Dafür werden Kriterien aus der Definition des Prototypenbegriffs mit den Leistungsmerkmalen der Modellierungsverfahren verglichen.

Im weiteren sind die ausgewählten Methoden für ihren Einsatz innerhalb der Produktionstechnik zu qualifizieren. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit bereits für die Ähnlichkeitstheorie durchgeführt.

Darüber hinaus benötigt ein Werkzeug wie Process Prototyping ein systematisches Verfahren zur problemgerechten Auswahl geeigneter Modellbildungsmethoden. Das Wissen aus der Methodenanwendung ist dabei ein Baustein, aus dem Kriterien abgeleitet werden können, anhand derer eine Modellierungsmethode aus dem Methodenbaukasten problemgerecht ausgewählt werden kann.

Nach einer Absicherung des erarbeiteten Wissens soll Process Prototyping in betriebliche Abläufe integriert werden, und so in der industriellen Praxis dauerhaft einen Beitrag zur Verbesserung der Prozeßentwicklung leisten, beispielsweise im Sinne einer integrierten Produktentwicklung.

Das Konzept des Process Prototyping zeigt Abb. 6-2:

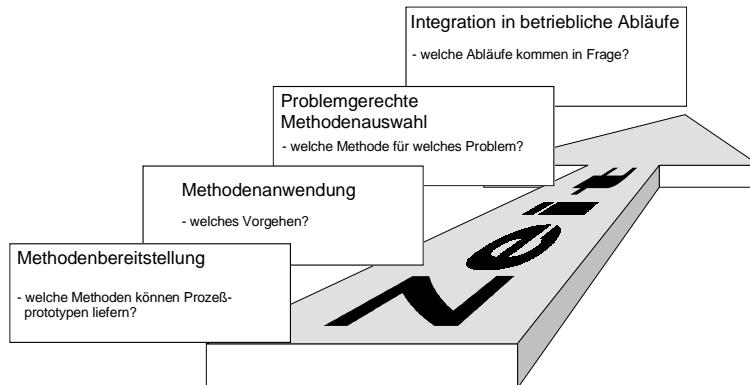


Abb. 6-2: Vierstufiges Konzept des Process Prototyping.

7 Entwurf des Process Prototyping

In diesem Kapitel wird das zuvor vorgestellte Konzept von Process-Prototyping näher detailliert. Dies betrifft vor allem die Punkte Methodenbereitstellung und Problem-gerechte Methodenauswahl.

Ausgehend von der Begriffsdefinition des Prozeßprotoypen wird eine Anforderungs-liste erarbeitet, anhand derer Modellbildungsmethoden als Process-Prototyping-Ver-fahren identifiziert werden können.

Für die so festgestellten Process-Prototyping-Verfahren wird eine Systematik zur pro-blemgerechten Methodenauswahl skizziert. Diese orientiert sich an den charakteristi-schen Leistungsmerkmalen und Schwachstellen der Verfahren. Eine graphische Übersicht über die Inhalte dieses Kapitels zeigt Abb. 7-1:

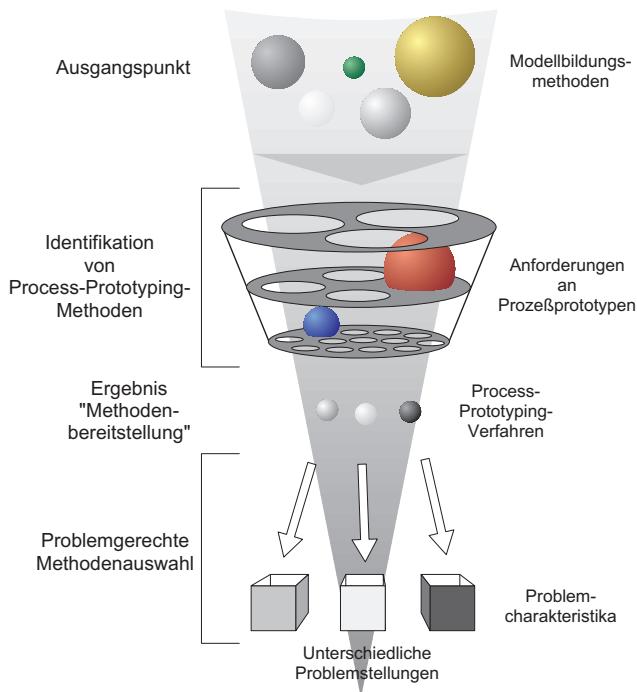


Abb. 7-1: Vorgehensweise in Kapitel 7. Die Schwerpunkte ruhen auf der Identifikation von Process-Prototyping-Methoden und deren problemgerechter Auswahl im Bedarfsfall.

7.1 Anforderungsliste für Process-Prototyping-Verfahren

In Kap 2.3 wurden einige Modellbildungsverfahren erläutert, die für die Erstellung von Prozeßprototypen in Frage kommen. Im folgenden soll eine Anforderungsliste für Modellierungsverfahren erstellt werden, mit deren Hilfe sich Modellierungsverfahren als prototypentauglich identifizieren lassen. Dazu wird die in Kap. 2.1 erarbeitete Begriffsdefinition herangezogen.

Eine erste wichtige Erkenntnis aus der Begriffsdefinition des Prozeßprototypen ist die Freiheit des Nutzers in der Wahl des Modellbildungsverfahrens zur Erzeugung eines Prozeßprototypen. Sie gestattet die im folgenden durchgeführte Auswahl geeigneter Verfahren aus einer Vielzahl unterschiedlicher Modellierungsmethoden.

Eine implizit in der Definition der Modellierung technischer Prozesse enthaltene Anforderung ist, daß Modelle experimentierfähig sein und eine Prozeßuntersuchung abseits und losgelöst vom Serienprozeß ermöglichen sollen. Für Prozeßprototypen als Sonderform der Prozeßmodelle läßt sich diese Anforderung anhand der Begriffsdefinition konkretisieren. Die herausragende Anforderung an Prozeßprototypen ist die Möglichkeit zur Überprüfung möglichst aller wichtigen Prozeßeigenschaften. Dies bedeutet, daß ein Prozeßprototyp die Untersuchung von Merkmalen ermöglichen muß, die für den Ablauf zueinander in Wechselwirkung stehender Vorgänge wesentlich sind. Die Prozeßuntersuchung spielt sich deshalb unmittelbar auf der Ebene der physikalischen Wechselwirkungen ab. Diese werden in Gleichungen durch physikalische Größen beschrieben. Die physikalischen Größen sind in diesem Falle als die oben genannten Merkmale anzusehen. Dies muß in einem Umfang geschehen, der die Offenlegung möglichst aller Schwachstellen der Entwicklung erlaubt. Hier gilt es jedoch zu beachten, daß bei einer Modellbildung immer Abstraktionen vorgenommen werden müssen (s. Kap. 2.2.3). Diese müssen im Falle von Prozeßprototypen besonders kritisch dahingehend überprüft werden, inwieweit sie eine Untersuchung eines Prozeßmerkmals beeinflussen.

Ein weiteres Merkmal der physikalischen Wechselwirkungen eines produktions-technischen Prozesses ist das dabei entstehende Produkt. Das Produkt stellt in bezug auf den Prozeß, aus dem es hervorgeht, einen Informationsspeicher der Prozeßhistorie dar. Im Produkt bilden sich Abläufe und Wechselwirkungen innerhalb des Produktionsprozesses als Resultat ab. Diese Informationen können in vielen Fällen ebenfalls als physikalische Größen quantifiziert oder zumindest phänomenologisch qualitativ abgerufen werden. Betrachtet man beispielsweise einen Prozeß, bei dem ein Produkt durch Pressen einer thermisch erstarrenden Substanz erzeugt wird, lassen sich geometrische Eigenschaften wie Formtoleranz und Oberflächenrauhigkeit direkt meßtechnisch quantifiziert bestimmen. Fehler im Temperaturhaushalt treten dagegen u. U. als Mängel in der Oberflächenbeschaffenheit auf. Diese Mängel weisen somit auf den Prozeßfehler hin, gestatten jedoch nicht notwendigerweise seine direkte Quantifizierung.

Darüber hinaus muß das geplante Anwendungsgebiet von Process Prototyping berücksichtigt werden. Ein Einsatz der Process Prototyping-Verfahren in einem Industriebetrieb setzt voraus, daß abgesehen von der Modellerstellung zumindest das Experimentieren mit dem Modell kein Experten- sondern höchstens qualifiziertes Zusatzwissen erfordert.

Zusammenfassend lassen sich nun die wesentlichen Anforderungen an ein prototypenhaftes Prozeßmodell angeben. Diese stellen gleichzeitig die Anforderungen an die Modellierungsmethode dar:

- | |
|--|
| ➤ Experimentierfähigkeit |
| ➤ Erkenntnisgewinn abseits der Serienfertigung |
| ➤ Kein Expertenwissen für Versuchsdurchführung nötig |
| ➤ Physikalische Wechselwirkungen als operative Ebene |
| ➤ Quantitative Bestimmung der prozeßrelevanten physikalischen Größen |
| ➤ Erfassung möglichst aller relevanten Prozeßeigenschaften |

Abb. 7-2: *Anforderungen an ein Modellbildungsverfahren mit Prototypenqualität.*

7.2 Auswahl von Modellbildungsverfahren

Im folgenden werden die in Kap. 2.3 vorgestellten Methoden mit den Anforderungen an die Modellbildungsverfahren verglichen, die sich bezüglich der Erzeugung von Prozeßprototypen ergeben. In die Beurteilung fließen darüber hinaus weitere methoden-spezifische und produktionstechnische Aspekte ein, um zu einer umfassenden Aussage über die Tauglichkeit eines Verfahrens im Sinne des Process Prototyping zu gelangen.

7.2.1 Symbolische Modellbildung von Prozessen

7.2.1.1 Finite-Element-Methode

Die Finite-Element-Methode wird in der Produktionstechnik bereits für eine Vielzahl von Aufgaben eingesetzt. Die Abbildungstreue der FEM-Modelle hängt dabei von der gewählten Diskretisierung der Bauteilgeometrie und von der Detaillierung der benötigten geometrieunabhängigen Eingangsdaten ab, wie sie z. B. veränderliche Werkstoffeigenschaften darstellen. Prinzipiell ist es möglich, mit der FE-Methode physikalische Wechselwirkungen in Prozessen zu untersuchen und die beschreibenden Parameter quantitativ zu bestimmen. Dies kann jedoch mit einer erheblichen Zunahme der Rechenzeit verbunden sein, die für die Lösung des Problems benötigt wird.

Ein Problem bei der Erzeugung von Prozeßprototypen durch die Finite-Element-Methode stellt der Umfang der gleichzeitig untersuchbaren Wechselwirkungen dar. Hier bestehen zwar keine methodenimmannten Grenzen, jedoch beschränkt die verfügbare Rechnerleistung die Größe eines Modells. Eine quantitative Aussage über die maximal mögliche Modellgröße in Abhängigkeit von der verfügbaren Rechnerleistung ist schwierig, da die für ein Modell benötigte Rechnerleistung selbst wieder von mehreren Faktoren determiniert wird. Qualitativ gilt, daß eine komplette Prozeßdarstellung durch ein einziges FEM-Modell mit zunehmender Prozeßkomplexität schwieriger wird. Die Prozeßkomplexität steigt beispielsweise mit der Anzahl der Prozeßschritte sowie der Anzahl verschiedenartiger Lastfälle.

Eine Lösung dieses Problems könnte in der Verteilung von Prozeßschritten auf mehrere Einzelmodelle liegen, die dann in ihrer Gesamtheit als Prozeßprototyp aufgefaßt werden können.

Im Augenblick erfordert die Modellerstellung durch die Finite-Element-Methode erhebliches Spezialwissen. Ähnliches gilt für die Experimentvorbereitung. Hierfür existieren jedoch bereits softwaretechnische Lösungen, die aber in ihrer Benutzerfreundlichkeit noch erheblich gesteigert werden können, so daß zumindest eine einfache Experimentvorbereitung -durchführung möglich erscheint.

Von Methodenseite erscheint ein Einsatz der Finite-Element-Methode für den Aufbau von Prozeßprototypen grundsätzlich möglich. Allerdings bestehen hinsichtlich der möglichen Anwendungsfälle aus den oben genannten Gründen Einschränkungen, die aber überwunden werden können.

7.2.1.2 3D-Bewegungssimulation

Die 3D-Bewegungssimulation vermittelt dem Nutzer aufgrund ihrer Möglichkeiten zur Prozeßvisualisierung ein realistisches Bild eines Produktionsprozesses. Allerdings beschränkt sich dieser Eindruck lediglich auf die Bewegungsabläufe innerhalb des Prozesses. Nach dem derzeitigem Stand der Technik vermag die 3D-Simulation nicht oder nur rudimentär in die Bereiche technischer Wechselwirkungen vorzudringen. Prozeßbeschreibende physikalische Größen können abgesehen von der Geometrie und der Kinematik nicht allgemeingültig quantitativ bestimmt werden.

Ein Einsatz der 3D-Simulation zur Erstellung von Prozeßprototypen ist derzeit deshalb nicht für beliebige Prozesse möglich. Damit ist die Verwendungsmöglichkeit der Me-

thode zur Bildung echter Prozeßprototypen stark auf kinematische Prozesse eingeschränkt. Dennoch bietet die 3D-Simulation gerade aufgrund ihrer detailgetreuen Darstellungsmöglichkeiten als Methode für den allgemeingültigen Anwendungsfall eine interessante Ausgangsposition. Es ist wünschenswert, daß durch den technischen Fortschritt gerade auf dem Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung in absehbarer Zeit eine ausreichende Integration der noch fehlenden Funktionalitäten erreicht und schließlich auch innerhalb der 3D-Bewegungssimulation ein quantitativer Zugriff auf physikalische Größen möglich wird. Denkbar ist hier eine Verbindung der 3D-Simulation mit Funktionalitäten der Mehrkörper-Simulation oder der Finite-Element-Methode. Erstere würde die Ermittlung dynamischer Effekte innerhalb eines Prozesses, letztere den quantitativen Zugriff auf nahezu beliebige physikalische Größen innerhalb der am Prozeß beteiligten Komponenten erlauben. Aktuelle Entwicklungen im Bereich Digital Mock Up (DMU) weisen in diese Richtung.

7.2.1.3 Analytische Methoden

Die analytischen Modellierungsmethoden weisen zunächst keine Beschränkung bezüglich des Detaillierungsgrades auf. Gewöhnlich erscheint es durchführbar, sämtliche in einem Prozeß enthaltene Wechselwirkungen mathematisch zu beschreiben. Das kann jedoch durch ein extrem stochastisches oder sogar chaotisches Prozeßverhalten deutlich erschwert werden. Zwar existieren für diese Arten des Prozeßverhaltens Methoden der mathematischen Beschreibung, jedoch sind hieraus konkrete Vorhersagen über den Prozeß nicht möglich. Chaotische und stochastische Systeme sind in ihrem Verhalten nicht deterministisch.

Betrachtet man im folgenden deterministisch beschreibbare Prozesse, so steigt in der Realität die Komplexität des analytischen Modells mit zunehmendem Detaillierungsgrad stark an. Ein steigender Detaillierungsgrad kann neben einer höheren Auflösungstiefe der Prozeßvorgänge auch eine Zunahme der Anzahl der in einem analytischen Modell enthaltenen und abgebildeten Wechselwirkungen bedeuten. Beides resultiert in einer stark ansteigenden Komplexität. Aus wissenschaftlicher Sicht spricht nichts gegen eine Betrachtung zahlreicher Wechselwirkungen in einem einzigen analytischen Modell, jedoch führt dies in der Praxis zu umhandlichen Modellen. Dadurch wird letztendlich die Experimentierfähigkeit eingeschränkt. Hier könnte eine Problemlösung über mehrere einfache Einzelmodelle eher zielführend sein, ähnlich wie in Kap. 7.2.1.1 für die Finite-Element-Methode vorgeschlagen.

Die für die Beschreibung der Wechselwirkungen nötigen physikalischen Größen sind unmittelbar in den Gleichungen des Modells enthalten und damit eindeutig durch Modelluntersuchungen quantifizierbar.

Ein Problem bei der Prozeßuntersuchung anhand analytischer Modelle ist dagegen die Durchführung der Experimente selbst. Experimentdurchführung bedeutet hier Lösung der prozeßbeschreibenden Gleichungssysteme. Diese sind in der Regel ab einem bestimmten Komplexitätsgrad nicht mehr analytisch lösbar, d. h. man muß hier auf nu-

merische Verfahren ausweichen. Dieser kritische Komplexitätsgrad wird bereits durch nicht-lineare oder partielle Differentialgleichungen erreicht (*Close & Frederick 1993*).

Innerhalb der Produktionstechnik wird diese kritische Komplexität von den meisten Prozessen erreicht. Vor diesem Hintergrund müssen analytische Modelle auf jeden Fall mit geeigneten numerischen Lösungsmöglichkeiten gekoppelt werden. Für die Experimentierfähigkeit und die Handhabung des Modells durch Bediener ohne spezielle Simulationskenntnisse ist es unabdingbar, analytische Modelle mit einer Benutzerschnittstelle zu versehen, die eine einfache Eingabe relevanter Prozeßparameter ermöglicht. *Milberg (1971)*, *Zwanzer (1995)* und *Zäh (1995)* haben in ihren Arbeiten gezeigt, daß mit analytischen Methoden eine leistungsfähige Experimentierumgebung zur Untersuchung produktionstechnischer Prozesse geschaffen werden kann. Prinzipiell ist es daher möglich, mit analytischen Methoden einen Prozeßprototypen im Sinne der zuvor genannten Definition zu schaffen. Dabei ist die Modellierung eines Prozesses über ein System von „Black Boxes“, die im Prinzip lediglich eine Systematisierung der Prozeßphänomenologie darstellt, aufgrund der größeren Distanz von den tatsächlich ablaufenden physikalischen Vorgängen kritischer zu sehen als eine Modellierung basierend auf den prozeßbeschreibenden physikalischen Gleichungen.

7.2.2 Körperliche Modellbildung von Prozessen

7.2.2.1 Analogiemethode

Die Analogiemethode ist aufgrund der ihr innewohnenden Systematik prinzipiell geeignet, Modelle ohne Informationsverlust durch Abstraktion zu erzeugen. Dies beruht auf der Tatsache, daß die Anzahl an prozeßbeschreibenden Differentialgleichungen im Modell und im Original identisch ist. Dadurch ist eine hohe Detailtreue gewährleistet. Damit wird andererseits auch eine unmittelbare Untersuchung der physikalischen Wechselwirkungen des betreffenden Prozesses ermöglicht. Wie im Falle der analytischen Modelle sind auch bei Einsatz der Analogiemethode die prozeßbeschreibenden physikalischen Größen direkt in den Differentialgleichungen enthalten und dadurch durch Experimente quantifizierbar.

Die Problematik der Analogiemethode wird jedoch offensichtlich, wenn man versucht, einen gesamten, aus mehreren Einzeltätigkeiten bestehenden Prozeß abzubilden. Die Analogiemethode ist zwar in der Lage, einzelne Vorgänge abzubilden; die in der Realität vorkommenden produktionstechnischen Prozesse setzen sich in der Regel jedoch aus einer Reihe derartiger Vorgänge zusammen. Damit wird es mit steigender Komplexität des zu untersuchenden Prozesses immer unwahrscheinlicher, diesen in seiner Gesamtheit in einem einzigen Analogiemodell abbilden zu können. Dies gilt vor allem deswegen, weil die Natur nur eine begrenzte Anzahl an Analogien bereithält. Hier hilft auch die Aufteilung des Prozesses in mehrere einfachere Teilprozesse nichts, da dadurch die Anzahl der für eine Modellierung benötigten Analogien nicht verringert wird.

In der betrieblichen Praxis treten mit dem Einsatz der Analogiemethode weitere Schwierigkeiten auf. Diese Schwierigkeiten liegen in der Bereitstellung bzw. in der Form des benötigten Wissens: für den Aufbau eines Prozeßmodells nach der Analogiemethode ist es unabdingbar, daß das Prozeßwissen bzw. die Prozeßbeschreibung in Form von Differentialgleichungen vorliegt. Dies ist in der Produktionstechnik häufig nicht der Fall. Vorhandenes Prozeßwissen wird im Betrieb zumeist empirisch gewonnen und liegt nur selten strukturiert und dokumentiert vor. Selbst in der Forschung wird bei der Beschreibung komplexer Prozesse oft auf die Verwendung von Differentialgleichungen verzichtet, weil es geeignetere und verständlichere Darstellungsformen gibt. Der Aufwand der Modellerstellung wird durch die notwendige theoretische Aufarbeitung der Prozeßbeschreibung im Vorfeld der Modellerstellung sehr groß. Der Zeitvorsprung, der durch den Einsatz dieser Technologie erreicht werden soll, steht somit in Frage.

Zusammengefaßt läßt sich über die Analogiemethode feststellen, daß sie einzelne Vorgänge abzubilden vermag, an der Darstellung des Zusammenspiels mehrerer vernetzter Vorgänge jedoch zu scheitern droht. Darüber hinaus stellt die Analogiemethode hohe Ansprüche an das verfügbare Prozeßwissen. Als Verfahren zur Erzeugung von Prozeßprototypen wird die Analogiemethode deshalb nicht weiter betrachtet.

7.2.2.2 Ähnlichkeitstheorie

Aus theoretischer Sicht folgt aus der Tatsache, daß das ähnlichkeitstheoretische Modell und der dazugehörige Originalprozeß den gleichen dimensionslosen Differentialgleichungen genügen, die grundsätzliche Möglichkeit, den Detaillierungsgrad des zu untersuchenden Originalprozesses im Modell beizubehalten. Darüber hinaus ist durch die Identität der Differentialgleichungen und der darin enthaltenen physikalischen Größen ein quantitativer Zugriff auf die prozeßbeschreibenden Parameter möglich.

Selbstverständlich werden der Modellbildung durch die Komplexität der zu untersuchenden Prozesse Grenzen auferlegt (*Götz 1995, S. 48*). Es bestehen hier jedoch Möglichkeiten, diese Komplexitätsbedingten Probleme durch Anpassung entweder der Versuchsführung oder der Modellbildung zu umgehen. Zum einen könnte der zu untersuchende Prozeß in weitere Unter- oder Teilprozesse aufgesplittet werden, zum anderen kann man bei der Modellbildung von der anzustrebenden vollständigen Ähnlichkeit auf eine partielle Ähnlichkeit übergehen (*Zlokarnik 1991, S. 42*). Dies hat jedoch Auswirkungen auf die benötigte Qualifikation des mit Experimentvorbereitung und –auswertung befaßten Personals. Trotzdem erscheint die Modellierung eines vollständigen Prozesses mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie grundsätzlich möglich.

Im Gegensatz zur Analogiemethode werden für die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie prozeßbeschreibende Differentialgleichungen nicht zwingend benötigt. Zentrale operative Basis der Ähnlichkeitstheorie ist die dimensionslose Prozeßdarstellung. Zwar sind Differentialgleichungen ein Weg, um zur dimensionslosen Prozeßbeschreibung zu gelangen, es existieren jedoch mit der Dimensionsanalyse auch weitere zielführende Methoden, die auf einer anderen Wissensbasis aufsetzen.

Der Einsatz von Expertenwissen beschränkt sich im Rahmen der Anwendung der Ähnlichkeitstheorie hauptsächlich auf die Modellerstellung. Das daraus resultierende Prozeßmodell spiegelt die bekannten oder erwarteten Abläufe des zu untersuchenden Prozesses körperlich wider. Deshalb ist der Abstraktionsgrad des ähnlichkeitstheoretischen Modells im Vergleich zu seinem Original nicht sehr hoch. Im Falle von Modellen bereits bekannter produktionstechnischer Prozesse ist zu erwarten, daß das Modell vom Personal der Originalanlage bedient werden kann, da Prozeßerfahrung ausreichen müßte. Anders liegt der Fall dagegen bei lediglich partiell ähnlichen Modellen. Hier werden erhebliche theoretische Anforderungen auch an die Experimentplanung und -auswertung gestellt.

Die in Kap. 5.9 geschilderten Erfahrungen mit dem Modellprozeß, die sich unmittelbar auf den Einsatz der Ähnlichkeitstheorie beziehen, müssen nicht nur aus der Sicht der Methode, sondern auch aus der Perspektive des Process Prototyping betrachtet werden. Ein Abgleich der Ergebnisse aus den geschilderten Experimenten mit den Anforderungen an Process-Prototyping-Verfahren zeigt folgendes Bild: ein ähnlichkeitstheoretisches Modell eines diskontinuierlichen Produktionsprozesses ist voll experimentierfähig und erlaubt einen Erkenntnisgewinn abseits der Serienfertigung.

➤ Experimentierfähigkeit	<input checked="" type="checkbox"/>
➤ Erkenntnisgewinn abseits der Serienfertigung	<input checked="" type="checkbox"/>
➤ Kein Expertenwissen für Versuchsdurchführung nötig	<input checked="" type="checkbox"/>
➤ Physikalische Wechselwirkungen als operative Ebene	<input checked="" type="checkbox"/>
➤ Quantitative Bestimmung der prozeßrelevanten physikalischen Größen	<input checked="" type="checkbox"/>
➤ Erfassung möglichst aller relevanten Prozeßeigenschaften	<input checked="" type="checkbox"/>

Abb. 7-3: Erfüllung der Anforderungen an Prozeßprototypen durch das Anwendungsbeispiel.

Die Versuche, die von einem prozeß- aber nicht simulationserfahrenen Meister durchgeführt wurden, zeigen, daß für die Versuchsdurchführung kein Expertenwissen nötig war. Physikalische Wechselwirkungen konnten z. T. quantitativ und in bezug auf das Produkt (Kälteswellen) auch qualitativ ausgewertet werden. Es wurden in dem Prozeßprototypen zahlreiche Prozeßeigenschaften abgebildet, einige (z. B. Wärmestrahlung) mußten durch Abstraktion vernachlässigt werden. Dennoch zeigte das Experimentieren an der ähnlichkeitstheoretischen Versuchsanlage, daß das Modell in der Lage sein würde, Schwachstellen in der Prozeß- und Werkzeugentwicklung aufzuzeigen.

Abb. 7-3 zeigt die Erfüllung der Anforderungen an Modellbildungsverfahren mit Prototypenqualität nach Abb. 7-2. Die Ähnlichkeitstheorie erfüllt demnach die Anforderungen, die an ein Verfahren zur Erstellung von Prozeßprototypen gestellt werden.

7.2.3 Identifikation von möglichen Verfahren für die Erstellung von Prozeßprototypen

Bestehende Modellbildungsverfahren wurden anhand der Anforderungen an die Modellqualität (Prototypenqualität) nach ihren Stärken und Schwächen untersucht. Das folgende Bild zeigt eine qualitative Bewertung im Überblick.

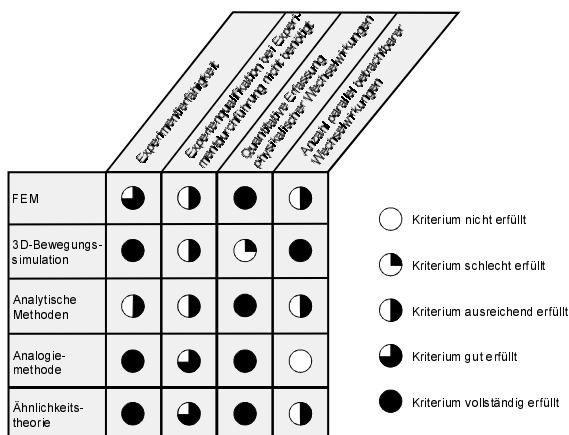


Abb. 7-4: Qualitative Bewertung der wichtigsten Modellbildungsmethoden nach den Anforderungsmaßstäben des Process-Prototyping-Konzeptes. Jedes Kriterium sollte mindestens ausreichend erfüllt sein.

Als Verfahren, die nach dem derzeitigen Stand der Technik in der Lage sind, prototypenhafte Modelle von produktionstechnischen Prozessen zu liefern, wurden die analytischen Methoden, die Finite-Element-Methode und die Ähnlichkeitstheorie identifiziert.

Die 3D-Bewegungssimulation könnte nach der Integration weiterer Funktionalitäten, die beispielsweise durch eine Integration von Mehrkörpersimulations- (MKS)- und/oder FEM-Funktionalitäten erreichbar sind, ebenfalls als Process-Prototyping-Verfahren eingesetzt werden. Eine Zusammenführung der Funktionalitäten der ge-

¹ Die Mehrkörpersimulation erlaubt die Ermittlung dynamischer Kräfte bewegter Massen. Die betrachteten Massen sind dabei in der Regel miteinander gekoppelt, so daß sie sich gegenseitig kinematisch und dynamisch beeinflussen. Ein charakteristisches Anwendungsbeispiel der MKS ist die Ermittlung von dynamischen Belastungen der einzelnen Komponenten eines Mehrachsenroboters.

nannten Verfahren würde einen großen Fortschritt für die Prozeßuntersuchung an Modellen bedeuten.

7.3 Konzept zur systematischen Auswahl von Modellbildungsvorfahren

Nachdem die Process-Prototyping-Verfahren identifiziert wurden, geht es im folgenden darum, wie für ein gegebenes Problem bzw. einen gegebenen Prozeß die richtige Modellbildungsmethode auszuwählen ist. Nach Breiling & Knosala (1997, S. 1) erfordert Entscheiden stets ein vorausgehendes Bewerten. Breiling & Knosala konzentrieren sich in ihrer Arbeit stark auf die Entscheidungsfindung im Konstruktionsprozeß. Die dabei vorgestellten Methoden zur Bewertung technischer Systeme können jedoch auf den hier vorliegenden Fall übertragen werden.

Nach Breiling & Knosala (1997, S. 5) ist der Bewertungsvorgang in seinen Grundzügen immer gleich: „*für eine endliche Menge von Lösungen beliebiger Art auf beliebigen Fachgebieten und in beliebigen Reifegraden, jedoch gleichen Informationsgehaltes, sind gemeinsame Bewertungskriterien aufzustellen, diese mit einheitlich erfassbaren und vergleichbaren Werten zu versehen (Wertungszahlen) und deren Summen (Wertigkeiten) als Wertvergleich gegenüber zu stellen, um so durch den höchsten Wert die beste und durch den niedrigsten Wert die schlechteste Lösung zu ermitteln.*“ Ergänzend dazu ist zu berücksichtigen, daß die Bewertungskriterien in der Regel unterschiedliche Wichtigkeit besitzen, was durch eine Gewichtung der Maßzahl des Bewertungskriteriums geschehen kann. Damit steht ein Anforderungsprofil an eine Bewertung und nachfolgende Auswahl der beiden bestehenden Verfahren fest (s. Abb. 7-5).

Diese Vorgehensweise ist allen Bewertungsmethoden gemein. Es gilt jedoch zu beachten, daß der Aufwand bei der Bewertung technischer Systeme deren Komplexität und dem Kenntnisstand über das zu bewertende System angemessen sein soll. Bisher existieren keinerlei systematische Erfahrungen, die die problem- oder prozeßgerechte Auswahl einer Modellierungsmethode unterstützen würden. Dies kann erst erfolgen, wenn mehrere Methoden in einer Art Leistungsvergleich auf ein Problem angewendet werden. Es kann deshalb im folgenden nicht darum gehen, ein möglichst detailliertes und ausgearbeitetes Bewertungssystem zur Auswahl eines Verfahrens zu schaffen. Vielmehr muß es Ziel sein, auf Basis des derzeitigen Kenntnisstandes eine schnelle objektive Entscheidungshilfe zu konzipieren und zu zeigen, wie ein mögliches Auswahlverfahren aussehen könnte. Aus diesem Grund wird auf ein bereits bestehendes Bewertungsverfahren zurückgegriffen, das lediglich auf den vorliegenden Fall angepaßt wird.

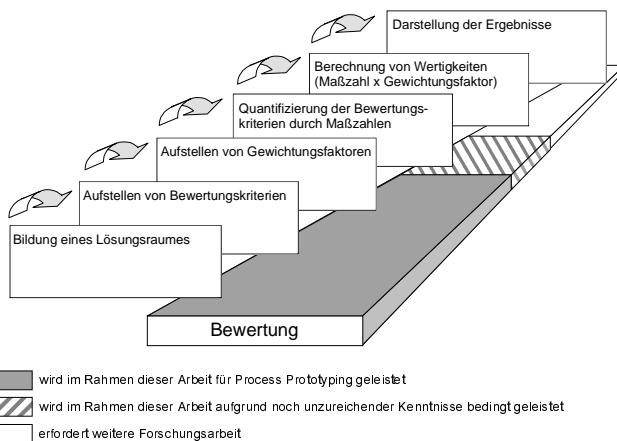


Abb. 7-5: Standardvorgehensweise für Bewertungsvorgänge nach Breing & Knosala. Aufgrund der derzeitigen Kenntnislage kann eine Bewertungssystematik nur bedingt ausgearbeitet werden.

Für die problemgerechte Auswahl der Process-Prototyping-Verfahren wird auf die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach Kesselring (1951) als klassische Entscheidungshilfe für „einfache Maschinen, Apparate und Geräte“ zurückgegriffen. Dieses Bewertungsverfahren ist für einfache technische Systeme geeignet (Breing & Knosala 1997, S. 230), was dem zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch rudimentären Erfahrungs- und Kenntnisstand entgegenkommt. Ein System, das lediglich aus den drei Komponenten

- analytische Modellierungsmethoden,
- FEM und
- Ähnlichkeitstheorie

besteht, kann als einfach angesehen werden.

Es werden im folgenden wesentliche Bestandteile eines Bewertungssystems bis hin zu möglichen Bewertungskriterien dargestellt. Auf eine Herleitung von Maßzahlen in Form von numerischen Werten wird dagegen verzichtet, da diese beim augenblicklichen Kenntnisstand mit so großen Unsicherheiten behaftet wären, daß eine Entscheidung auf ihrer Basis nicht verantwortungsvoll zu rechtfertigen wäre. Da mit dem Begriff des „Bewertens“ bereits die Beimessung eines numerischen Wertes verbunden ist, dieses aber aufgrund des noch nicht ausreichenden Kenntnisstandes nicht möglich ist, soll für die problemgerechte Auswahl zunächst eine „Beurteilung“ der einzelnen Verfahren durchgeführt werden. Durch diese Begriffswahl soll der qualitative Charakter des Auswahlverfahrens unterstrichen werden. Ziel ist es, nach weiteren Forschungsarbeiten zu einem echten Bewertungssystem zu gelangen. Dieses im folgenden

vorgestellte Konzept eines Beurteilungssystems soll daher als Grundlage einer Entwicklung hin zu einem Bewertungssystem verstanden werden.

7.3.1 Lösungsraum

Im Hinblick auf Punkt 1 des oben dargestellten Anforderungsprofils ist eine Beschreibung des Problems hilfreich, das die Entscheidungsfindung erfordert. Dieses Problem besteht darin, einen beliebigen Prozeß anhand eines Prototypenmodells zu untersuchen. Dazu stehen als mögliche Verfahren die analytischen Verfahren, die FEM und die Ähnlichkeitstheorie zur Verfügung. Dementsprechend bilden diese drei Modellbildungs- und Untersuchungsverfahren den Lösungsraum. Der Lösungsraum kann jedoch durch Hinzunahme weiterer Methoden beliebig erweitert werden.

7.3.2 Beurteilungskriterien

Im Rahmen einer Auswahl eines technischen Systems, basierend auf einer objektiven technischen Beurteilung, kommt den Beurteilungskriterien eine Schlüsselrolle zu. Sie bestimmen letztendlich über die Qualität der Beurteilung.

Nach Breiling & Knosala (1997) stellen die Anforderungen an ein System die Grundlage der Bewertungskriterien dar. Eine Anforderungsliste ähnlich einem Pflichtenheft, wie sie Breiling & Knosala in ihrer auf die Bewertung von Konstruktionsvarianten ausgerichteten Arbeit vorgesehen haben, wird der hier angestrebten Bewertung von Modellierungsverfahren nicht gerecht. Im Gegensatz zu Pflichtenheften, die die Anforderungen an einen spezifischen Anwendungsfall definieren, geht es in dieser Arbeit um die Identifikation allgemeingültiger "Anforderungen" in Form von Problemcharakteristika, anhand derer eine Entscheidung für eines der Process-Prototyping-Verfahren getroffen werden kann. Die zu erarbeitenden Bewertungs- bzw. Beurteilungskriterien dürfen sich deshalb nicht an einem Einzelfall orientieren, sondern müssen eine Abstraktionsstufe darüber auf einer Ebene allgemeiner Prozeß- und Problemeigenschaften ansetzen.

Bei der technisch-wirtschaftlichen Bewertung nach Kesselring (1951) werden die Bewertungskriterien in technische und wirtschaftliche Kriterien unterteilt. Dabei werden beispielsweise alle aufwandsorientierten Kriterien der Wirtschaftlichkeit zugeordnet. Die technische Wertigkeit zeigt an, welche Elemente des Lösungsraumes Aussicht auf technischen Erfolg haben. In Verbindung mit der wirtschaftlichen Bewertung wird daraus die theoretisch beste Lösung ermittelt. Im Prinzip lässt sich die technische Wertigkeit auch als eine Aussage über den Nutzen des Einsatzes einer Methode auffassen. Somit wird mit der angedachten Bewertungsmethode bereits auf niedrigem Kenntnisniveau eine Art Kosten-Nutzen-Vergleich möglich.

Die übergeordnete Anforderung, die an die Process-Prototyping-Verfahren gestellt wird, ist zunächst die triviale Forderung, einen produktionstechnischen Prozeß entsprechend der in Kap. 7.1 erarbeiteten Punkte abzubilden. Die Anforderungsliste aus

Kap. 7.1, die für die Identifikation der Prototyping-Verfahren aus dem Pool aller betrachteten Modellbildungsmethoden verwendet wurde, reicht nicht aus, um darauf aufbauend eine weitere Entscheidung unter nahezu gleichwertigen Methoden zu treffen. Es wird deshalb ein anderer Ansatz zur Identifikation sinnvoller Beurteilungskriterien gewählt, der neben den in Kap. 7.1 erarbeiteten Anforderungen vor allem die Leistungsmerkmale der Process-Prototyping-Verfahren berücksichtigt. Es ist sinnvoll, von den Leistungsmerkmalen der Modellierungsmethoden auszugehen, da mit den Leistungsmerkmalen der Methoden direkt potentielle Probleme/Stärken bei der Modellbildung, der Modellvariierung und der Experimentdurchführung verbunden sind. Nach Kenntnis der systematischen Stärken bzw. Schwächen der Modellierungsmethoden kann das zu lösende Problem dahingehend untersucht werden, inwieweit es bei der Modellierung durch ein Process-Prototyping-Verfahren dort auf methodische Stärken oder Schwächen trifft. Der umgekehrte Weg, eine Identifikation charakteristischer Problemeigenschaften, mag dagegen das Problemverständnis erhöhen, es steht aber nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit irgendeiner Modellierungsmethode.

Grundsätzlich lässt sich die Abbildung eines Prozesses in einem Modell in zwei wesentliche Anforderungen untergliedern (s. Abb. 7-6):



Abb. 7-6: Anforderungen an die Abbildungen eines Prozesses in einem Modell.

Unter den Punkt Funktionalität fallen alle Eigenschaften des abzubildenden Prozesses, die die generelle technische Machbarkeit betreffen. Andere Eigenschaften des Prozesses beeinflussen direkt den Aufwand, der für die Modellerstellung oder für die Experimentdurchführung nötig wird. Diese erste grobe Gliederung entspricht der gewählten technisch-wirtschaftlichen Bewertungsmethode nach Kesselring.

7.3.2.1 Gewährleistung der Modelfunktionalität

Zunächst wird die Funktionalität des Modells betrachtet. Dies führt auf die Frage, welche charakteristischen Prozeß- bzw. Problemeigenschaften die Funktionsfähigkeit eines Process-Prototyping-Modells einschränkt bzw. beseitigt. Die Auswahl der Beurteilungskriterien erfolgt deshalb unter besonderer Berücksichtigung der Funktionsweise der Verfahren FEM, Ähnlichkeitstheorie und der analytischen Methoden.

Im folgenden werden für jede Modellbildungsmethode einzeln physikalische Effekte bzw. charakteristische Sachverhalte genannt, aufgrund deren eine Beeinträchtigung der Modellqualität erwartet werden kann. Eine Quantifizierung der Kriterien erfolgt für die Ähnlichkeitstheorie, da dafür im Rahmen dieser Arbeit ausreichend Wissen erarbeitet

wurde. Darüber hinaus handelt es sich bei einer Quantifizierung von Kriterien, die eine Modellierung mit der Ähnlichkeitstheorie erschweren, bereits um ein Stück Qualifizierung der Ähnlichkeitstheorie für die Produktionstechnik.

Die Kriterien der anderen Modellierungsmethoden werden aus der Funktionsweise der Methoden begründet hergeleitet, jedoch nicht operationalisiert (s. Abb. 7-7). Zur besseren Verständlichkeit werden Kriterien vor ihrer Erläuterung durch Beispiele eingeführt. Es werden dann beispielhaft physikalische Effekte geschildert, die die abstrakten Kriterien betreffen. Darüber hinaus werden exemplarisch produktionstechnische Prozesse genannt, in denen diese Effekte auftreten.

	Funktionale Schwachstellen	Beurteilungskriterium	Operationalisierung
Ähnlichkeitstheorie			
Analytische Methoden			
Finite-Element-Methode			

Abb. 7-7: Herleitung möglicher Beurteilungskriterien aus den funktionalen Schwachstellen der Methoden. Im Falle der Ähnlichkeitstheorie erfolgt eine Operationalisierung.

Ähnlichkeitstheorie

Anzahl der Parameter

Bereits die Anzahl der Parameter, die für eine vollständige Beschreibung des Prozesses bzw. des Problems notwendig sind, liefert ein erstes Kriterium für die Wahl einer Modellierungsmethode. Dies resultiert aus dem Buckingham-II-Theorem (*Buckingham 1914, S. 345*). Nach der Interpretation Pawlowskis (*Pawlowski 1971, S. 27*) wird die Anzahl der Parameter bei Übergang von einer dimensionsbehafteten zu einer dimensionslosen Prozeßdarstellung um den Rang der Dimensionsmatrix verringert, die mit den Parametern gebildet werden kann. Ohne näheres Ansehen der Dimensionsmatrix lässt sich deren Rang sehr leicht abschätzen: er entspricht in der Regel der Anzahl der Grunddimensionen des verwendeten Dimensionssystems. Legt man das SI-Einheiten-System zugrunde, benötigt man zur Beschreibung produktionstechnischer Prozesse mindestens die drei Grunddimensionen Länge, Zeit und Masse. Es handelt sich dann um rein mechanische Systeme. Spielt die Wärme eine wichtige Rolle kommt als vierte Grunddimension die Temperatur hinzu. Eventuell wird als fünfte Grunddimension die Stromstärke benötigt; in der Regel ist das jedoch nicht der Fall.

Die Verringerung der Anzahl relevanter Parameter stellt einen großen Vorteil der Ähnlichkeitstheorie dar, da durch eine kleinere Anzahl an Parametern das Problem überschaubarer und die Anzahl der benötigten Experimente reduziert wird. Der Vorteil schwindet jedoch, wenn die Parameterreduzierung gegenüber der Gesamtanzahl der prozeßbeschreibenden Parameter vernachlässigbar wird. Um die Effekte der Parameterreduktion zu nutzen, sollte diese mindestens 30% betragen. Die Grenze von 30% ist willkürlich auf Basis der bisherigen Erfahrungen gewählt. Sie soll als erster Anhaltswert verwendet werden und kann zu einem späteren Zeitpunkt unter der Berücksichtigung weiterer Erkenntnisse korrigiert werden. Damit lässt sich nun eine Obergrenze an Prozeßparametern angeben, für die die Ähnlichkeitstheorie gerade noch technisch sinnvoll anwendbar ist:

$$N_{\max} \leq \frac{\dim_{\max}}{0,3} \quad \text{Gl. 41}$$

Dabei sind N_{\max} die maximal mögliche Anzahl von Parametern zur vollständigen Beschreibung des Prozesses und \dim_{\max} die Anzahl der darin auftretenden SI-Basisdimensionen. Es handelt sich bei Gl. 41 um ein Ausschlußkriterium für die Ähnlichkeitstheorie.

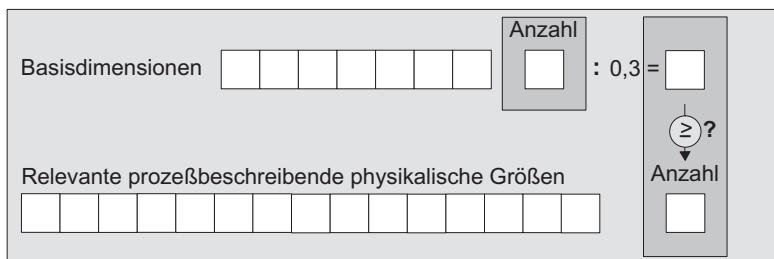


Abb. 7-8: Operationalisierte Ex-Ante-Überprüfung der Anzahl relevanter Parameter und ihrer Bedeutung auf eine ähnlichkeitstheoretische Modellierung.

Geometriemaßstab

Der Geometriemaßstab eines Modells ist eine wichtige Größe, um Aussagen über die Anwendbarkeit der Ähnlichkeitstheorie zur Erstellung eines Prozeßmodells treffen zu können. Nach Pawłowski (1971, S. 98) sind Übertragungsbedingungen umso schwerer zu erfüllen, je stärker der Skalierungsfaktor des Geometriemaßstabs von Eins abweicht. Es besteht dann die Möglichkeit, daß eine Modellanlage aufgrund ihrer Größe (zu klein oder zu groß) nicht mehr realisiert werden kann. Daneben können bei zu großer Veränderung des Geometriemaßstabes physikalische Effekte im Modell wirksam bzw. unwirksam werden, die im Originalprozeß keine bzw. eine Rolle spielen. Dies bedeutet, daß die prozeßrelevanten Größen von Modell- und Originalprozeß nicht mehr identisch sind.

Anzahl der Zwangsbedingungen für Werkstoffparameter

Bei ähnlichkeitstheoretischen Modellen werden regelmäßig physikalische Größen im Vergleich zum Originalprozeß skaliert. Die dabei verwendeten Skalierungsmaßstäbe betreffen in der Regel nicht nur unmittelbar einstellbare Prozeßgrößen, sondern auch werkstoffabhängige Stoffwerte. Eine Skalierung von Stoffgrößen kann jedoch nur über Veränderung der verwendeten Werkstoffe erfolgen.

Dabei stellen die Werkstoffgrößen ein Problem dar, die nicht frei wählbar sind, sondern durch Zwangsbedingungen festgelegt werden. Für diese Stoffwerte ist der quantitative Spielraum äußerst gering.

Hier kann, ähnlich wie im erstgenannten Kriterium der allgemeinen Parameteranzahl, ebenfalls die Anzahl der Grunddimensionen zur Abschätzung dieses Kriteriums herangezogen werden. Wie bereits dargestellt, stellt die Anzahl der Basisdimensionen \dim_{\max} eine gute Näherung für die Anzahl der im Modell frei wählbaren Größen dar. Sie beträgt für die meisten produktionstechnischen Fragestellungen drei oder vier.

Zunächst ist zu überlegen, welche Größen auf jeden Fall frei skaliert werden müssen. Dies können z. B. die Geometrie und/oder die Prozeßdauer sein. \dim_{\max} ist daraufhin um diese Anzahl an unbedingt frei zu skalierenden Größen zu verringern. Dies führt auf den Restfreiheitsgrad rf des Modells:

$$rf = \dim_{\max} - \text{Anzahl unbedingt frei zu skalierenden Größen} \quad \text{Gl. 42}$$

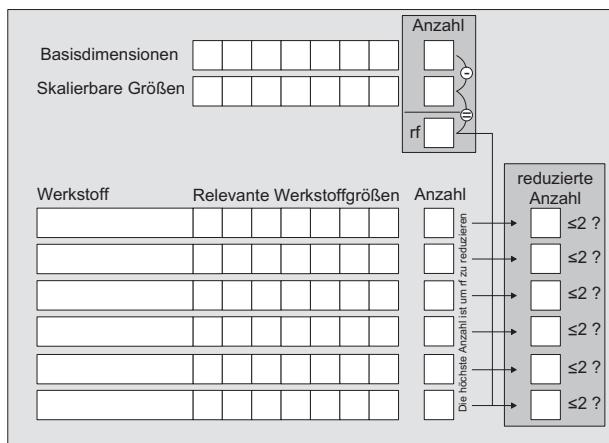


Abb. 7-9: Operationalisierte Ex-Ante-Überprüfung der Anzahl der Zwangsbedingungen für Werkstoffparameter.

Für jeden am Originalprozeß beteiligten Werkstoff werden die relevanten Stoffgrößen getrennt notiert und gezählt. Die größte auftretende Anzahl wird um den Wert von rf

reduziert. Diese nun endgültige Liste mit einer reduzierten Anzahl an Werkstoffparametern sollte keinen Wert aufweisen, der größer als zwei ist, da sonst eine Materialrecherche kaum Erfolgschancen besitzt. Es handelt sich daher um ein Ausschlußkriterium.

Analytische Methoden

Prozeßkomplexität

Wie bereits in Kap. 7.2.1.3 erwähnt wurde, stößt die analytische Modellierung mit zunehmender Komplexität des zu untersuchenden Prozesses an seine Leistungsgrenzen. Die Komplexität eines Prozesses im Sinne einer analytischen Modellierung steigt mit zunehmender Anzahl von Prozeßschritten, mit zunehmender Anzahl von Abläufen innerhalb eines Prozeßschrittes sowie mit der Beschreibung nicht-regelmäßiger Geometrien. Die bisher genannten Beispiele analytischer Prozeßmodelle (Kreissägen, Kugelschleifen) (Simpfendorfer 1988, Zäh 1995, Zwanzer 1995) decken allesamt Produktionsprozesse mit nur einem Prozeßschritt ab. Darüber hinaus weisen Werkzeuge bzw. Werkstücke in diesen Prozessen Regelgeometrien auf. In den genannten Fällen sind dies Zylinder (Kreissägeblatt), Quader (Werkstück), Zylinderhalbschalen (Schleifbahn des Kugelschleifens) und Kugel.

FEM

Gradienten

Beispiele: Temperaturgradienten in dünnwandigen Bauteilen mit schlechter Wärmeleitung in gut wärmeleitender Umgebung.

Kunststoffspritzguß, Heißformgebung von Glas.

Eine Eigenschaft der Finite-Element-Methode beeinflußt in mehrfacher Weise die technische Realisierbarkeit eines Modells. Es handelt sich dabei um Schwierigkeiten, die bei der Anwendung der FEM dann auftreten, wenn Werte mit hohen Gradienten auftreten oder die Gradienten großen Veränderungen unterliegen. Ersteres wirkt sich auf die benötigte Rechenleistung und Speicherkapazität der Rechner aus, auf denen das Modell erstellt und die Experimente durchgeführt werden. Zur Darstellung hoher Gradienten ist eine feine Diskretisierung notwendig. Dadurch wird die Anzahl der benötigten Knotenpunkte und damit der benötigte Speicherbedarf und die benötigte Rechenzeit erhöht. Eine quantitative Abschätzung über die bei einer Modellierung auftretende Knotenpunktanzahl lässt sich a priori nicht treffen. Ob ein Gradient als groß zu bezeichnen ist, ergibt sich aus einer Betrachtung des Gesamtproblems. Dazu wird zunächst die geometrische Abmessung der zu modellierenden Anlage abgeschätzt. Ein Gradient kann dann als groß angesehen werden, wenn beim zu untersuchenden Prozeß signifikante Änderungen einer physikalischen Größe auf einer im Vergleich zur Gesamtabmessung des Modells kleinen Länge auftreten. Analog dazu kann die zeitliche Diskretisierung behandelt werden. Die Ähnlichkeitstheorie und die analytische Modellierung als analoge Modellierungsmethoden benötigen keine Diskretisierung. Aus diesem Grund verursachen große Gradienten bei Anwendung der Ähnlichkeitstheorie und der analytischen Modellierung keine Probleme.

Nicht-Linearitäten

Beispiele: Phasenübergänge.

Gießen kristalliner Werkstoffe, Metall-Schweißen, Löten.

Ein weiteres Problem für FEM-Modelle stellen große Änderungen von Gradienten dar, da diese zu problematischem Konvergenzverhalten bei der Berechnung des Modells führen. Häufig sind große Gradientenänderungen in den variablen Stoffgrößen der beteiligten Werkstoffe enthalten. Deshalb sollte eine Untersuchung eines Problems nach möglichen Nicht-Linearitäten beim veränderlichen Werkstoffverhalten beginnen. Das Werkstoffverhalten muß für eine Modellierung ohnehin bekannt sein. Die Problematik der großen Gradientenänderungen führt auf das generelle Problem der Finite-Element-Methode, extremes nicht-lineares Verhalten zu bewältigen. Ein weiteres Beispiel für Fälle von stark nicht-linearem Verhalten ist die Behandlung von Phasenübergängen. Der Grund dafür ist die Modellierung der bei Phasenübergängen auftretenden latenten Wärme mit der FEM. Die Modellierung von Phasenübergängen mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie ist ebenfalls problematisch. Die Schwierigkeiten der Ähnlichkeitstheorie mit Problemen wie Phasenübergängen lassen sich jedoch auf ein Problem mit mehreren festgelegten Stoffgrößen, wie z. B. Schmelztemperatur, Schmelzenthalpie etc. zurückführen. Dadurch berücksichtigt das Kriterium „Anzahl der relevanten Stoffwerte eines Materials“ bereits die Problematik der Ähnlichkeitstheorie mit nicht-linearem Prozeßverhalten ausreichend.

Verformungsgrad

Beispiele: Verformung von Werkstoffen im Bereich plastischen Werkstoffverhaltens.

Walzen, Tiefziehen, Pressen.

Bei zahlreichen produktionstechnischen Prozessen werden Bauteile bzw. Werkstücke verformt. Bei der Modellierung derartiger Prozesse mit Hilfe der FEM beeinflußt der im Prozeß auftretende Verformungsgrad die Qualität des Ergebnisses. FEM-Modelle sind um so exakter, je geringer die im Modell auftretenden Verformungen sind. Bei großen Verformungsgraden ist entweder eine wiederholte Regenerierung der Diskretisierung (Remeshing) der verformten Struktur oder eine Verschiebung der Knoten der verzerrten Struktur (Rezoning) notwendig. Dabei kann es zu Genauigkeitsproblemen kommen, da die zunächst bestehenden Elemente stark verzerrt werden. Hier werden die Bereiche des elastischen Stoffverhaltens in der Regel verlassen. Die Information aus diesen entarteten Elementen wird beim Remeshing lediglich auf neue unverformte Elemente umgerechnet. Bei diesem Vorgang besteht die Gefahr, daß die Qualität der Daten weiter abnimmt, da die Zuordnung von Werten zu den geometrischen Orten innerhalb der Struktur, an denen sie gelten, unter Umständen nicht genau beibehalten wird. Beim Rezoning bleibt die bestehende Diskretisierung erhalten, jedoch werden die Knotenpunkte der FE-Struktur so verschoben, daß die Verzerrungen verringert werden. Der Unterschied zwischen Remeshing und Rezoning besteht im wesentlichen in der Interpretation der FE-Struktur. Das Remeshing setzt eine körperfeste, das Rezoning eine ortsfeste Diskretisierung voraus, ähnlich den Euler'schen bzw. Lagrange'schen Koordinatensysteme für die Betrachtung strömungsmechanischer Vorgänge. Eine Ver-

formung gilt innerhalb der Anwendungen der Finite-Element-Methode ab einem Verformungsgrad von 10% und mehr als groß.

Verformungs-Singularitäten

Beispiele: Materialabtrag.

Drehen, Fräsen, Stanzen, Stanznieten.

Mit dem Problem des Verformungsgrades innerhalb der FEM eng verbunden ist das Problem von Verformungs-Singularitäten. Dennoch müssen diese gesondert erwähnt werden, da sie nicht unmittelbar mit dem Verformungsgrad zusammenhängen.

Eine Verformungssingularität tritt beispielsweise immer dann auf, wenn Material aus einer Struktur herausgetrennt wird, etwa beim Stanzen oder beim Nieten. Die Trennung von Material aus einer Struktur bis hin zum völligen Abtrennen hat erheblichen Einfluß auf die Diskretisierung des betroffenen Bauteiles im Modell. Hier werden im Falle des Materialabtrages Änderungen der Bauteildiskretisierung innerhalb des Berechnungsvorganges zwingend notwendig. Im Vergleich zu großen Verformungsgraden ist im Falle des Auftretens von Verformungssingularitäten ein Remeshing der Struktur nicht ausreichend, da sich jetzt Beziehungen zwischen Knoten innerhalb einer diskretisierten Struktur ändern.

Kontaktprobleme

Beispiele: Reibung, Kraftschluß.

Urformende und umformende Verfahren.

Die Modellierung von Kontakten unterschiedlicher Bauteile mit der FEM wirft in mancherlei Hinsicht technische Probleme auf. Von den Kontaktproblemen ausgenommen sind formschlüssige Verbindungen, deren Modellierung unproblematisch ist. Schwieriger ist dagegen die Modellierung kraftschlüssiger Verbindungen und die Vermeidung ungewollter Materialdurchdringungen. Zur Modellierung von Kontakten sind, neben der Darstellung der reinen Bauteilgeometrie, in der Regel spezielle Kontaktlemente notwendig. Diese Kontaktlemente beeinflussen die rechnerische Steifigkeit der Struktur und somit spätere Berechnungsergebnisse.

In diesem Kapitel wurde der Einfluß der einzelnen Beurteilungskriterien auf die Modellbildungsverfahren beschrieben. Als Resultat daraus ist in Abb. 7-10 eine qualitative Zuordnung von Methoden und Beurteilungskriterien dargestellt. Diese Zuordnung ist als Kontrollmatrix zu verstehen, die angibt, welches Modellbildungsverfahren im Hinblick auf ein auftretendes Kriterium besonders zu untersuchen ist.

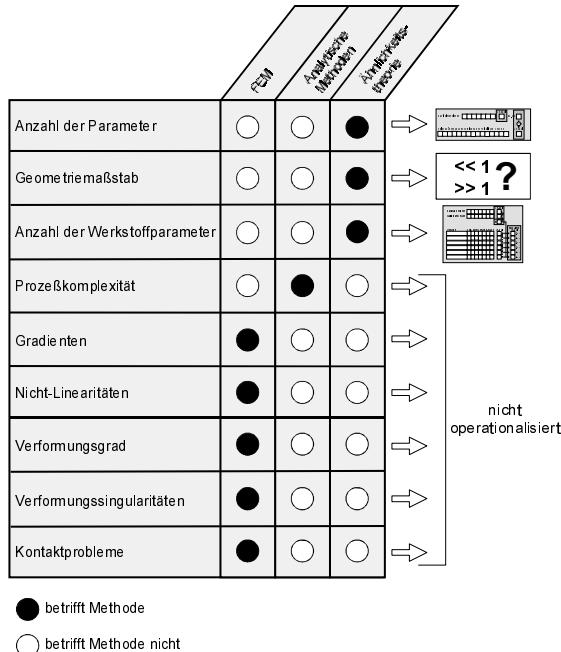


Abb. 7-10: Zuordnung der identifizierten Beurteilungskriterien zu den Process-Prototyping-Verfahren.

7.3.2.2 Identifikation des Aufwands

Neben der technischen Machbarkeit spielt der Aufwand für die Arbeit mit dem Prototypen-Prozeßmodell eine wichtige Rolle. Aufwand kann dabei im wesentlichen in zwei Bereichen entstehen (s. Abb. 7-11).

Beim Aufwand werden vor allem der zeitliche und der kostenmäßige Aufwand berücksichtigt. Die Trennung des Aufwandes in Zeit- und Kostenaufwand erscheint trotz des engen betriebswirtschaftlichen Zusammenhangs zwischen den beiden Größen sinnvoll. Schließlich geht es bei der Errichtung und Verwendung von Prototypen in erheblichem Maße darum, einen zeitlichen Vorteil zu erlangen. Aus diesem Grund müssen auch Effekte berücksichtigt werden, die den Erfolg der Modellierungs- und Experimentierarbeit verschleppen, ohne deshalb notwendigerweise unmittelbar hohe Kosten zu verursachen.

Es werden im folgenden Kriterien genannt, die bei Anwendung der Methoden Aufwand verursachen. Der Aufwand ist dabei allerdings im Einzelfall zu bewerten.

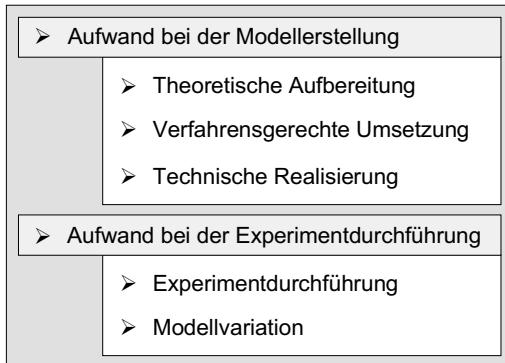


Abb. 7-11: Unterschiedliche Quellen von Aufwand beim Umgang mit Prozeßmodellen.

Aufwand für die Modellerstellung

Der Aufwand der Modellerstellung ist für die betrachteten Methoden sehr unterschiedlich. Im Falle eines Ähnlichkeitstheoretischen Modells hängt der Aufwand stark von der Komplexität des zu untersuchenden Prozesses ab. Im Gegensatz zur FEM wird ein körperliches Modell einer Anlage erstellt, was zunächst zu Fertigungsaufwand führt. Es wird darüber hinaus bei der Ähnlichkeitstheorie kein Simulationssystem benötigt, so daß die Errichtung eines körperlichen Modells bei gegebener technischer Machbarkeit grundsätzlich immer ad hoc möglich ist. Der zur Modellerstellung nötige Fertigungsaufwand erstreckt sich auf

- Maschineneinsatz
- Personaleinsatz
- Materialeinsatz

Hier lassen sich keine pauschalen Aussagen treffen, sondern es muß der nötige Aufwand jeweils im Einzelfall beurteilt werden. Im Gegensatz zum Personal- und Maschineneinsatz, der aus der Anschauung des Originalprozesses bzw. der Originalanlage abgeschätzt werden kann, stellt der Materialaufwand einen erheblichen Unsicherheitsfaktor dar. In der Regel erfordert die Skalierung physikalischer Größen bei der Erstellung eines Ähnlichkeitstheoretischen Modells die Verwendung von Werkstoffen, die sich von denen des Originalprozesses erheblich unterscheiden. Diese sogenannten Ersatz- oder Modellwerkstoffe sind gewöhnlich erst zu einem späteren Zeitpunkt während der theoretischen Vorarbeiten für die Modellerstellung bekannt.

Die Finite-Element-Methode benötigt für ihre tatsächliche Anwendung ein EDV-Programm, so daß mit dem Einsatz der FEM Investitionskosten verbunden sind. Die Wirtschaftlichkeit des FEM-Einsatzes hängt damit, im Gegensatz zur Ähnlichkeitstheorie, stark von der Auslastung des FEM-Systems ab. Jedoch kann für die FEM aufgrund der bekannten Kosten für die Beschaffung eines FEM-Systems sowie den aus dem FEM-

Einsatz zu erwartenden Einsparungen eine grobe Abschätzung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses vorgenommen werden.

Ein weiteres Kriterium, das eine Abschätzung des Aufwandes für die Erstellung eines FEM-Modells darstellt, ist der vorhandene CAD-Datenbestand bezüglich der Bauteile des zu untersuchenden Prozesses. Nahezu alle modernen FEM-Systeme erlauben, Geometriedaten aus CAD-Programmen zu importieren. Dadurch kann der Aufwand für die Modellerstellung unter Umständen erheblich verringert werden.

Für die Ähnlichkeitstheorie ist die Existenz von CAD-Daten in der Regel ohne Belang, da durch die Skalierung physikalischer Größen sowohl die Bauteilgeometrie als auch die Bauteilwerkstoffe verändert werden. Geeignet sind deshalb CAD-Systeme, die eine einfache geometrische Skalierung einer Konstruktion erlauben. Die veränderten Werkstoffe des Modells benötigen unter Umständen andere Bearbeitungsverfahren und beeinflussen dadurch die Nutzbarkeit bereits vorhandener NC-Programme, die auf CAD-Daten aufsetzen.

Aufwand bei der Durchführung von Experimenten

Bei der Durchführung von Experimenten werden die Auswirkungen einer konkreten Parameterkonfiguration auf den Prozeßverlauf überprüft. Aufgrund fehlender Optimierungsalgorithmen wird im Bereich der Prozeßsimulation oder allgemein bei der Prozeßuntersuchung anhand von Modellen nach der Methodik „Versuch und Irrtum“ vorgegangen. Deshalb werden die Parameterkonfigurationen variiert, um einen optimalen Parametersatz zu ermitteln. Der Aufwand, der zur Durchführung von Experimenten an Modellen notwendig ist, lässt sich entsprechend der zuvor beschriebenen Vorgehensweise folgendermaßen gliedern:

- Aufwand für die Durchführung eines Experiments
- Aufwand für die Variierung des Prozeßmodells

Bei der Verwendung körperlicher, ähnlichkeitstheoretischer Modelle entspricht die Durchführung eines Experimentes im Prinzip dem Ablauf des Originalprozesses. Der Modellprozeß kann dabei in seinen charakteristischen Zeiten (bspw. Zykluszeit) aufgrund der verwendeten Skalierung physikalischer Größen verändert sein. Die einzelnen Prozeßschritte bleiben jedoch in Inhalt und Reihenfolge erhalten.

Die Variation des Prozesses an einem ähnlichkeitstheoretischen Modell ist häufig mit einer Veränderung der anlagentechnischen Ausgestaltung des Prozesses verbunden. Dies gilt immer dann, wenn eine Variation der Geometrie, seltener auch der Werkstoffe von Anlagenbauteilen vorgesehen ist.

Für FEM-Modelle lässt sich der Aufwand, der in der Durchführung eines Experiments enthalten ist, nicht pauschal angeben. Die Durchführung des Experiments besteht hier aus der numerischen Berechnung des diskretisierten Problems. Dies wird vollständig von einer elektronischen Rechenmaschine durchgeführt. Dementsprechend drückt sich der für den Nutzer wahrnehmbare Aufwand für die Experimentdurchführung in der für die Berechnung der Lösung erforderlichen Rechenzeit aus. Die Rechenzeit lässt sich

anhand bestimmter Prozeßmerkmale, wie z. B. nicht-linearem Prozeßverhalten oder Kontaktproblemen, qualitativ abschätzen.

Analytische Modelle benötigen erheblichen Aufwand in der Erstellung des Modells. Auch hier ist der konkrete Aufwand stark vom abzubildenden Prozeß abhängig. Die Veränderung einzelner Parameter ist dagegen relativ einfach, da in den prozeßbeschreibenden Gleichungen lediglich die numerischen Werte der betreffenden Parameter geändert werden müssen. Die Experimentdurchführung beschränkt sich in der Regel auf das numerische Lösen der prozeßbeschreibenden Gleichungssysteme.

7.3.3 Gewichtungsfaktoren

Die technischen Möglichkeiten der betrachteten Verfahren stehen zwar unabhängig von der subjektiven Einschätzung des Beurteilenden fest. Durch die Gewichtung einzelner Kriterien kann der Anwender der Methoden den Einfluß dieser Kriterien auf einen konkreten Prozeß in die Entscheidungsfindung einbringen. Tritt bei einem Fertigungsprozeß beispielsweise sowohl ein hoher Umformgrad als auch Reibung auf, spielt jedoch die Reibung im Vergleich zur Umformung lediglich eine untergeordnete Rolle, kann dies durch Gewichtungsfaktoren zum Ausdruck gebracht werden.

Die Bewertung der wirtschaftlichen Kriterien hängt ebenfalls von gewichtungsfähigen Umständen ab. Durch eine unterschiedliche Gewichtung der Bewertungskriterien kann der Anwender beispielsweise der technisch geeigneten Modellierungsmethode ungeachtet der Kosten den Vorzug geben oder in umgekehrter Weise den Fokus unter Vernachlässigung technischer Eignung auf eine Minimierung der Kosten legen, die mit der Anwendung der Modellierungsmethoden verbunden sind.

Für die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren wird das Verfahren mit Hilfe der sogenannten Präferenzmatrix angewandt. Die Präferenzmatrix wurde als Verfahren ausgewählt, da es aufgrund seiner sukzessiven Vorgehensweise eine gedankliche Durchdringung der Problematik bereits auf niedrigem Kenntnisstand unterstützt und somit über die Bereitstellung bloßer numerischer Gewichtungsfaktoren hinaus einen Beitrag zum Verständnis der Auswahl eines geeigneten Modellierungsverfahrens leistet. Daneben bietet die Präferenzmatrix einfache Möglichkeiten für eine Überprüfung der Plausibilität des Ergebnisses. Das Verfahren selbst ist bei *Breiling & Knosala (1997), S. 238ff.* und in *Siemens (1974)* dargestellt. An dieser Stelle wird das Verfahren der Präferenzmatrix nur kurz beschrieben:

Zunächst wird jedes Beurteilungskriterium mit jedem anderen hinsichtlich seiner Bedeutung bzw. Wichtigkeit verglichen. Die Präferenzmatrix selbst ist eine $n \times n$ Dreiecksmatrix, deren Spalten und Zeilen von den einzelnen Beurteilungskriterien gebildet werden. In der Präferenzmatrix selbst wird das wichtigere von zwei jeweils miteinander verglichenen Kriterien abgelegt, beispielsweise in Form eines Kennbuchstabens oder der Spalten-/Zeilennummer.

Nach Abschluß der wechselseitigen Vergleiche zwischen den Kriterien wird die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Kriterien in der Präferenzmatrix ausgezählt. Die

einzelnen normierten Gewichtungsfaktoren erhält man schließlich, indem man die Häufigkeit eines jeden Beurteilungskriteriums durch die größte vorkommende Häufigkeit dividiert. Dementsprechend liegen die numerischen Werte der Gewichtungsfaktoren zwischen 0 und 1.

"Beeinflußt Kriterium x oder y die Aussagefähigkeit des Modells stärker?"

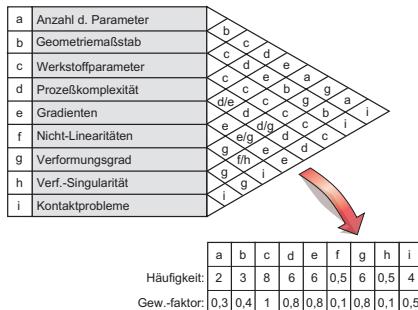


Abb. 7-12: Beispielhafte Präferenzmatrix für einen Heißformgebungsprozeß und die daraus hervorgehenden Gewichtungsfaktoren.

In Abb. 7-12 ist eine Präferenzmatrix beispielhaft für einen Heißformgebungsprozeß von Glas ausgefüllt dargestellt. Ein paarweiser Vergleich der Kriterien erfolgte dabei nach der Frage, welches von zwei gleichzeitig betrachteten Kriterien bei der gegebenen Problemstellung größeren Einfluß auf die Modellgenauigkeit hat. Hier soll die Präferenzmatrix lediglich zur Verdeutlichung des Verfahrens gezeigt werden.

7.4 Beispielhafte Auswahl eines Modellbildungsverfahrens

Nachdem zuvor eine systematische Vorgehensweise zur Auswahl einer Modellbildungsmethode vorgeschlagen wurde, soll diese nun beispielhaft angewendet werden. Dazu wird das Modellierungsproblem aus Kapitel 4, das Glaspressen, herangezogen. Die Auswahl einer Modellbildungsmethode geschieht auf Basis einer technisch-wirtschaftlichen Beurteilung der Anforderungen aus der Problemstellung.

Im folgenden werden zunächst die technisch-funktionalen Aspekte einer Modellbildung betrachtet. Es geht darum herauszufinden, welches der genannten Modellbildungsverfahren aus technischer Sicht das geeignetste Modell bereitstellen kann. Eine wirtschaftliche Bewertung der einzelnen Verfahren wird im Anschluß daran auf grobem Detaillierungsgrad vorgenommen. Um den Prozeß der Auswahl eines Modellbildungsverfahrens abzukürzen, werden zunächst Gewichtungsfaktoren für die tech-

nischen Beurteilungskriterien erarbeitet, um so die für diese Problemstellung herausragenden Kriterien zu erkennen.

Für diese so ermittelten Hauptkriterien wird im Anschluß ein Abgleich zwischen Problemcharakteristik und Leistungsbild des vom jeweiligen Kriterium betroffenen Modellbildungsverfahren erstellt. Dabei sind die Kriterien *Anzahl der prozeßbeschreibenden Parameter* und *Anzahl der Zwangsbedingungen für Werkstoffgrößen* als Ausschlußkriterien für die Ähnlichkeitstheorie immer zu prüfen. Sie werden deshalb bei der Feststellung der Gewichtungsfaktoren nicht berücksichtigt.

Geometriemaßstab

Der Geometriemaßstab spielt eine Rolle, wenn auch keine zentrale. Sollte ein skalierendes Modellbildungsverfahren angewandt werden, ist es wünschenswert, die Originalgeometrie unverändert im Modell zu übernehmen. Damit könnte mit einem Prozeßmodell gleichzeitig ein Produktmodell erzeugt werden. Dies ist umso schneller auswertbar, je genauer es dem Originalprodukt entspricht. Es sollte jedoch eine korrekte Modellbildung nicht an der Forderung nach einem originalgetreuen Maßstab scheitern.

Prozeßkomplexität

Die Prozeßkomplexität, hier als Oberbegriff verstanden für die Anzahl der Prozeßschritte und die geometrische Komplexität der verwendeten Komponenten, wie z. B. Werkzeuge, ist für das Glaspressen ebenfalls von großer Bedeutung. Vom Verfahrensablauf her betrachtet, stellt das Glaspressen keinen allzu komplizierten Prozeß dar. Dagegen ist die Geometrie des Produktes und damit der Werkzeuge für den Ablauf des Pressens entscheidend. Eine Vereinfachung der Produktgeometrie würde die Aussagekraft des Ergebnisses erheblich schwächen, da gerade die Werkzeuggeometrie und besonders ihre Oberflächenkontur das Fließen des zähflüssigen Glases wesentlich beeinflussen.

Gradienten

Die Ausbildung von großen Gradienten ist ebenfalls zu erwarten und ihre Wirklichkeitstreue Abbildung im Modell wird die Aussagekraft des Prozeßmodells stark verbessern. Große Gradienten, namentlich Temperaturgradienten, werden aufgrund der geringen Wärmeleitung von Glas und der im Vergleich dazu sehr hohen Wärmeleitfähigkeit der Formwerkzeuge im Produkt erwartet. Eine Ausbildung von ausgeprägten Temperaturgradienten bei Glasformgebungsprozessen wird auch in der Literatur genannt (s. dazu bspw. Richter u. a. 1987, S. 193 f. oder Locheignies u. a. 1996, S. 258). Die Temperaturgradienten beeinflussen das Erstarrungsverhalten und die damit verbundenen Glasfehler wie z. B. Kältefließwellen. Gerade diese Phänomene sind für die Beurteilung der produktionstechnischen Güte eines Prozesses sehr wichtig. Gradienten sollten daher möglichst originalgetreu im Modell abgebildet werden.

Nicht-Linearitäten

Nicht-Linearitäten treten in dem Anwendungsbeispiel nicht auf und tragen deshalb auch nicht zur Aussagefähigkeit des Modells bei.

Verformungsgrad

Der Verfomungsgrad sollte dagegen im Modell auf jeden Fall erhalten werden. Eine Änderung des Verformungsgrades würde eine erhebliche Veränderung des Originalprozesses darstellen. Auch der Verformungsgrad sollte daher nicht abstrahiert oder vereinfacht werden.

Verformungssingularitäten

Verformungssingularitäten treten im Glaspreßprozeß nicht auf. Es wird kein Material abgetrennt oder abgetragen.

Kontaktprobleme

Kontakte unterschiedlicher Materialien und Bauteile treten im Glaspreßprozeß auf und sie beeinflussen die Vorgänge im Prozeß, jedoch nach erstem Anschein nicht in einem so entscheidenden Maße wie andere Kriterien dies tun. Wichtig erscheint hier, daß die thermische Wechselwirkung zwischen Glas und Werkzeug erhalten bleibt.

Nach diesen Überlegungen läßt sich eine Präferenzmatrix erstellen, wie sie in Abb. 7-13 gezeigt wird. Aus der Präferenzmatrix ergeben sich die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Beurteilungskriterien.

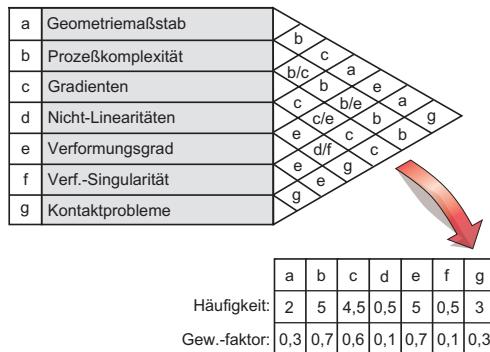


Abb. 7-13: Gewichtungsfaktoren der einzelnen Kriterien für das Glaspressen (s. Abb. 7-12).

Es zeigt sich nach Aufstellen einer Präferenzmatrix und Ermittlung der Gewichtungsfaktoren, daß die Prozeßkomplexität, die orginalgetreue Abbildung von großen Gradienten und die Beibehaltung des Verformungsgrades die bei weitem wichtigsten Kriterien für eine Modellierung des Glaspreßprozesses sind. Nachgeordnet sind noch Kontaktprobleme und der Geometriemaßstab zu nennen. Die Kriterien Anzahl der prozeßbeschreibenden Parameter und Anzahl der Zwangsbedingungen für Werkstoffgrößen sind als Ausschlußkriterien auf jeden Fall zu prüfen.

	FEM	Ähnlichkeitstheorie Glaspreßprozeß	Ähnlichkeitstheorie thermo-mechanisch
Anzahl der Parameter	○	○	●
Geometriemaßstab	○	○	●
Anzahl der Werkstoffparameter	○	○	●
Prozeßkomplexität	○	●	○
Gradienten	●	○	○
Verformungsgrad	●	○	○
Kontaktprobleme	●	○	○

● betrifft Methode
○ betrifft Methode nicht

Abb. 7-14: Darstellung der problemrelevanten Kriterien und der von Ihnen betroffenen Verfahren.

Hinsichtlich der wesentlichen Beurteilungskriterien wird eine Matrix gemäß Abb. 7-10 zur Diskussion herangezogen, die wiederum die entscheidenden Kriterien mit den von ihnen betroffenen Modellbildungsverfahren enthält (s. Abb. 7-14).

Im folgenden werden die Kriterien aus Abb. 7-14 für die darin bezeichneten Modellbildungsmethoden überprüft. Für die Ähnlichkeitstheorie werden operationalisierte Verfahren genutzt.

Anzahl der prozeßbeschreibenden Parameter

Die Anzahl der prozeßrelevanten Parameter muß als Ausschlußkriterium für die Ähnlichkeitstheorie auf jeden Fall betrachtet werden. Diese beträgt zehn, wie in Kap. 4.3.1 gezeigt werden wird. Der thermo-mechanische Glaspreßprozeß benötigt demgegenüber vier Basisdimensionen zur vollständigen Darstellung aller Parameter (Länge L, Masse M, Zeit T, Temperatur Θ). Die Überprüfung erfolgt mit Hilfe des in Abb. 7-8 dargestellten Formulars.

Wie in Abb. 7-15 dargestellt, übersteigt die Anzahl der prozeßbeschreibenden Parameter die für diesen Prozeß kritische Grenze nicht. Folglich kann die Ähnlichkeitstheorie aufgrund dieses Kriteriums nicht ausgeschlossen werden.

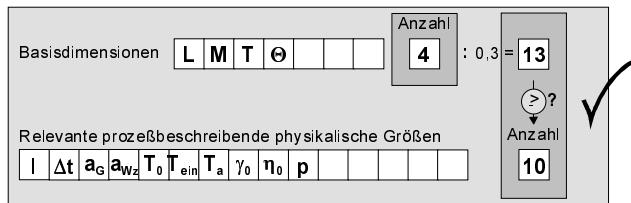


Abb. 7-15: Überprüfung der Anzahl der zur Prozeßbeschreibung benötigten Parameter (Indices: Wz – Werkzeug; G – Glas; 0 – Bezugspunkt).

Anzahl der Zwangsbedingungen für Werkstoffgrößen und Geometriemaßstab

Die Anzahl der Zwangsbedingungen für Werkstoffgrößen bei einer Modellübertragung des Glaspressens wird ebenfalls überprüft. Dazu werden die prozeßrelevanten Werkstoffgrößen aus Abb. 7-15 nach Werkstoffen gruppiert. Es wird zunächst davon ausgegangen, daß die Maßstäbe für die Geometrie und den zeitliche Ablauf des Modellprozesses frei einstellbar sein sollen. Eventuell erweist sich einer der beiden frei einstellbaren Maßstäbe bei einer detaillierteren Untersuchung als unkritisch. Dann wird der resultierende Freiheitsgrad r_f erhöht, was die Anzahl schließlich bestehender Zwangsbedingungen weiter reduziert. Mit einer Annahme von zwei frei wählbaren Maßstäben ist man zunächst auf der sicheren Seite.

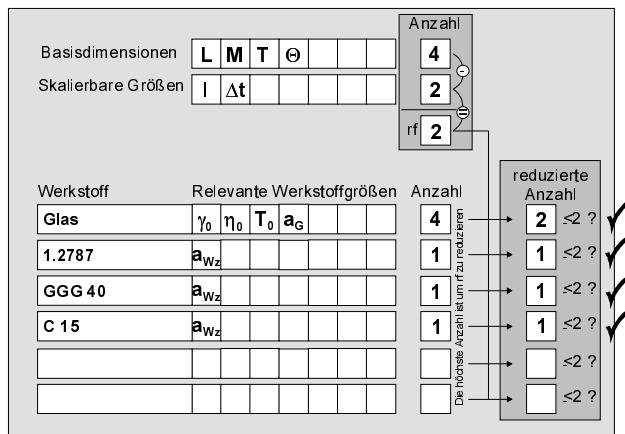


Abb. 7-16: Überprüfung der Anzahl der Zwangsbedingungen für Stoffgrößen bei einer Modellübertragung des Glaspressens (Indices: Wz – Werkzeug; G – Glas; 0 – Bezugspunkt).

Abb. 7-16 zeigt, daß alle Bedingungen hinsichtlich der Anzahl der Zwangsbedingungen für Werkstoffgrößen erfüllt werden. Aus der freien Skalierbarkeit der Geometrie resultiert, daß auch das Kriterium des Geometriemaßstabes erfüllt werden kann.

Prozeßkomplexität

Die Prozeßkomplexität muß im Hinblick auf eine Verwendung analytischer Modellbildungsmethoden näher untersucht werden. Die Prozeßkomplexität des Glaspressens beruht vor allem auf den auftretenden Produktgeometrien. Es handelt sich bei Glaspreßartikeln im Haushaltsglasbereich hauptsächlich um frei gestaltete Objekte, die keinerlei Regelgeometrien aufweisen. Im Gegenteil, häufig sind die Außenflächen der Glasartikel durch Dekorelemente unregelmäßig gestaltet. Die analytische Beschreibung der Produktgeometrie wird hier unverhältnismäßig aufwendig bis unmöglich. Hinzu kommt, daß gerade die Produktgeometrie im Falle von auftretenden Problemen beim Pressen häufig verändert werden muß. Damit wird gerade das für analytische Methoden am schwierigsten beschreibbare Prozeßmerkmal zur variablen Größe. Ein Einsatz analytischer Methoden zur Erzeugung eines Prozeßmodells für das Glaspressen kommt deshalb nicht in Frage.

Gradienten

Große Temperaturgradienten werden aufgrund der allgemein geringen Wärmeleitfähigkeit von Glas im Vergleich zu den metallischen Formwerkzeugen vor allem im Produkt erwartet. Da die Wandstärke der gepreßten Artikel in der Regel im Bereich einiger Millimeter liegt und damit nur ca. 5% der gesamten Werkzeugabmessung beträgt, können die Temperaturgradienten gerechtfertigterweise als groß angesehen werden. Damit wird die Modellierung des Vorganges in derzeit verfügbaren FEM-Systemen erschwert.

Verformungsgrad

Ähnliches gilt für den Verformungsgrad. Durch das Pressen des näherungsweise ellipsoiden Glaspostens in seine endgültige Gestalt treten beim Glaspressen große Formänderungen auf. Diese Formänderungen bereiten den FEM-Systemen größere Schwierigkeiten als anderen Modellbildungsverfahren.

Damit erfüllt die Ähnlichkeitstheorie die technischen Anforderungen hinsichtlich der vier wichtigsten Kriterien am besten. Der Vollständigkeit halber seien kurz die restlichen Kriterien erwähnt: Kontaktprobleme treten mit Sicherheit auf, da sich das Glas während des Fließens nur innerhalb der Formkavität ausbreiten darf. Hier hat die FEM ebenfalls die größeren Schwierigkeiten als die beiden anderen Methoden. Der Geometriemaßstab könnte für die Ähnlichkeitstheorie ein Problem darstellen, es wird in Kap. 4.4 jedoch endgültig gezeigt, daß der Geometriemaßstab in diesem Problemfall frei wählbar ist und somit so definiert werden kann, daß daraus keine Modellbildungsprobleme resultieren.

Eine wirtschaftliche Beurteilung erfolgt für Ähnlichkeitstheorie und FEM auf grobem Detaillierungsniveau unter der Annahme, daß alle Gerätschaften für eine Modellbildung angeschafft werden müssen. Grundlage der Beurteilung ist ein Vergleich der

zu investierenden Summen für eine Modellbildung, fünf Modellvariationen und fünf Modellexperimente. Die analytischen Verfahren werden aufgrund ihrer mangelhaften technischen Eignung nicht weiter betrachtet.

Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten, die in den groben Kostenschätzungen enthalten sind, sind beide Verfahren in ihrer Anschaffung nahezu gleich teuer. Aus wirtschaftlicher Sicht lässt sich demnach keine der technisch sinnvollen Methoden eindeutig bevorzugen. Die Entscheidung für eine bestimmte Methode erfolgt daher aus der technischen Bewertung heraus. Abb. 7-17 zeigt zusammenfassend das qualitative Ergebnis einer technisch-wirtschaftlichen Mehtodenauswahl.

Zusammenfassend wird aus technisch-wirtschaftlicher Sicht die Erstellung eines Prozeßprototypen für das Glaspressen mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie empfohlen. Eine Modellierung des Glaspressens mit FEM scheint mit Einschränkungen möglich. Die analytischen Methoden scheiden für diesen Anwendungsfall aus.

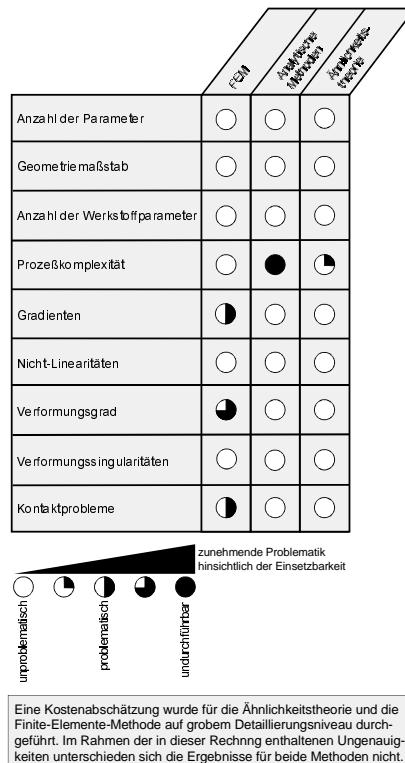


Abb. 7-17: Matrix mit den qualitativen Beurteilungen der einzelnen Methoden. Die Ähnlichkeitstheorie erweist sich für diesen Anwendungsfall als technisch am geeignetsten.

7.5 Zusammenfassung

Anhand einer Anforderungsliste, die aus der Begriffsdefinition des Prozeßprototypen abgeleitet wurde, wurden drei Modellbildungsverfahren als Process-Prototyping-Methoden identifiziert. Dabei handelt es sich um die Finite-Element-Methode, analytische Modellbildungsmethoden und die Ähnlichkeitstheorie.

In einem nachfolgenden Schritt wurde ein System beschrieben, das für eine problemgerechte Auswahl eines Modellbildungsverfahrens aus dem Pool der Process-Prototyping-Verfahren geeignet ist. Das vorgeschlagene Auswahlverfahren trägt aufgrund seiner Struktur dem derzeitigen Kenntnisstand hinsichtlich einer gezielten Methodenauswahl Rechnung. Die Beurteilung der Methoden für eine gezielte Auswahl erfolgt nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Eine qualitative Zuordnung von Methoden und Beurteilungskriterien ist in Abb. 7-10 als Kontrollmatrix dargestellt. Dort ist angegeben, welches Modellbildungsverfahren im Hinblick auf ein auftretendes Kriterium besonders zu untersuchen ist. Hinsichtlich der inhaltlichen Bedeutung und Interpretation des Einflusses der einzelnen Kriterien auf die Modellbildungsverfahren sei auf das Kapitel 7.3.2.1 verwiesen.

Die technischen Beurteilungskriterien wurden aus den Stärken und Schwächen der einzelnen Methoden heraus entwickelt. Innerhalb des zu lösenden Problems (nicht des Prozesses) ist gezielt nach Merkmalen zu suchen, die diese Kriterien erfüllen. Dementsprechend erfolgt eine Methodenauswahl problem- und nicht prozeßorientiert. Eine eindeutige Zuordnung von Prozeß zu einer Modellbildungsmethode existiert deshalb nicht. Dies erscheint sinnvoll, da in der Problembeschreibung alle wesentlichen Prozeßmerkmale enthalten sind. Umgekehrt ist dies jedoch nicht zwingend der Fall.

Eine wirtschaftliche Bewertung einer Prozeßmodellierung kann ebenfalls nicht oder nur schlecht nach Prozeßkriterien klassifiziert vorausschauend durchgeführt werden. Auch hier ist eine Konzentration auf das zu lösende Problem besser geeignet, in der Zusammenschau mit den Charakteristika der Modellbildungsmethoden den entstehenden Aufwand abzuschätzen. Dabei sind die Phasen, in denen Aufwand entsteht, streng zu unterscheiden. Diese sind Modellbildung, Experimentdurchführung und Modellvariation.

Durch eine Gewichtung der Beurteilungskriterien kann auf einzelne Aspekte der Problemstellung fokussiert werden. Dies kann zum einen eine Gewichtung der technischen gegenüber den wirtschaftlichen Kriterien, zum anderen auch eine Gewichtung der technischen bzw. wirtschaftlichen Kriterien untereinander betreffen. Die Gewichtungsfaktoren werden durch eine Präferenzmatrix ermittelt.

Um das Auswahlverfahren abzukürzen, ist es sinnvoll, die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren vorzuziehen und dann lediglich die Kriterien mit den stärksten Gewichtungen zu prüfen (s. Abb. 7-18).

Anhand des zuvor dargestellten Anwendungsbeispiels Glaspressen wurde eine Auswahl eines Modellbildungssystems beispielhaft durchgeführt. Dabei stellte sich heraus,

daß eine wirtschaftliche Bewertung der in Frage kommenden Methoden im voraus mit deutlich größeren Unsicherheiten behaftet ist als die technisch-funktionale Beurteilung. Jedoch läßt sich mit dieser Systematik eine Methodenauswahl qualifizierter treffen als bisher. Mit zunehmender Erfahrung können weitere Kriterien identifiziert und operationalisiert werden, so daß sich die Aussagesicherheit der vorgeschlagenen Auswahlmethodik kontinuierlich verbessert.

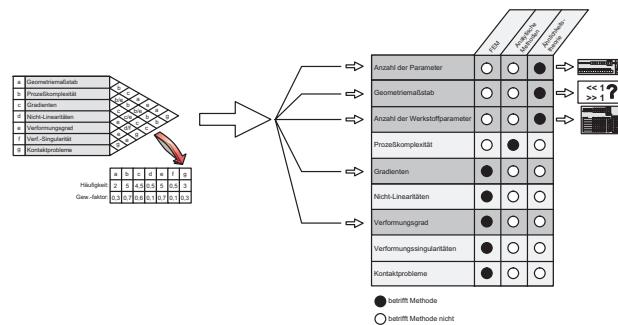


Abb. 7-18: Vorgehensweise zur problemgerechten Auswahl von Modellbildungsverfahren.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fortschritte auf dem Gebiet der Produkt- und Prozeßentwicklung, vor allem im Hinblick auf die Methoden des Simultaneous Engineering, haben zu einem wesentlich höheren Reifegrad der Produkte und Prozesse bereits in frühen Phasen der Entwicklung geführt. Dabei gelingt es, die Entwicklung der Produkte schneller als die der Prozesse abzusichern. Hier können Prozeßprototypen helfen, frühzeitig Erkenntnisse über Prozeßabläufe und Wechselwirkungen zu ermitteln und Prozesse sicher zu gestalten. Es wurden in dieser Arbeit zunächst mehrere Modellbildungsverfahren in ihrer Funktionsweise und ihren bisherigen Anwendungen vorgestellt. Dabei wurde offensichtlich, daß bisher in der Produktionstechnik kaum, im Bereich diskreter Prozesse überhaupt keine körperlichen Prozeßmodelle eingesetzt wurden. Ähnlichkeitsansätze wurden zwar verfolgt, waren jedoch häufig nicht ausreichend theoretisch fundiert. Um hier weiteres Potential der Prozeßmodellierung und -untersuchung für die Produktionstechnik nutzbar zu machen, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Einsatz der Ähnlichkeitstheorie als leistungsfähige Methode zur Erzeugung körperlicher Modelle in der Produktionstechnik vorgestellt.

Die allgemeine Vorgehensweise der Ähnlichkeitsübertragung eines Prozesses auf ein Modell ist unabhängig vom abzubildenden Prozeß gleich: Zunächst wird eine dimensionslose Darstellung des Prozesses erarbeitet. Diese besteht aus prozeßbeschreibenden dimensionslosen Kennzahlen. Durch die idem-Bedingung, die Original- und Modellprozeß miteinander verknüpft, wird eine numerische Identität gleicher Kennzahlen in den beiden Prozessen hergestellt. Aus dieser geforderten Gleichheit der Zahlenwerte einer Kennzahl in Modell- und Originalprozeß lassen sich schließlich Maßstabsgleichungen ableiten, mit deren Hilfe man den Wissenstransfer zwischen Modell- und Originalprozeß gestalten kann. Einerseits erlauben die Maßstabsgleichungen die Konstruktion eines Modellprozesses aufbauend auf den Daten des Originalprozesses, andererseits können die am Modell gewonnenen Ergebnisse mit den Maßstabsgleichungen auf das Original zurück übertragen werden. Darüber hinaus dienen die Maßstabsgleichungen auch dazu, die Machbarkeit eines Modells zu überprüfen. Einander widersprechende Maßstäbe für ein und dieselbe physikalische Größe beispielsweise, oder unrealisierbare Ausmaße einer Modellanlage sind Hindernisse bei der Erarbeitung eines ähnlichkeitstheoretischen Prozeßmodells. Sie können jedoch unter Umständen durch Aufteilung des Modells in mehrere Teilmodelle überwunden werden.

Aus produktionstechnischer Sicht spielen bei der Ähnlichkeitsübertragung und Modellbildung zwei Punkte eine wesentliche Rolle: die Erarbeitung der dimensionslosen Prozeßdarstellung und die Ermittlung von Modellwerkstoffen für den Modellprozeß.

Die dimensionslose Darstellung des Produktionsprozesses geschieht am geeignetsten durch eine Dimensionsanalyse unter Verwendung einer Relevanzliste. Auf diese Art und Weise kann das in der industriellen Realität zur Verfügung stehende Produktionswissen effektiv genutzt werden. Alle am Produktionsprozeß beteiligten Personen können so ihr Wissen in die Modellbildung einbringen. Darüber hinaus ermöglicht die

Anwendung der Relevanzlistenmethode eine Diskussion des Prozeßmodells, an der alle mit dem Produktionsprozeß verbundenen Personen vom Facharbeiter bis zum Ingenieur beteiligt werden können. Dies steigert erheblich die Akzeptanz des Prozeßmodells und der mit ihm erarbeiteten Ergebnisse.

Die Ermittlung von Modellwerkstoffen ist nur für veränderliche Stoffgrößen problematisch. Im Falle konstanter Stoffwerte muß lediglich ein Stoff mit definierten Eigenschaften (gemäß Akzeptanzbereich) recherchiert oder, wenn möglich, erzeugt werden. Müssen dagegen veränderliche Stoffgrößen berücksichtigt werden, wird bei der Werkstoffrecherche nicht auf Stoffeigenschaften, sondern auf Stoffverhalten abgestellt. Entscheidend ist dabei, daß die Verwendungsmöglichkeit eines Modellwerkstoffes auf dimensionsloser Ebene überprüft wird. Für die Übertragung der Stoffdarstellung vom dimensionsbehafteten in ein dimensionsloses Koordinatensystem wurde die Standardtransformation angewendet, eine Methode aus dem Bereich des chemischen Anlagenbaus.

Einen Anhaltspunkt über die nötige Werkstoffrecherche gibt die ‚Regel der gleichen Art‘. Da die Gleichungen der Standardtransformation mathematisch eindeutig und hinreichend sind, ergibt sich daraus, daß charakteristisches Stoffverhalten auch in der dimensionslosen Darstellung erhalten bleibt. Materialien können deshalb am wahrscheinlichsten durch gleichartige bzw. artverwandte Werkstoffe ersetzt werden. Dadurch kann die für eine Werkstoffrecherche benötigte Zeit erheblich verkürzt werden.

Die Versuchsplanung für eine Ähnlichkeitstheoretische Versuchsanlage unterscheidet sich nicht von der Versuchsplanung für eine Originalanlage. Um einen Prozeß zu optimieren, können dabei die Methode der ein-, teil- oder vollfaktoriellen Versuchsplanung oder je nach erforderlicher Reduktion des Versuchsaufwands Methoden nach Shainin und Taguchi (*Reinhart u. a. 1996, S. 136-138*) eingesetzt werden.

Eine Ähnlichkeitstheoretische Versuchsanlage wurde beispielhaft für den Prozeß des Glaspressens konstruiert. Für die Erstellung des Modells wurde Wissen aus allen personellen Ebenen eines Betriebes, d. h. Facharbeiter der Produktionslinie, Techniker und Ingenieure, gesammelt und eingebracht. Dadurch wurde der Akzeptanzgrad für das Prozeßmodell während sämtlicher Phasen seiner Entstehung durch alle personellen Ebenen des Betriebes hinweg stark gesteigert.

An der Ähnlichkeitstheoretischen Versuchsanlage konnten durch Verwendung eines geeigneten Modellwerkstoffes als Ersatzstoff für Glas Prozeßtemperaturen und Prozeßdrücke im Vergleich zum Originalprozeß erheblich gesenkt werden. Dadurch war es möglich, die Kosten für die Versuchsanlage gering zu halten und Versuche von der Produktionsanlage entkoppelt wirtschaftlich durchzuführen. Neben den quantitativen Ergebnissen konnten zahlreiche qualitative Übereinstimmungen zwischen Modell- und Originalprozeß zur Beurteilung und Optimierung des Prozeßmodells genutzt werden. Ein großer Wert des Modells lag darin, daß es von den Arbeitern der Originalanlage bedient werden konnte. Ohne langwierige Einweisungen waren sie trotz fehlenden Expertenwissens auf dem Gebiet der Prozeßmodellierung bzw. -simulation aufgrund der nach Ähnlichkeitskriterien übertragenen Abläufe schnell in der Lage, Experimente

durchzuführen, das resultierende Produkt zu interpretieren und Parameterveränderungen abzuleiten und einzustellen.

Nach der Darstellung des Einsatzes der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik wurde die Ähnlichkeitstheorie im Rahmen von Process Prototyping im Umfeld anderer Modellbildungsmethoden mit ähnlichem Leistungsvermögen betrachtet. Process Prototyping versucht Werkzeuge bereitzustellen, mit denen Erkenntnisse über produktionstechnische Prozesse frühzeitiger, schneller und in größerem Umfang als bisher systematisch erarbeitet werden können. Diese Werkzeuge umfassen Modellierungsmethoden, weiterhin die dazu nötigen Kenntnisse um die Methodenanwendung, die problemgerechte Auswahl geeigneter Methoden und die Integration der Anwendung von Process-Prototyping-Methoden in betriebliche Abläufe. Vieles davon wurde bisher nur angedacht bzw. auf konzeptioneller Ebene ausgearbeitet und bietet Raum für weitere Untersuchungen.

Als Methoden, die den Anforderungen des Process Prototyping hinsichtlich Experimentierfähigkeit, benötigten Expertenwissens, quantitativen Zugriffs auf physikalische Wechselwirkungen und Detaillierungsgrad entsprechen, wurden zunächst die analytischen Modellierungsmethoden, die Finite-Element-Methode und die Ähnlichkeitstheorie identifiziert. In Zukunft wäre hier auch eine kombinierte Methode, zusammengesetzt aus der 3D-Bewegungssimulation und der Finite-Elemente-Methode oder auch der 3D-Bewegungssimulation und der Mehrkörper-Simulation denkbar oder sogar wünschenswert.

Zur problemgerechten Auswahl einer Process-Prototyping-Methode wurde eine gewichtete technisch-wirtschaftliche Beurteilung des Problems empfohlen. Die technischen Kriterien ergeben sich dabei aus der Funktionalität der Modellbildungs- und Untersuchungsmethoden. Anhand der bekannten funktionalen Stärken und Schwächen der einzelnen Methoden ist es möglich, gezielt nach Merkmalen des bestehenden Problems bzw. Prozesses zu suchen, deren Modellierung ein solches Leistungscharakteristikum einer Methode betrifft. Die wirtschaftliche Komponente bei der Beurteilung der Modellierungsmethoden stellt auf die entstehenden Kosten durch die drei wesentlichen Kriterien Modellbildung, Modellvariation und Experimentdurchführung ab. Die Gewichtung der einzelnen Beurteilungskriterien erfolgt durch eine Präferenzmatrix.

Für die Zukunft ergibt sich gerade im Hinblick auf die Ausgestaltung des Process Prototyping als Werkzeug zur Erarbeitung von Prozeßwissen erheblicher Forschungsbedarf. Dieser Bedarf betrifft alle vier Ebenen des Process-Prototyping-Konzeptes, Methodenbereitstellung, Methodenanwendung, problemgerechte Methodenauswahl und Integration in betriebliche Abläufe.

Der kontinuierliche technische Fortschritt erfordert ein andauerndes Überprüfen des Pools an bereitgestellten Methoden. Durch Integration oder Zusammenführen mehrerer unterschiedlicher Modellbildungsmethoden können neue, leistungsfähige Verfahren entstehen. Als Beispiel wurde die eine Integration von FEM- und MKS-Funktionalitäten in die 3D-Bewegungssimulation genannt.

Weiterhin sind die Methoden kontinuierlich anzuwenden um die Wissensbasis über die einzelnen Anwendungen zu verbreitern. Hier ist vor allem eine parallele Anwendung mehrerer Methoden auf das gleiche Problem sinnvoll. Dadurch kann das hier vergestellte Konzept zur problemgerechten Auswahl von Modellbildungsmethoden detailliert und weiter objektiviert werden. Darüber hinaus muß es Ziel von Forschungsarbeiten sein, Werkzeuge zu entwickeln, die Menschen die Anwendung der einzelnen Process-Prototyping-Verfahren weiter erleichtert.

Schließlich steht das komplette Arbeitspaket der Integration eines Werkzeuges wie Process Prototyping in betriebliche Abläufe aus. Auch dafür wird weiteres Wissen um die Methodenanwendung benötigt.

9 Literaturverzeichnis

Amann 1992

Amann, W.: Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionsystemen. Berlin: Springer, 1992. (iwb Forschungsberichte 71)

Baker u. a. 1991

Baker, W. E.; Westine, P. S.; Dodge, F. T.: Similarity Methods in Engineering Dynamics. 2nd revised edition. Amsterdam: Elsevier, 1991.

Breiling & Knosala 1997

Breiling, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme: theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen. Berlin: Springer, 1997.

Brox 1995

Brox, H.: Allgemeiner Teil des Bürgerlichen Gesetzbuches. 19. Auflage. Köln: Carl Heymanns, 1995.

Buckingham 1914

Buckingham, E.: On Physically Similar Systems: Illustrations of the Use of Dimensional Equations. Physics Review IV 3 (1914).

Charwat 1992

Charwat, H.-J.: Lexikon der Mensch-Maschine-Kommunikation. München: Oldenbourg, 1992.

Cho 1987

Cho, M.-L.: Bewertung der Anwendbarkeit der Finite-Element-Methode für die Umformtechnik. Düsseldorf: Stahleisen, 1987. (Umformtechnische Schriften 12)

Close & Frederick 1993

Close, C. M.; Frederick, D. K.: Modeling and Analysis of Dynamic Systems. 2nd edition. Boston, MA, USA: Houghton Mifflin Company, 1993.

Decker 1992

Decker, K.-H.: Maschinenelemente: Gestaltung und Berechnung. München: Carl Hanser, 1992.

Dehnhardt 1981

Dehnhardt, S.: Strömungsverlauf und Tropfenbildung im Speiserkopf. Dissertation RWTH Aachen, 1981.

Dicks 1995

Dicks, N.: Physikalische Simulation des Strangpressens zur Analyse verschiedener Problemstellungen. Untersuchungen des Schalefehlers. Stoffflußuntersuchungen in Kammermatrizen. Düsseldorf: Stahleisen, 1995. (Umformtechnische Schriften 57)

DIN 8580 1985

DIN 8580 (Entwurf): Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth, 1985.

DIN 19226, Teil 1 1994

DIN 19226, Teil 1: Regelungstechnik und Steuerungstechnik: Allgemeine Grundbegriffe. Berlin: Beuth, 1994.

DIN 66201, Teil 1 1981

DIN 66201, Teil 1: Prozeßrechensysteme: Begriffe. Berlin: Beuth, 1981.

Dreyer 1993

Dreyer, T. P.: Modelling with Ordinary Differential Equations. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1993.

Elsner 1980

Elsner, N.: Grundlagen der technischen Thermodynamik. 2. Auflage. Braunschweig: Vieweg, 1980.

Eversheim u. a. 1996

Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T.; Weck, M. (Hrsg.): Schnelle Produktentwicklung - 3D-Modellierung und Rapid Prototyping. In: Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T.; Weck, M. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktions-technik: Aachener Perspektiven. Düsseldorf: VDI, 1996, S. 3-3 – 3-42.

Eversheim & Klocke 1998

Eversheim, W.; Klocke, F.: Werkzeugbau mit Zukunft. Strategie und Technologie. Berlin: Springer, 1998.

Fishwick 1995

Fishwick, P. A.: Simulation Model Design and Execution: Building Digital Worlds. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1995.

Fleischer 1996

Fleischer, M.: Auslegung ausgewählter Schmiedeprozesse mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Düsseldorf: Stahleisen, 1996. (Umformtechnische Schriften 67)

Gebhardt 1996

Gebhardt, A.: Rapid Prototyping: Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung. München: Carl Hanser, 1996.

Gebhardt 1997

Gebhardt, J.: Innovative Produktion – Produkt, Markt, Prozeß, Mensch. In: Milberg, J.; Reinhart, G.: Münchener Kolloquium '97, München. Landsberg: Verlag Moderne Industrie 1997, S. 203-208.

Geuer 1996

Geuer, A.: Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung. Berlin: Springer, 1996.

Götz 1995

Götz, W.: Thermo-fluiddynamische Vorgänge in Glasschmelzwannen. Dissertation TU-München, 1995.

Hergemöller 1982

Hergemöller, R.: Anwendung der Ähnlichkeitstheorie auf Probleme der Umformtechnik. Dissertation RWTH Aachen, Fakultät für Bergbau und Hüttenwesen, 1982.

Kaiser 1994

Kaiser, J.: Abteilungsdenken überwinden. Die neue Fabrik (1994), S. 98-101.

Kesselring 1952

Kesselring, F.: Bewertung von Konstruktionen. Düsseldorf: Deutscher Ingenieur-Verlag, 1952.

Kramer 1994

Kramer, A.: Untersuchungen zum Kaltwalzen von dünnem Band und Folie nach dem Verfahren der Ähnlichkeitstheorie. Düsseldorf: Stahleisen, 1994. (Umformtechnische Schriften 48)

Kuchling 1994

Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. 14. Auflage. Leipzig: Fachbuchverlag, 1994.

Kummetsteiner 1994

Kummetsteiner, G.: 3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme. Berlin: Springer, 1994. (iwb Forschungsberichte 66)

Lenk 1989

Lenk, R. (Hrsg.): Physik. 2. Auflage. Leipzig: Brockhaus, 1989.

Lenz u. a. 1998

Lenz, B.; Reinhart, G.; Rick, F.: Process Prototyping - Finite Element Modelling of the Laser Welding Process. In: Lasers in Engineering (1998) 7, p. 253-264.

Lindemann & Kleedorfer 1997

Lindemann, U.; Kleedorfer, R.: Erfolgreiche Produkte durch integrierte Produktentwicklung. In: Milberg, J.; Reinhart, G.: Münchener Kolloquium '97, München. Landsberg: Verlag Moderne Industrie 1997, S. 115-136.

Lindemann & Reichwald 1998

Lindemann, U.; Reichwald, R.: Integriertes Änderungsmanagement. Berlin: Springer, 1998.

Linner 1992

Linner, S.: Entwicklungszeiten verkürzen durch graphische Simulation. In: VDI Berichte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992, S. 101-115 (VDI-Berichte 993.1).

Linner 1994

Linner, S.: Ohne Fehler. 3D-Fertigungssimulation verhindert Kollisionen und reduziert die Rüstzeit. Maschinenmarkt 100 (1994) 22

Linner 1997

Linner, S.: Planungstool der Zukunft. Die Neue Fabrik (1997), S. 34-36.

Lochgnies u. a. 1996

Lochgnies, D. u. a.: Computation procedure for the temperature in hot glass. In: Glastechnische Berichte Glass Science and Technology 69 (1996) 8, S. 253-264.

Loferer & Kress 1997

Loferer, M.; Kress, M.: Miteinander statt nebeneinander. Die neue Fabrik (1997), S. 44-46.

Marek & Götz 1995

Marek, R.; Götz, W.: Numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen mit finiten Differenzen: eine methodische Einführung am Beispiel der Wärmeleitung. Buchloe: Moreno-Verlag, 1995.

Maulhardt 1991

Maulhardt, U.: Dynamisches Verhalten von Kreissägen. Berlin: Springer, 1991.
(iwb Forschungsberichte 38)

Mavroudis 1971

Mavroudis, M.: Modelluntersuchungen über die Ausbildung der Zirkulationszone vor den Blasformen von Hochöfen. Dissertation TU Clausthal, 1971.

Mayerle 1984

Mayerle, O.: Modelluntersuchung zur Temperaturhomogenisierung und Bildung der Glastropfen im Speiserkopf. Dissertation RWTH Aachen, 1984.

Mayinger 1990

Mayinger, F.: Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen. 13. Aufl. Berlin: Springer, 1990.

Mayinger & Götz 1995

Mayinger, F.; Götz, W.: Thermo-fluiddynamische Vorgänge in Glasschmelzwannen. Forschungsbericht: Bayerischer Forschungsverbund Systemtechnik, 1995.

Milberg 1971

Milberg, J.: Analytische und experimentelle Untersuchungen zur Stabilitätsgrenze bei der Drehbearbeitung. Berlin: Technische Universität, Fachbereich Konstruktion und Fertigung, Dissertation.

Milberg 1994

Milberg, J.: Unsere Stärken stärken - Der Weg zu Wettbewerbsfähigkeit und Standortsicherung. In: Milberg, J.; Reinhart, G.: Münchener Kolloquium '94, München. Landsberg: Verlag Moderne Industrie 1994, S. 11-32.

Milberg u. a. 1994

Milberg, J.: Matching the Needs of Product and Process: Lasers in Development and Production. In: Geiger, M.; Vollertsen, F.: Laser Assisted Netshape Engineering. Proceedings of the LANE '94, Bamberg. Bamberg: Meisenbach 1994, S. 669-686.

Milberg 1997

Milberg, J.: Produktion - Eine treibende Kraft für unsere Volkswirtschaft. In: Milberg, J.; Reinhart, G.: Münchener Kolloquium '97, München. Landsberg: Verlag Moderne Industrie 1997, S. 19-39.

Milberg u. a. 1994

Milberg, J.; Schuster, G.; Kaiser, J.: Mehr Effizienz und Qualität in der Produkt- und Produktionsgestaltung. In: VDI-Gesellschaft EKV: Jahrbuch 1994. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.

Moog 1985

Moog, W.: Ähnlichkeits- und Analogielehre. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985.

Niemann 1981

Niemann, G.: Maschinenelemente Band I: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 2. Aufl. Berlin: Springer 1981 (Band I)

Pawlowski 1971

Pawlowski, J.: Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung. Berlin: Springer, 1971.

Pawlowski 1991

Pawlowski, J.: Veränderliche Stoffgrößen in der Ähnlichkeitstheorie. Frankfurt/Main: Otto Salle, 1991.

Philipp 1993

Philipp, F.-D.: Physikalische Prozeßdaten für die numerische Simulation von Warmumformverfahren. Düsseldorf: Stahleisen, 1993. (Umformtechnische Schriften 42)

Raith 1995

Raith, P.: Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung. Berlin: Springer, 1995. (iwb Forschungsberichte 77)

Reinhart 1996

Reinhart, G.: Instrumente für den Erfolg am globalen Markt. In: 13. Deutscher Montagekongreß. Landsberg: verlag moderne industrie, 1996, S. 1-17.

Reinhart u. a. 1996

Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement: Ein Kurs für Studium und Praxis. Berlin: Springer, 1996.

Reinhart 1997

Reinhart, G.: Innovative Prozesse und Systeme – Der Weg zu Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. In: Milberg, J.; Reinhart, G.: Münchener Kolloquium '97, München. Landsberg: Verlag Moderne Industrie 1994, S. 173-202.

Reinhart 1998

Reinhart, G.: Simultan ist gut – Gemeinsam ist besser. In: 14. Deutscher Montagekongreß. Landsberg: verlag moderne industrie, 1998, S. 1-18.

Reinhart & Feldmann 1997

Reinhart, G.; Feldmann, K.: Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft? Stand und Perspektiven. München: Herbert Utz, 1997.

Reinhart & Goldstein 1994

Reinhart, G.; Goldstein, B.: Gestaltung der internen Kunden-Lieferanten-Beziehungen. In: Mayinger, F. [Hrsg.]: Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch systemtechnische Mittel. Tagungsband. Lehrstuhl A für Thermodynamik, Technische Universität München, 1994.

Reinhart & Trossin 1998

Reinhart, G.; Trossin, H.-J.: Process Prototyping - A Low Temperature Model of a Glass Pressing Process. In: A. G. Clare; L. E. Jones (ed.): Advances in Fusion and Processing of Glass II. Westerville: American Ceramic Society 1998 (5).

Richter u. a. 1987

Richter, H. u. a.: Glastechnologie. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1987.

Robinson 1994

Robinson, S.: Succesful Simulation. A Practical Approach to Simulation Projects. London, GB: Mc Graw-Hill Book Company, 1994.

Scholze 1991

Scholze, H.: Glass. New York: Springer, 1991.

Schrüfer 1992

Schrüfer, N.: Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung. Berlin: Springer, 1992. (iwb Forschungsberichte 48)

Schuller 1999

Schuller, R.: Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen. Berlin: Springer, 1999. (iwb Forschungsberichte 117)

Schumann & Schier 1980

Schumann, D.; Schier, H.: Maschinen der Glastechnik. 2. Auflage. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1980.

Schwermer 1992

Schwermer, K.-U.: Prozeßmodell zur Simulation des dynamischen Verhaltens beim Drehen. München: Carl Hanser, 1992. (Forschungsberichte für die Praxis 97)

Sedov 1993

Sedov, L. I.: Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1993.

Siemens 1974

Siemens AG (Hrsg.): Organisationsplanung – Planung durch Kooperation. Berlin: 1974

Simpfendörfer 1988

Simpfendörfer , D.: Entwicklung und Verifizierung eines Prozeßmodells beim Planläppen mit Zwangsführung. München: Carl Hanser, 1988. (Forschungsberichte für die Praxis 71)

Stetter 1994

Stetter, R.: Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobotereinsatzes. Berlin: Springer, 1994. (iwb Forschungsberichte 62)

Tauber 1990

Tauber, A.: Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung. Berlin: Springer, 1990. (iwb Forschungsberichte 30)

Tekkaya 1998

Tekkaya, E.: State-of-the-art of Simulation of Sheet Metal Forming. In: Sheet Metal 1998. Proceedings of the 6th Int. Conference. Twente: University of Twente, NL, 1998, S. 53-65.

Trier 1955

Trier, W.: Temperaturmessungen in Glasformen. In: Glastechnische Berichte 28 (1955) 9, S. 336-351.

Tweer u. a. 1971

Tweer, H.; Laberge, N.; Macedo, P. B.: Inadequacies of Viscosity Theories for a Vitreous $\text{KNO}_3\text{-Ca}(\text{NO}_3)_2$ Melt. In: Journal of the American Ceramic Society 54 (1971) 2, S. 121-123.

VDI 3633 1993

VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen: Grundlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.

VDI 3633 (Entwurf) 1996

VDI-Richtlinie 3633 (Entwurf): Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen: Begriffsdefinitionen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.

Warnecke u. a. 1993

Warnecke, H.-J.; Bullinger, H.-J.; Hichert, R.; Voegle, A.: Kostenrechnung für Ingenieure. 4. Auflage. München: Carl Hanser, 1993.

Weiss 1988

Weiss, U.: Numerische Simulation von Präzisionsschmiedeprozessen mit der Finite-Element-Methode. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988. (Fortschrittsberichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik 146)

Woenckhaus 1994

Woenckhaus, C.: Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutplanung. Berlin: Springer, 1994. (iwb Forschungsberichte 65)

Wrba 1990

Wrba, P.: Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik. Berlin: Springer, 1990. (iwb Forschungsberichte 25)

Zäh 1995

Zäh, M.: Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen. Berlin: Springer, 1995.

Zarzycki 1991

Zarzycki, J. (Hrsg. d. Bandes): Vol. 9. Glasses and Amorphous Materials. In: Cahn, Robert W. (Hrsg.): Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1991.

Zienkiewicz & Taylor 1989

Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.: The Finite Element Method. Volume 1. 4th edition. London, GB: Mc Graw-Hill Book Company, 1989.

Zlokarnik 1991

Zlokarnik, M.: Dimensional Analysis and Scale-up in Chemical Engineering. Berlin: Springer, 1991.

Zwanzer 1995

Zwanzer, N.: Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung. Berlin: Springer, 1995. (iwb Forschungsberichte 80)

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- | | | | |
|----|---|----|--|
| 1 | <i>Streifinger, E.</i>
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3 | 14 | <i>Groha, A.</i>
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8 |
| 2 | <i>Fuchsberger, A.</i>
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1 | 15 | <i>Riese, K.</i>
Klippsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6 |
| 3 | <i>Meier, C.</i>
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X | 16 | <i>Lutz, P.</i>
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3 |
| 4 | <i>Summer, H.</i>
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8 | 17 | <i>Klippel, C.</i>
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0 |
| 5 | <i>Simon, W.</i>
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9 | 18 | <i>Rascher, R.</i>
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9 |
| 6 | <i>Büchs, S.</i>
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7 | 19 | <i>Heusler, H.-J.</i>
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5 |
| 7 | <i>Hunzinger, I.</i>
Schneidereodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5 | 20 | <i>Kirchknopf, P.</i>
Ermittlung modularer Parameter aus Übertragungsfrequenzängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3 |
| 8 | <i>Pilland, U.</i>
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2 | 21 | <i>Sauerer, Ch.</i>
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51866-1 |
| 9 | <i>Barthelmöß, P.</i>
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2 | 22 | <i>Karstedt, K.</i>
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7 |
| 10 | <i>Reithofer, N.</i>
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6 | 23 | <i>Peiker, St.</i>
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0 |
| 11 | <i>Dies, H.</i>
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5 | 24 | <i>Schugmann, R.</i>
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0 |
| 12 | <i>Reinhart, G.</i>
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1 | 25 | <i>Wiba, P.</i>
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X |
| 13 | <i>Bürstner, H.</i>
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6 | 26 | <i>Eibelshäuser, P.</i>
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7 |
| 27 | <i>Prasch, J.</i>
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2 | | |

- 28 Teich, K.
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfrang, W.
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilarbeitsmatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 Tauber, A.
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 Jäger, A.
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 Hartberger, H.
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 Tuzek, H.
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschränkungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 Naber, H.
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupiec, Th.
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hößmann, J.
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 Petry, M.
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabaukastens für robotergeführte Klebeprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 Schönecker, W.
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 Bick, W.
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 Gebauer, L.
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 Schräfer, N.
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 Wisbacher, J.
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 Garnich, F.
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44412-2
- 52 Glas, W.
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H.J.
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bömm, H.
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendt, A.
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strahmayer, R.*
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringereinrichtungen
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Gles, J.*
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenzelhaus, Ch.*
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummesteiner, G.*
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Vietheer, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Weiling, A.*
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Reith, P.*
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
Strömungstechnische Optimierung von Produktionsystemen durch Simulation
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwaner, N.*
Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflussteuerungen
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
Flexibilisierung der automatischen Teilebereitstellung in Montageanlagen
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutschle, U.*
Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und varianteureiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszelten - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischetsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen varianteureichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wegner, M.*
Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krämer, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuler, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgelenkte Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integrierte Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionsysteme
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industrierakamik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationale Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauflag
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauten
128 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktionsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
108 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 122 Burghard Schneider
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Bernd Goldstein
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · 65 Abb. · 1999 · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Helmut E. Moßmer
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
156 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Ralf-Gunter Gräser
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Hans-Jürgen Trossin
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Doris Kugelmann
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
158 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Rolf Diesch
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · 69 Abb. · 1999 · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Werner E. Lulay
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
170 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Otto Murr
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Michael Macht
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Bruno H. Mehler
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbindungen
152 Seiten · 44 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Knut Heitmann
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Stefan Blessing
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Can Abay
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · 2000 · ISBN 3-89675-697-4