





Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
der Technischen Universität München

## Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen

**Markus Westermeier**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt  
(Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen)

Die Dissertation wurde am 29.10.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 18.04.2016 angenommen.



Markus Westermeier

**Qualitätsorientierte Analyse komplexer  
Prozessketten am Beispiel der Herstellung  
von Batteriezellen**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 322

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2016

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2016

ISBN 978-3-8316-4586-2

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## 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 sowie von 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 Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in 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.





## **Vorwort**

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

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am Werkzeugmaschinenlabor der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts bedanken, die mich während meiner Zeit am Institut begleitet und bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Besonders danke ich Jakob Kurfer und Dr. Tobias Zeilinger für die fachlichen Anregungen und die detaillierte Durchsicht meiner Arbeit. Ebenso gilt mein besonderer Dank den Kollegen aus dem Forschungsfeld Batterieproduktion: Thomas Knoche, Johannes Schmalz, Patrick Schmitz, Nicolas Billot, Till Günther, Jan Habedank, Joscha Schnell, Fabian Distel und Edgars Locmelis. Nur mit Hilfe der intensiven Diskussionen sowie der aktiven Unterstützung beim Aufbau der Labore und bei der Herstellung der Batteriezellen durch die genannten Kollegen wurde meine Arbeit ermöglicht. Außerdem danke ich Dr. Stefan Krug, Dr. Julian Backhaus, Zeyad Mari, Thorsten Klein und Jan-Fabian Meis für die stets humorvollen, fachfremden Diskussionen. Dank gebührt auch allen Studierenden, die mich im Rahmen ihrer Studienarbeiten bei der Ausarbeitung und Umsetzung meiner Methodik unterstützt haben.

Schließlich möchte ich mich ganz besonders bei meinen Freunden, meiner Familie und Christina Schöberl bedanken. Meine Eltern haben meinen Lebensweg immer großzügig unterstützt und standen mir jederzeit beratend zur Seite, ohne mich in meiner Entscheidungsfreiheit einzuschränken. Christina hat mir insbesondere in den sehr arbeitsintensiven Phasen den Rücken freigehalten und nicht zuletzt durch ihre aufmerksame Durchsicht wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
<b>2 Grundlagen und Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1 Allgemeines	5
2.2 Terminologische Eingrenzung des Untersuchungsgebietes	5
2.2.1 Qualität	5
2.2.2 Fertigungstechnische Prozessketten	7
2.2.3 Kausalität in fertigungstechnischen Prozessketten	9
2.2.4 Komplexität fertigungstechnischer Prozessketten	11
2.2.5 Darlegung des Untersuchungsgebietes	13
2.3 Grundlegende Methoden	15
2.3.1 Methoden des Qualitätsmanagements	15
2.3.2 Statistische Versuchsmethodik	16
2.3.3 Regressionsanalyse	17
2.4 Methoden zur Analyse fertigungstechnischer Prozessketten	19
2.4.1 Analyse technischer Systeme	19
2.4.2 Deduktiv-qualitative Modellierung und Analysen	21
2.4.3 Induktiv-labororientierte Analysen	27
2.4.4 Induktiv-feldorientierte Analysen	29
2.4.5 Fazit	31
2.5 Komplexitätsmanagement	34
2.5.1 Prinzipien zur Komplexitätsbeherrschung	34
2.5.2 Werkzeuge des Komplexitätsmanagements	35

2.5.3	Anwendung des Strukturellen Komplexitätsmanagements	40
2.5.4	Fazit	42
2.6	Zusammenfassung und Handlungsbedarf	43
<b>3</b>	<b>Konzeption der Methodik</b>	<b>45</b>
3.1	Allgemeines	45
3.2	Anforderungen an die Methodik	45
3.2.1	Allgemeine Anforderungen	45
3.2.2	Spezielle Anforderungen	46
3.3	Betrachtungsumfang	49
3.3.1	Relevante Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge	49
3.3.2	Unterstützung des Produktionsanlaufs	50
3.3.3	Interaktion mit den Planungsphasen von Produktionssystemen	51
3.4	Referenzmodell und Systemgrenze	52
3.5	Aufbau der Teilmodelle und der Ablaufstruktur	54
3.5.1	Beschreibungsmodell	54
3.5.2	Qualitatives Erklärungsmodell	59
3.5.3	Quantitatives Erklärungsmodell	63
3.5.4	Ablaufstruktur der Methodik	66
3.6	Zusammenfassung	68
<b>4</b>	<b>Detaillierung der Methodik</b>	<b>69</b>
4.1	Allgemeines	69
4.2	Methode zur Wissensakquisition	69
4.2.1	Grundlegende Prozesskettenbeschreibung	70
4.2.2	Aufbau eines rechnerbasierten Akquise-Werkzeugs	71
4.2.3	Durchführung der Expertenbefragung	73
4.3	Methode zur Wissensinterpretation	77
4.3.1	Ablauf der Interpretation und Reduktion	77
4.3.2	Aufbau des qualitativen Erklärungsmodells	78

4.3.3	Interpretation des qualitativen Erklärungsmodells	79
4.3.4	Fokussierung des qualitativen Erklärungsmodells	83
4.4	Methode zur empirischen Analyse	85
4.4.1	Phasengliederung der empirischen Analyse	85
4.4.2	Definition des Untersuchungsumfangs	87
4.4.3	Versuchsstrategie	95
4.4.4	Vorbereitung der empirischen Analyse	97
4.4.5	Versuchsdurchführung	100
4.4.6	Versuchsauswertung	101
4.4.7	Interpretation und Validierung	104
4.4.8	Verknüpfung mit den Erklärungsmodellen	105
4.5	Zusammenfassung	108
<b>5</b>	<b>Anwendung am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen</b>	<b>109</b>
5.1	Allgemeines	109
5.2	Ausgangssituation	109
5.2.1	Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Zellen	109
5.2.2	Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen	111
5.3	Akquisition von Expertenwissen	115
5.3.1	Prozesskettenbeschreibung	115
5.3.2	Durchführung und Ergebnisse der Expertenbefragung	120
5.4	Aufbau und Interpretation des qualitativen Erklärungsmodells	122
5.5	Empirische Prozesskettenanalyse	126
5.5.1	Vorbereitung der empirischen Analyse	126
5.5.2	Prozessbezogene empirische Analyse	130
5.5.3	Prozessübergreifende empirische Analyse	135
5.6	Beurteilung der Anforderungserfüllung	143
5.7	Monetäre Bewertung	146

<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
6.1	Zusammenfassung der Arbeit	151
6.2	Ausblick	152
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>155</b>
<b>8</b>	<b>Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten</b>	<b>169</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>171</b>
9.1	Empfehlungen zur Akquisition von Expertenwissen	171
9.2	Pareto-Analyse des qualitativen Erklärungsmodells	172
9.3	Versuchsaufwand der empirischen Analysen	173

## Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
A	Anode
AS	Aktivsumme
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAM	Computer-Aided Manufacturing (dt. rechnerunterstützte Fertigung)
CAPP	Computer-Aided Process Planning (dt. rechnerunterstützte Arbeitsplanung)
CAQ	Computer-Aided Quality Assurance (dt. rechnerunterstützte Qualitätssicherung)
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
EES	Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik der Technischen Universität München
EP	Eingangsprodukt
EPM	Eingangsproduktmerkmal
EUCAR	European Council for Automotive Research & Development
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FTA	Failure Tree Analysis (dt. Fehlerbaumanalyse)
HoQ	House of Quality
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München
K	Kathode
KNN	Künstliche Neuronale Netze
M	Mean (dt. Mittelwert)

MDM	Multiple-Domain Matrix
NCM	Non Conformity Matrix
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
PLS	Partial Least Square
PP	Prozessparameter
PS	Passivsumme
QFD	Quality Function Deployment
QM	Qualitätsmanagement, Qualitätsmerkmal
SADT	Structured Analysis and Design Technique
SD	Standard Deviation (dt. Standardabweichung)
SG	Störgröße
SVM	Statistische Versuchsmethodik (engl. Design of Experiments, DoE)
TEC	Lehrstuhl für Technische Elektrochemie der Technischen Universität München
TRIZ	Theory of Inventive Problem Solving (dt. Theorie des erfinderischen Problemlösens)
TUM	Technische Universität München
U	Ursache
USW	Ultraschallschweißen
UWK	Ursache-Wirkungs-Kette
UWZ	Ursache-Wirkungs-Zusammenhang
W	Wirkung
WOIS	Widerspruchorientierte Innovationsstrategie
ZPM	Zwischenproduktmerkmal



## Formelzeichen

Einige der aufgeführten Formelzeichen werden mit verschiedenen Bedeutungen verwendet. Die jeweilige Bedeutung ergibt sich entweder aus dem Kontext oder ist im Text erklärt. Vektorielle Größen und Matrizen sind im Text durch einen Unterstrich gekennzeichnet.

Formelzeichen	Bedeutung
$A$	Auftretenswahrscheinlichkeit
$Ak_i$	Aktivität des Prozesses $i$
$AS$	Aktivsumme
$AS_z$	Aktivsumme des Prozesskettenelements in der Zeile $z$
$AS_z^{QR}$	Qualitätsrelevanz des Prozesskettenelements in der Zeile $z$
$a$	Anzahl der Eingangsgrößen
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit
$B$	Bedeutung
$\bar{B}$	gemittelte Bedeutung
$B_f$	Menge der geforderten Beschaffenheit einer Einheit
$B_{max}$	Maximaler Bewertungswert der Bedeutung
$B_p$	Menge der geplanten Beschaffenheit einer Einheit
$B_r$	Menge der realisierten Beschaffenheit einer Einheit
$B_{x_i \rightarrow y}^{neu}$	transformierter, qualitativer Bedeutungswert
$B_{x_i \rightarrow y}^{neu,norm}$	transformierter, qualitativer und normierter Bedeutungswert
$b$	Anzahl der Ausgangsgrößen Koeffizient
$\underline{b}$	Vektor der Koeffizienten
$\hat{b}$	geschätzter Koeffizient

$\hat{\underline{b}}$	Vektor der geschätzten Koeffizienten
$\underline{D}$	DMM des Prozesses oder der Prozesskette
$\underline{d}$	Vektor der Einflussgrößen
$E$	Menge der Knotenpunkte eines Graphen
$e$	Ereignis Modellfehler
$\underline{e}$	Vektor der Eingangsproduktmerkmale
$f$	Funktion
$G$	Graph
$i$	Zählvariable
$j$	Zählvariable
$k$	Zählvariable
$L$	Summe der Fehlerquadrate
$M_{z,s}$	Matrixelement der Zeile $z$ und der Spalte $s$
$\underline{M}_A$	MDM der Auftretenswahrscheinlichkeiten
$\underline{M}_{s_A}$	MDM der Sicherheiten der Auftretenswahrscheinlichkeiten
$\underline{M}_B$	MDM der Bedeutungen
$\underline{M}_{s_B}$	MDM der Sicherheiten der Bedeutungen
$\underline{M}_B^{ind}$	MDM der indirekten Bedeutungen
$\underline{M}^{int}$	MDM der Wechselwirkungen
$m$	Anzahl der Faktoren $x_i$ in einem Regressionsmodell Anzahl der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge eines Pfades
$\underline{m}$	Vektor der Prozesskettenelemente
$N$	Menge der Kanten eines Graphen
$n$	Anzahl der Expertenmeinungen zu einem Ursache-Wirkungs-Zusammenhang

$n$	Anzahl der Modellkoeffizienten zu einem Faktor Anzahl der Prozesse einer Prozesskette Anzahl der Systemknoten Anzahl der Versuchsdatensätze
$o$	Ordnung der Wechselwirkung
$Q_A$	Ausführungsqualität
$Q_O$	Objektqualität
$Q_P$	Planungsqualität
$PS$	Passivsumme
$PS_s$	Passivsumme des Prozesskettenelements in der Spalte $s$
$p$	Anzahl der Modellkoeffizienten Anzahl der Prozesskettenelemente Merkmal der geplanten Beschaffenheit Signifikanzwert
$\underline{p}$	Vektor der geplanten Merkmale
$R$	Risiko
$R_{z,s}$	Risiko des Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs in der Zeile $z$ und der Spalte $s$
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$R^2_{kor}$	korrigiertes Bestimmtheitsmaß
$r$	Anzahl der Qualitätsmerkmale Merkmal der realisierten Beschaffenheit Residuum
$\underline{r}$	Vektor der realisierten Merkmale
$S_A$	Sicherheit der Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit
$S_B$	Sicherheit der Bewertung der Bedeutung
$S^{neu}_{B,x_i}$	transformierte Sicherheit der Bewertung der Bedeutung des Faktors $x_i$

$S_{Grenz}$	Sicherheits-Grenzwert
$s$	Spaltennummer
$\underline{s}$	Vektor der Störgrößen
$t$	Zeit
$U$	Ursache
$W$	Wirkung
$X$	Platzhalter
$\underline{X}$	Modellmatrix
$x$	unabhängige Variable Faktor
$\underline{x}$	Vektor der Stellgrößen
$y$	abhängige Variable Zielgröße
$\underline{y}$	Vektor der Zwischenproduktmerkmale
$\hat{\underline{y}}$	Vektor der geschätzten Zielgrößen
$z$	Zeilennummer
$\underline{z}$	Vektor der Zustandsgrößen

# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangssituation

Fertigungstechnische Prozessketten sind Abfolgen mehrerer Produktionsprozesse innerhalb eines Unternehmens oder über mehrere Unternehmen hinweg und stellen einen inhärenten Bestandteil der produzierenden Industrie dar. Das Management fertigungstechnischer Prozessketten hat einen maßgeblichen Einfluss auf die *Kosten* und die *Qualität* der hergestellten Produkte und umfasst die Dimensionen *Gestaltung*, *Führung* und *Optimierung* (EICHGRÜN 2003). Voraussetzung für die Führung und Optimierung ist die Kenntnis der *qualitätsrelevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge*, welche durch eine *Prozesskettenanalyse* geschaffen werden kann. Die Analyse von fertigungstechnischen Prozessketten unterliegt einem Spannungsdreieck: Immer kürzere Produktlebenszyklen (ABELE & REINHART 2011, CHUNG & WEE 2011 und GAN ET AL. 2015) und die zunehmende Individualisierung von Produkten (LANZA & PETERS 2012, HU 2013 und MARQUES ET AL. 2013) führen zu häufigeren Neu- und Umgestaltungen der fertigungstechnischen Prozessketten. Dabei werden aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten die Zeiträume der einzelnen Anlaufphasen kürzer. Darüber hinaus machen steigende Qualitätsanforderungen an komplexe Produkte, wie Halbleiterkomponenten und Batteriezellen, technologisch tiefe und umfängliche Prozesskettenanalysen notwendig (GROBMANN ET AL. 2013). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Prozesskettenanalysen in ihrer Häufigkeit, ihrem Untersuchungsumfang und ihrer Zeitkritikalität zunehmen und an Bedeutung gewinnen.

In der industriellen Praxis basiert die Gestaltung und Führung von fertigungstechnischen Prozessketten meist auf einem erfahrungsbasierten Vorgehen. Dabei wird bestehendes Wissen zu Produktionsprozessen auf neue Produkte übertragen. Diese Vorgehensweise ist auf innovative Produkte, zu denen kein Erfahrungswissen hinsichtlich der Produktionsprozesse und der Werkstoffe vorliegt, nicht anwendbar (GROBMANN & WIEMER 2010). Bestehende Qualitätsmanagementansätze geraten in Anbetracht der geschilderten Herausforderungen an ihre Grenzen (COLLEDANI ET AL. 2014). Beispielsweise setzt die statistische Prozessregelung (engl. Statistical Process Control, SPC) als Maßnahme zur Prozesskettenführung vorhandene Qualitätsdaten und definierte Toleranzgrenzen voraus, welche für neue Prozessketten oft nicht vorliegen. Klassische Werkzeuge zur Prozessanalyse, wie die statistische Versuchsmethodik (SVM, engl. Design of Experiments, DoE), bieten zur Planung der Analyse

ganzer Prozessketten keine spezifische Unterstützung (SCHÄFER 2003). In komplexen, fertigungstechnischen Prozessketten ist die Analyse von einzelnen Prozessen nicht ausreichend, um die Ursachen von Qualitätsschwankungen des Fertigproduktes zu identifizieren. Hierzu ist ein Verständnis über die prozessübergreifenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge unerlässlich. Die Bedeutung der dafür erforderlichen ganzheitlichen Prozesskettenanalyse zeigen SCHÄFER (2003) und BETTIN (2004). Diese Analyse wird aber durch die spezifischen Eigenschaften komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten erschwert. Zum einen geht die Betrachtung von mehreren Prozessen mit einer Vielzahl von zu analysierenden Systemelementen und Zusammenhängen einher. Zum anderen umfassen komplexe, fertigungstechnische Prozessketten unterschiedliche Prozessarten. In einer ganzheitlichen Betrachtung der Prozesskette sind verfahrenstechnische Prozesse, fertigungstechnische Prozesse und Montageprozesse zu berücksichtigen, welche in ihrem Systemverhalten und der daraus resultierenden Beschreibung und Analyse divergieren (POLKE 1990 und EICHGRÜN 2003). Zwischen- und Fertigprodukteigenschaften, deren Istzustände nicht unmittelbar bestimmt werden können, stellen einen weiteren Komplexitätstreiber bei der Analyse und späteren Führung der Prozesskette dar.

Die Herstellung von Batteriezellen ist ein Beispiel für eine komplexe, fertigungstechnische Prozesskette, welche zudem Optimierungspotentiale birgt (NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT 2014). Als konkreter Anwendungsfall wird daher die in Kapitel 5 beschriebene Forschungsproduktionslinie für Lithium-Ionen-Zellen am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) herangezogen. Charakteristisch für die Batteriezellenproduktion ist die mit hohem Aufwand verbundene Qualitätsbestimmung der Fertigprodukte. Ein Großteil der Qualitätsmerkmale lässt sich nur mit sehr zeit- und kostenintensiven Prüfabläufen bestimmen. In der industriellen Produktion hochqualitativer Batteriezellen ist eine mehrtägige bis mehrwöchige Lagerung der fertigmontierten Zellen mit einer anschließenden Qualitätsprüfung üblich, um zuverlässige Qualitätsaussagen über die Produkte zu erhalten (PETTINGER 2013). Der Aufwand für die Lagerhaltung und die Kapitalbindung ist angesichts der üblichen Produktionsvolumina enorm. Die am *iwb* vorhandene Prozesskette ist für die Herstellung von Batteriezellen für Elektrofahrzeuge und stationäre Energiespeicher ausgelegt. Im Allgemeinen stellen Zellen für diese Zielmärkte anwendungsspezifische Neuentwicklungen dar (LAMP 2013), welche zwar auf den Erfahrungen des Einsatzes der Lithium-Ionen-Technik in etablierten Anwendungen basieren, aber hinsichtlich äußerer Bauform, innerem Zellaufbau, Montagereihenfolge und Montageprozesse grundsätzliche Unterschiede aufweisen. Im Zusammenhang mit der Produktion die-

ser Zellen liegen wenige bis keine Erfahrungen vor – weder mit dem Betrieb der Einzelprozesse noch dem Betrieb der Prozesskette als Ganzes (HEIMES 2014). Darüber hinaus existieren für Batteriezellen, welche in Elektrofahrzeugen und in stationären Energiespeichern eingesetzt werden, deutlich höhere Qualitätsanforderungen als für die etablierten Batteriezellen. Eine Lebensdauer der Batteriezellen von drei bis fünf Jahren ist ausreichend für die meisten Anwendungen in tragbaren elektronischen Geräten, während im Falle der Elektrofahrzeuge bis zu zehn Jahre und für stationäre Batteriesysteme bis zu 20 Jahre gefordert werden (LAMP 2013).

Die dargestellten Eigenschaften komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten bedingen im Allgemeinen (EICHGRÜN 2003, SCHÄFER 2003, HIELSCHER 2008 und BASSE ET AL. 2014) sowie am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen (PETTINGER 2013, RUPRECHT & KAISER 2013 und MAISER ET AL. 2014) folgende Herausforderungen bei deren Analyse und Führung:

- erhebliche Unsicherheiten bzgl. der Qualitätsziele von Einzelprozessen, der Planung und Auslegung der Prozesskette sowie der Notwendigkeit und der Auswahl von Qualitätssicherungsinstrumenten
- zeit- und kostenintensive Produktionsanläufe
- hohe Ausschussraten im Betrieb der Prozesskette und damit Unsicherheiten beim Kunden mit einhergehenden aufwendigen Wareneingangsprüfungen
- hohe Stückkosten

## **1.2 Zielsetzung**

Abgeleitet aus der dargestellten Ausgangssituation sind die Ziele dieser Arbeit die Verkürzung des Produktionsanlaufs, die Steigerung der Qualität und die Reduktion der Herstellkosten von Produkten komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten. Hierzu soll eine industriell anwendbare Methodik entwickelt werden, welche Mitarbeiter der technischen Planung und des betrieblichen Qualitätsmanagements zu einer aufwandsarmen, qualitätsorientierten Analyse bestehender oder sich in der Planung befindender Prozessketten befähigt. Die Methodik soll geeignet sein, den Planungs- und Auslegungsprozess einer Prozesskette zu unterstützen, zu deren Betrieb keine Erfahrungen im Unternehmen vorliegen. Dabei soll die Methodik in allen Phasen des Produktionsanlaufs einer Prozesskette – von der Konzeptplanung und der Auswahl von Einzelprozessen, über die Detailplanung und die Inbetriebnahme der Anlagen bis zum Produktivbetrieb – eine Hilfestellung zur Erreichung der Qualitätsziele bieten.

Im Rahmen der Entwicklung der Methodik zur qualitätsorientierten Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten sind folgende Forschungsfragen zu beantworten:

- Forschungsfrage 1: Wie kann bestehendes Wissen zu Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen mit geringem Aufwand gesammelt und strukturiert werden?
- Forschungsfrage 2: Wie können die qualitätsrelevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Prozesskette identifiziert werden?
- Forschungsfrage 3: Wie können die qualitätsrelevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge quantifiziert werden?

Die Anwendung der Methodik soll im Unternehmen qualitatives sowie quantitatives Wissen zu den qualitätsrelevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen in der Prozesskette schaffen und dadurch einen Beitrag zum Erreichen der Ziele leisten. Dieses Wissen ist die Grundlage für Maßnahmen zur Führung und Optimierung von Prozessketten.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Im folgenden Kapitel werden die grundlegenden Begriffe *Qualität*, *fertigungstechnische Prozesskette*, *Kausalität* und *Komplexität* reflektiert und entsprechend dem Kontext der zu konzipierenden Methodik definiert. Für das Verständnis der weiteren Ausführungen werden die relevanten Methoden des Qualitätsmanagements mit Schwerpunkt auf der SVM und der Regressionsanalyse erklärt. Darüber hinaus wird durch eine ausführliche Darstellung des Stands der Forschung in den Bereichen *Analyse fertigungstechnischer Prozessketten* und *Komplexitätsmanagement* der Handlungsbedarf identifiziert. In den ersten Abschnitten von Kapitel 3 werden auf dieser Basis die Anforderungen an die zu erarbeitende Methodik bestimmt sowie der Betrachtungsumfang und die Anwendungsgebiete spezifiziert. Anschließend erfolgt die Konzeption der Methodik mit Hilfe eines qualitätsorientierten Referenzmodells fertigungstechnischer Prozessketten. Kapitel 4 detailliert die Teilmethoden, welche die formulierten Forschungsfragen adressieren. In Kapitel 5 wird die Methodik auf die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen angewandt. Die Anwendung findet sowohl an einer qualitätsorientierten Analyse eines einzelnen Prozesses als auch im Rahmen einer prozessübergreifenden Analyseaufgabe statt. In den Abschnitten 5.6 und 5.7 wird die Methodik anhand der gestellten Anforderungen und einer Kosten-Nutzen-Analyse beurteilt. Abschließend erfolgt in Kapitel 6 eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen.



## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

### 2.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zur Erarbeitung der Methodik erläutert. Im Zuge der ausführlichen Begriffsdefinitionen im zweiten Abschnitt erfolgt die Eingrenzung des Untersuchungsgebietes. Im dritten Abschnitt werden für die weitere Arbeit grundlegende Methoden dargestellt. Im Anschluss daran wird der Stand der Forschung zur Analyse fertigungstechnischer Prozessketten sowie zu den Methoden des Komplexitätsmanagements dargelegt und jeweils ein Fazit gezogen. Auf dieser Basis wird im letzten Abschnitt des Kapitels der Bedarf für eine Methodik zur qualitätsorientierten Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten abgeleitet. Unter einer *Methodik* wird in dieser Arbeit die Zusammenfassung mehrerer Methoden verstanden.

### 2.2 Terminologische Eingrenzung des Untersuchungsgebietes

#### 2.2.1 Qualität

Das Wort *Qualität* stammt vom lateinischen Substantiv *qualitas* ab, welches sich aus dem Adjektiv *qualis* („wie beschaffen?“) entwickelt hat (DIN 55350-11). Im heutigen Sprachgebrauch wird Qualität als Homonym verwendet (JURAN 1993), bspw. für Vortrefflichkeit, für Wertigkeit oder für *Qualitätsmanagement* (DIN 55350-11). Im Sinne des Qualitätsmanagements ist der Fachbegriff Qualität international vereinheitlicht und zuletzt in der DIN EN ISO 9000 als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“ definiert. Bei *Anforderungen* handelt es sich um Erfordernisse oder Erwartungen, welche festgelegt, vorausgesetzt oder verpflichtend sind (DIN EN ISO 9000). Die *Merkmale*, auch als *Qualitätsmerkmale* bezeichnet, sind eine Einheit kennzeichnende, inhärente Eigenschaften, welche sich auf Anforderungen beziehen (DIN EN ISO 9000). Unter einer *Einheit* wird ein Prozess, ein Produkt, eine Organisation, eine Person oder ein System verstanden (DIN EN ISO 9000), welche einzeln beschreibbar sowie materieller oder immaterieller Natur ist. Im Rahmen dieser Qualitätsbetrachtung kann der Begriff Einheit auf materielle Produkte eingeschränkt werden, welche Ergebnisse von Prozessen sind.

Die Gesamtheit der inhärenten Merkmale einer Einheit und die zu diesen Merkmalen gehörenden Merkmalswerte werden als *Beschaffenheit* bezeichnet (DIN EN ISO

9000). Damit lässt sich Qualität entsprechend der DIN EN ISO 9000 auch als Erfüllungsgrad der *realisierten Beschaffenheit*, gemessen an der *geforderten Beschaffenheit*, definieren. Die Qualität kann dabei als Relation zwischen realisierter und geforderter Beschaffenheit sowohl bzgl. eines einzelnen Qualitätsmerkmals als auch bzgl. mehrerer oder aller Qualitätsmerkmale von Interesse sein (DIN EN ISO 9000).

Eine mit Hilfe der Mengentheorie veranschaulichte Qualitätsdefinition bietet WENGLER (1996). Neben der geforderten Beschaffenheit  $B_f$  und der realisierten Beschaffenheit  $B_r$  führt WENGLER (1996) die Menge der *geplanten Beschaffenheit*  $B_p$  ein, welche zur Konkretisierung der in der Praxis häufig unpräzise formulierten Zielvorgaben dient. Aus den paarweisen Schnittmengen dieser drei Merkmalsmengen resultieren drei Qualitätsbegriffe (WENGLER 1996). Die *Planungsqualität*  $Q_p$  ist die Schnittmenge aus geplanter und geforderter Beschaffenheit  $B_p \cap B_f$ . Das Vergleichsergebnis zwischen geplanter und realisierter Beschaffenheit  $B_p \cap B_r$  wird als *Ausführungsqualität*  $Q_A$  bezeichnet. Eine hohe Konformität zwischen realisierter und geforderter Beschaffenheit  $B_r \cap B_f$  bedeutet eine hohe *Objektqualität*  $Q_O$ . Die mengentheoretische Betrachtung der Qualitätsbegriffe ist in Abbildung 1 dargestellt. Nach WENGLER (1996) ist es Aufgabe der betrieblichen *Qualitätsplanung* eine möglichst hohe Planungsqualität zu erreichen. Die Überwachung der Ausführungsqualität ist eine Subfunktion der *Qualitätsprüfung* eines Unternehmens. Demgegenüber erfolgt die Beurteilung der Objektqualität ausschließlich durch den Abnehmer des Produktes.

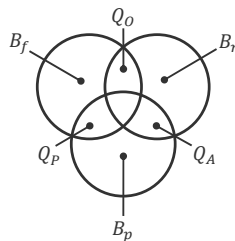


Abbildung 1: Mengentheoretische Darstellung der Qualitätsdefinition in Anlehnung an WENGLER (1996)

In dieser Arbeit steht die Analyse der Zusammenhänge, welche die realisierte Beschaffenheit  $B_r$  eines Produktes beeinflussen, im Vordergrund. Somit sind die realisierten Merkmale  $r_1, r_2, r_3, \dots$  eines Produktes, im Weiteren vereinfachend als *Qualitätsmerkmale* bezeichnet, deren Einflussgrößen und deren Beziehungen zueinander das Untersuchungsobjekt der zu planenden Analyse. Dabei sei explizit erwähnt, dass Qualitätsmerkmale aus verschiedenen Merkmalsgruppen stammen

können. So können abstraktere Merkmale, wie bspw. Sicherheit, Zuverlässigkeit und Umweltverträglichkeit, ebenso qualitätsbestimmend sein wie leichter quantifizierbare Merkmale, bspw. Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit. Wird in dieser Arbeit von *qualitätsrelevanten Zusammenhängen* gesprochen, werden darunter Kausalzusammenhänge mit Qualitätsmerkmalen verstanden. Ein Abgleich der Merkmalswerte der realisierten Merkmale  $r_1, r_2, r_3, \dots$  und der geplanten Merkmale  $p_1, p_2, p_3, \dots$  erlaubt eine Aussage zur Ausführungsqualität eines Produktes. Ist im weiteren Verlauf vereinfachend von *Qualität* die Rede, wird darunter die Ausführungsqualität verstanden. Darüber hinaus lässt ein solcher Abgleich auf Merkmalebene Schlussfolgerungen zu, welche durch Anpassung der Merkmalswerte zu einer verbesserten Ausführungsqualität führen. Die Entwicklung eines Vorgehens zur Schaffung des notwendigen Wissens, diese Schlussfolgerungen in komplexen, fertigungstechnischen Prozessketten zu ziehen, entspricht der Zielsetzung dieser Arbeit und ist grundsätzliche Voraussetzung zur Erhöhung der Ausführungsqualität von Produkten.

### 2.2.2 Fertigungstechnische Prozessketten

Der Begriff *Prozesskette* wird in der Produktionstechnik in fünf Bereichen verwendet (SCHÄFER 2003): zur Beschreibung der einzelnen Phasen im Produktlebenszyklus; in der Logistik im Sinne der Verkettung von Handhabungs-, Transport- und Lagerungsprozessen; im Produktgestaltungsprozess im Zusammenhang mit Toleranzketten; in der durchgängigen Daten- und Informationsverarbeitung sowie in der Fertigungstechnik als schrittweise Abfolge von Fertigungsprozessen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff ausschließlich im Kontext der Herstellung von Produkten angewandt, sodass von *fertigungstechnischen Prozessketten* zu sprechen ist. Von EICHGRÜN (2003) wird der Begriff *fertigungstechnische Prozesskette* „als materialflussgekoppelte Abfolge betriebsmittelspezifischer Haupt- und Nebenprozesse einer schrittweisen Zustandsänderung eines gemeinsamen Systemelements von einem Anfangszustand zu einem definierten Endzustand“ spezifiziert. Das gemeinsame Systemelement hierbei ist „das Werkstück – als Element eines Produktsystems – in seinen jeweiligen material-, energie- und/oder informationsbezogenen Anfangs-, Zwischen- oder Endzuständen“. Folgende Merkmale fertigungstechnischer Prozessketten, welche im Weiteren vereinfachend auch als *Prozessketten* bezeichnet werden, sind im Kontext dieser Arbeit hervorzuheben:

- Produkte der Prozessketten sind stets durch mehrere Qualitätsmerkmale gekennzeichnet (SCHÄFER 2003 und HIELSCHER 2008).

- Das Produkt erfährt bei seiner Erzeugung in der Prozesskette mehrere Zustandsänderungen. Die zwischen zwei Hauptprozessen vorliegenden Zwischenzustände (DIN 8580) werden häufig auch als *Zwischenprodukte* bezeichnet (WENGLER 1996). Der Zustand jedes Zwischenproduktes wird durch einen Satz von *Zwischenproduktmerkmalen* beschrieben, in Abgrenzung zu den Qualitätsmerkmalen des Fertigproduktes.
- Zwischenprodukte sind somit Ausgangsprodukte eines vorgelagerten Prozesses und stets auch Eingangsprodukte nachfolgender Prozesse (ZAPP 1998). Dementsprechend stellen die Zwischenproduktmerkmale die *Ausgangsgrößen* eines Prozesses und eine Teilmenge der *Eingangsgrößen* des Folgeprozesses dar (BETTIN 2004).
- Die Hauptprozesse einer Prozesskette können fertigungstechnische, verfahrenstechnische und montagetechnische Prozesse sein. Definitionen und Beispiele zu den drei Prozesstypen finden sich in EICHGRÜN (2003) und BETTIN (2004).
- Durch produktionstechnische Flüsse, welche Material, Energie und Informationen umfassen können, werden einzelne Prozesse zu Prozessketten verknüpft. Zwischen zwei aufeinander folgenden Prozessen können *Schnittstellen* festgelegt werden, welche unter definierten Übergangsbeziehungen zum prozessübergreifenden Austausch von Material, Energie und Informationen dienen (EICHGRÜN 2003).
- Prozessketten sind soziotechnische Systeme, die durch gemeinsame Arbeitsaktivitäten und Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine geprägt sind (EICHGRÜN 2003).
- Prozessketten sind aus systemtheoretischer Perspektive im Allgemeinen instationär, nichtlinear, stochastisch und vernetzt (EICHGRÜN 2003, SCHÄFER 2003 und HIELSCHER 2008).

Zur Beschreibung der einzelnen Prozesse sind weitere Begriffe zu definieren. Die Menge der *Einflussgrößen* eines Prozesses umfasst nach EICHGRÜN (2003) die *Eingangsgrößen* und die *Zustandsgrößen* des Prozesses zu Prozessbeginn. Die Eingangsgrößen wirken auf einen Prozess ohne von diesem beeinflusst zu werden (DIN IEC 60050-351) und können in *Stellgrößen*, welche in *Maschinen- und Prozessparameter* unterteilbar sind (BETTIN 2004), *Störgrößen* und die in den Prozess eingehenden *Zwischenproduktmerkmale* unterschieden werden. Stellgrößen sind in bestimmten Grenzen beeinflussbare, zeitvariable Einstellparameter eines Prozesses. Störgrößen hingegen sind aufgrund technischer oder wirtschaftlicher Restriktionen nicht gezielt beeinflussbar. Die Zustandsgrößen eines Prozesses sind zeitvariabel und beschreiben in Verbindung mit den Eingangsgrößen das Prozessverhalten zu jedem Zeitpunkt

(EICHGRÜN 2003). Eine systemische Darstellung einer fertigungstechnischen Prozesskette mit  $n$  Prozessen und prozessbezogenen, von der Zeit  $t$  abhängigen Einflussgrößen ist in Abbildung 2 gegeben.

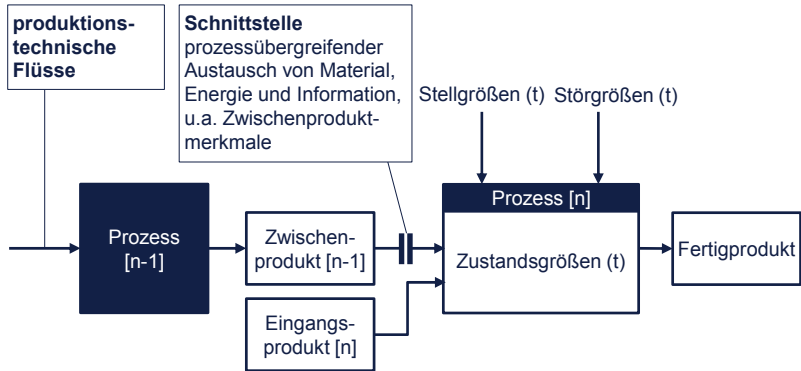


Abbildung 2: Struktur fertigungstechnischer Prozessketten

### 2.2.3 Kausalität in fertigungstechnischen Prozessketten

Unter *Kausalität* wird im Allgemeinen der Zusammenhang zwischen *Ursache* und *Wirkung* verstanden (BARTELS & STÖCKLER 2007 und EICHGRÜN 2003). Eine wissenschaftstheoretische Kausalitätsdefinition entsprechend der *Humeschen Regularitätstheorie der Kausalität* gibt drei notwendige und hinreichende Kriterien für eine Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen zwei Ereignissen  $e_1$  und  $e_2$  an (BARTELS & STÖCKLER 2007):

1.  $e_1$  liegt zeitlich unmittelbar vor  $e_2$ .
2.  $e_1$  liegt räumlich unmittelbar neben  $e_2$ .
3. Immer wenn ein Ereignis vom Typ  $e_1$  eintritt, gibt es ein Ereignis vom Typ  $e_2$ , das räumlich unmittelbar mit dem ersten Ereignis benachbart ist und zeitlich unmittelbar darauf folgt.

Unumstritten ist in der Wissenschaftstheorie die Notwendigkeit eines naturgesetzlichen Zusammenhangs zwischen den beiden Ereignissen, um von einer kausalen Erklärung sprechen zu können (BARTELS & STÖCKLER 2007). An dieser Stelle seien zwei Schwachstellen der genannten Kausalitätsdefinition erwähnt (BARTELS & STÖCKLER 2007):

1. *Präemption*: Es existiert ein weiteres, hinreichendes Ereignis  $e_3$ , welches  $e_2$  verursacht hätte, wenn  $e_1$  nicht eingetreten wäre. In diesem Fall ist die Zuordnung der Ursache zur eingetretenen Wirkung nicht eindeutig.
2. *Epiphänomen*: Es existiert ein weiteres Ereignis  $e_3$ , das von  $e_1$  verursacht wird, zeitlich vor  $e_2$  liegt und eine Begleiterscheinung ist, welche selbst nichts bewirkt. In diesem Fall liegt der Schluss einer Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen  $e_2$  und  $e_3$  nahe, obwohl keine Kausalbeziehung zwischen den beiden Ereignissen besteht.

Fehlt der naturgesetzliche Zusammenhang, so wird von *Pseudokausalität* gesprochen (BARTELS & STÖCKLER 2007), bspw. im Falle *bloßer Korrelationen* wie es beim oben genannten Epiphänomen zwischen den Ereignissen  $e_2$  und  $e_3$  der Fall ist. Nicht kausale Korrelationen können nach BARTELS & STÖCKLER (2007) zwar für Voraussagen und Begründungen, aber nicht für wissenschaftliche Erklärungen verwendet werden.

In der Systemtheorie gilt ein System als kausal, wenn dessen Ausgänge nur von aktuellen oder vergangenen Eingangswerten abhängen (UNBEHAUEN 2007). Nach SCHÄFER (2003) treten Wirkungen in fertigungstechnischen Prozessketten aufgrund der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Prozesse auch räumlich und zeitlich getrennt von den Ursachen auf. Eine für technische Prozesse näher liegende Kausalitätsdefinition liefert EICHGRÜN (2003), wobei ein Prozess als kausal bezeichnet wird, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind:

1. Ein beliebiger Prozesszustand oder eine Ausgangsgröße ist nur von zeitlich zurückliegenden Zuständen oder Eingangsgrößen abhängig.
2. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Prozesszustand oder eine Ausgangsgröße eintritt, unter der Bedingung des Eintretens eines bestimmten vorhergehenden Zustandes, ist höher als die entsprechende unbedingte Wahrscheinlichkeit.

Im Zusammenhang mit technischen Prozessen können Ursachen als Eingangsgrößen und Anfangszustände eines Prozesses und Wirkungen als Ausgangsgrößen desselben Prozesses aufgefasst werden (EICHGRÜN 2003). Ausgangsgrößen eines fertigungstechnischen Prozesses sind Teil der Eingangsgrößen und mögliche Ursachen des folgenden Prozesses. Somit ergibt sich eine Kausalkette. Eine fertigungstechnische Prozesskette ist dementsprechend unter Erfüllung der angeführten Kausalitätsdefinitionen als Aneinanderreihung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen interpretierbar. Die Qualitätsmerkmale des Fertigproduktes stellen dabei eine Teilmenge der Wirkungen der gesamten Prozesskette dar, welche über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge von den Einflussgrößen der einzelnen Prozesse verursacht werden. Zwischenproduktmerkmale sind bei dieser Prozessketten-Sichtweise Koppelgrößen

zwischen den einzelnen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen, da diese sowohl Wirkungen eines Prozesses als auch Teil der Ursachen folgender Prozesse sind.

### 2.2.4 Komplexität fertigungstechnischer Prozessketten

„Wechselwirken viele Systembestandteile miteinander, so kann die Dynamik des Gesamtsystems ein faktisch unvorhersehbares, häufig auch überraschendes Verhalten zeigen, welches durch die Kenntnis der Einzelteile nicht nahe gelegt wird. Ist dies der Fall, so spricht man von komplexen Systemen“ (BARTELS & STÖCKLER 2007). Darüber hinaus sieht BARTELS & STÖCKLER (2007) aus einer wissenschaftstheoretischen Perspektive eine große Anzahl von Systembestandteilen als ein Kriterium für Komplexität an.

REIB (1993A) unterscheidet aus einer systemtheoretisch-betriebswirtschaftlichen Perspektive vier Komplexitätsfaktoren: *Vielzahl*, *Vielfalt*, *Vieldeutigkeit* und *Veränderlichkeit*. Die ersten beiden Faktoren decken die Dimensionen der Komplexität als Massenphänomen ab. Die beiden letztgenannten Faktoren zielen auf Phänomene der aktiven Variation und der reaktiven Adaptivität entsprechend wechselnder Randbedingungen eines Systems ab (REIB 1993A). Vieldeutigkeit kann sowohl bei den Systemelementen als auch den Relationen untereinander bestehen. Vieldeutigkeit von Elementen beschreibt die Unsicherheit u. a. über die Existenz oder Zugehörigkeit von Elementen aufgrund von Wissensdefiziten, welche bspw. durch einen intransparenten Systemcharakter verursacht werden können. Vieldeutige Relationen zeichnen sich durch Unschärfe aus (REIB 1993A), die zu mehrfachen Ursache-Wirkungs-Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen Systemelementen führt. Veränderlichkeit beschreibt das Zeitverhalten von vieldeutigen Systemen (REIB 1993A).

Laut REFA (1990) sind komplexe Produktionssysteme „Arten von Produktionseinrichtungen, bei denen mehrere sich ergänzende Einzelfunktionen, sowohl bei der Bearbeitung und Montage als auch im Material- und Informationsfluss, weitgehend selbstständig ablaufen“. Die Umsetzung dieser Einzelfunktionen kann dabei in einstufigen, mehrstufigen und kombinierten Produktionssystemen erfolgen. Des Weiteren wird in REFA (1990) auf die besondere Komplexität von Montageprozessen eingegangen. Während sich in der Fertigung die Qualitätsprüfung im Wesentlichen auf die Beurteilung von geometrischen Toleranzen an Einzelteilen beschränkt, sind in der Montage Qualitätsmerkmale zu berücksichtigen, welche erst durch den Zusammenbau von Einzelteilen entstehen. Hierbei handelt es sich bspw. um Funktions- und Vollständigkeitsmerkmale. Dabei ist die Montage häufig das „Sammelbecken für Fehler aus vorgeschalteten Arbeitsbereichen“ (MÜLLER 2006).

ELMARAGHY ET AL. (2012) unterscheiden in Abhängigkeit vom Grad der Unsicherheit *komplizierte, komplexe* und *chaotische Systeme*. Das *Automobil* wird als Beispiel für ein kompliziertes Produkt angeführt, da es als technisches System im Wesentlichen bekannt ist. Demgegenüber wird der Entwicklungsprozess eines Automobils als komplex angesehen, da dieser von Unsicherheiten geprägt ist und dessen Ergebnis nicht in Gänze vorhersehbar oder steuerbar ist. In der Produktionstechnik werden nach ELMARAGHY ET AL. (2012) Produktkomplexität, Prozesskomplexität und Betriebskomplexität unterschieden. Komplexitätstreiber sind die Systemgröße, die Verknüpfungen von Systemelementen, die Vielfalt von Systemelementen und ein multidisziplinärer Systemcharakter. Darüber hinaus kann Komplexität auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen auftreten: Auf der Bauteil-, der Produkt- und der Systemebene sowie bei übergeordneten Systemen, welche aus mehreren Subsystemen bestehen, wie bspw. soziotechnischen Systemen (ELMARAGHY ET AL. 2012). Im Bereich der Produktionssysteme und -prozesse erfolgt eine Kategorisierung in *Komplexität durch die Bearbeitung komplexer Teile, Komplexität in der Montage* und *kombinatorische Komplexität aufgrund von Produktvarianten*. Die Komplexität von Fertigungsprozessen wird von ELMARAGHY ET AL. (2012) auf die Einhaltung geometrischer Toleranzen und die Oberflächenbeschaffenheit von Bauteilen mit komplexer Form reduziert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird Komplexität im Zusammenhang mit dem soziotechnischen System *fertigungstechnische Prozesskette* betrachtet. Dementsprechend finden die Untersuchungen auf der Ebene „System von Systemen“ statt (ELMARAGHY ET AL. 2012). Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich mit Hilfe der Komplexitätsfaktoren nach REIB (1993A) ein Großteil der in der Literatur genannten Komplexitätsmerkmale einordnen lässt. Die folgenden Konkretisierungen dieser vier Faktoren bilden die Grundlage des Komplexitätsverständnisses fertigungstechnischer Prozessketten:

- *Vielzahl*: Es liegt eine große Anzahl von Systemelementen sowohl bzgl. der Anzahl der Einzelprozesse einer fertigungstechnischen Prozesskette als auch der Anzahl der Eingangs- und Ausgangsgrößen dieser Prozesse vor.
- *Vielfalt*: Die Prozesskette umfasst unterschiedliche, multidisziplinäre Prozessarten, insbesondere der Verfahrens-, Fertigungs- und Montagetechnik. Die im System enthaltenen Produktmerkmale können nach EICHGRÜN (2003) bspw. Geometriemerkmale, Oberflächenmerkmale und Werkstoffeigenschaften umfassen, welche u. a. physikalischer, chemischer, elektrochemischer, technologischer, mechanischer, magnetischer und optischer Natur sein können.



- *Vieldeutigkeit*: Die Systemelemente sind durch Ursache-Wirkungs-Beziehungen verknüpft, deren Analyse durch Präemption und Epiphänomene erschwert wird. Unmittelbare Wirkungen treten auch in nicht benachbarten Systemelementen auf, bspw. in späteren Prozessen als dem unmittelbaren Folgeprozess. Darüber hinaus ist die Prozesskette durch verkettete Ursache-Wirkungs-Beziehungen, die sich durch *indirekte* bzw. *mittelbare Wirkungen* äußern, gekennzeichnet. Des Weiteren treten Mehrfach-Ursachen, mit und ohne Wechselwirkungen, sowie Mehrfach-Wirkungen auf, bspw. durch Funktionsintegration auf Produkt- oder Anlagenseite. Eine graphische Darstellung der Ausprägungsformen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen zeigt Abbildung 3. Außerdem sind die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den Systemelementen nicht in Gänze bekannt, bspw. aufgrund der Intransparenz der Prozesskette, verursacht durch nicht messbare Prozesszustände und Zwischenproduktmerkmale.
- *Veränderlichkeit*: Vieldeutige Ursache-Wirkungs-Beziehungen sowie Systemzustände und Produkteigenschaften in der Prozesskette sind zeitabhängig.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff *Komplexität fertigungstechnischer Prozessketten* unabhängig davon verwendet, ob die Einzelprozesse in einem oder mehreren Produktionssystemen abgebildet sind und zu welchem Grad diese Prozesse und deren Material- und Informationsflüsse automatisiert sind.

### 2.2.5 Darlegung des Untersuchungsgebietes

Die in den vorhergehenden Abschnitten diskutierten Begriffe definieren im Wesentlichen das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit: Die Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten bzgl. der für die realisierte Beschaffenheit des Produktes relevanten Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Damit ist der Umfang der Recherchen zum Stand der Forschung in den folgenden Abschnitten klar abgegrenzt. Der Fokus liegt zum einen auf Konzepten zur qualitätsorientierten Analyse von Prozessketten und zum anderen auf Methoden des Komplexitätsmanagements fertigungstechnischer Prozessketten. Zunächst werden die dafür relevanten, grundlegenden Methoden knapp erläutert.

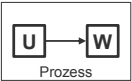
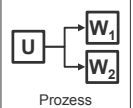

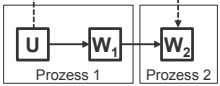
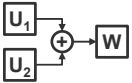
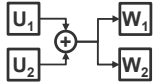
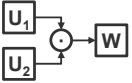
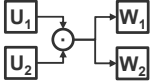
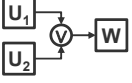
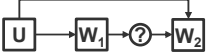
			Wirkung	
			einfach	mehrfach
Ursache	einfach	prozessbezogen	 $W = f(U)$	 $W_1 = f_1(U), W_2 = f_2(U)$
		prozessübergreifend	<p><i>direkt</i></p>  $W = f(U)$	<p><i>indirekt</i></p>  $W_1 = f_1(U), W_2 = f_2(f_1(U))$
	mehrfach	ohne Wechselwirkung	 $W = f_1(U_1) + f_2(U_2)$	 $W_1 = f_{11}(U_1) + f_{12}(U_2)$ $W_2 = f_{21}(U_1) + f_{22}(U_2)$
		mit Wechselwirkung	 $W = f_1(U_1 U_2)$	 $W_1 = f_1(U_1 U_2), W_2 = f_2(U_1 U_2)$
	unbekannt	unbekannt	<p><i>Präemption</i></p>  $W = f_1(U_1) \vee f_2(U_2)$	<p><i>Epiphänomen</i></p>  $W_1 = f_1(U)$ $W_2 = f_2(U), W_2 \neq f_2(W_1)$

Abbildung 3: Ausprägungsformen von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen in fertigungstechnischen Prozessketten<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ursache (U) und Wirkung (W)

## 2.3 Grundlegende Methoden

### 2.3.1 Methoden des Qualitätsmanagements

Das Qualitätsmanagement (QM) umfasst eine Vielzahl an Methoden für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle. Das breite Themenfeld des Qualitätsmanagements wird in den Werken von JURAN (1993), REINHART (1996), KAMISKE (2013) und MASING ET AL. (2014) ausführlich abgedeckt. In Tabelle 1 werden die für diese Arbeit relevanten Methoden zusammengefasst und auf die dazugehörige, einschlägige Literatur verwiesen.

*Tabelle 1: Übersicht der wichtigsten Methoden des Qualitätsmanagements im Rahmen dieser Arbeit mit Literaturquellen*

Methoden	Abkürzung	Literaturquellen
ABC-Analyse	-	BLOHM (1997) KIENER (2006) GIENKE & KÄMPF (2007) HOPP & SPEARMAN (2008)
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	FMEA	BRAUN (1993) TIETJEN & MÜLLER (2009) BRUNNER & WAGNER (2010) AREND (2012)
Failure Tree Analysis (dt. Fehlerbaumanalyse)	FTA	BRAUN (1993) AREND (2012)
House of Quality	HoQ	MADU (2006) KLEIN (2012)
Pareto-Analyse und -Diagramm	-	MORGENSTERN (2004) KAMISKE (2013)
Quality Function Deployment	QFD	AKAO (1992) KLEIN (2012)
Relationendiagramm	-	ZAPP (1998) KAMISKE (2013)
Statistical Process Control (dt. statistische Prozessregelung)	SPC	WENGLER (1996) HOPP & SPEARMAN (2008)
Theory of Inventive Problem Solving (dt. Theorie des erfinderischen Problemlösens)	TRIZ	TERNINKO ET AL. (1998) STEINS (2000)
Ursache-Wirkungs-Diagramm	-	MORGENSTERN (2004) DREWS & HILLEBRAND (2010)
Widerspruchsorientierte Innovationsstrategie	WOIS	LINDE & HILL (1993) STEINS (2000)

### 2.3.2 Statistische Versuchsmethodik

Die SVM, auch als *statistische Versuchsplanung* bezeichnet, ist die wichtigste Methodik zur Analyse technischer Systeme nach dem Laborprinzip (SCHÄFER 2003, siehe Abschnitt 2.4.1). Die SVM untersucht im Allgemeinen die Auswirkungen von Eingangsgrößen, sog. *Faktoren*, auf Ausgangsgrößen, sog. *Zielgrößen*, des betrachteten Systems mit Hilfe von *Versuchsplänen* (PETERSEN 1991). Diese werden auf Basis von Modellannahmen des Systemverhaltens unter statistischen Gesichtspunkten so aufgebaut, dass entsprechend des angenommenen mathematischen Modells der Versuchsaufwand minimiert und der Informationsgewinn maximiert werden (PETERSEN 1991). In Abhängigkeit der Kenntnisse über das Systemverhalten und der Untersuchungsziele der durchzuführenden Analyse unterscheidet MAYERS (1997) Screening Experimente, die experimentelle Optimumsuche und Untersuchungen im Optimalgebiet. Während in Screening Experimenten die Reduktion der Eingangsgrößen im Vordergrund steht, zielen die beiden anderen Untersuchungen auf die Optimierung der Zielgrößen durch geeignete Faktoreinstellungen und die Identifikation mathematischer Modelle ab. Für die unterschiedlichen Untersuchungsziele stellt die SVM eine Vielzahl von Versuchsplänen bereit, bspw. faktorielle Versuchspläne, zentral zusammengesetzte Versuchspläne und optimale Versuchspläne (PETERSEN 1991). Vertreter der letzteren Kategorie sind D-optimale Versuchspläne, welche die Minimierung des gemeinsamen Volumens des Vertrauensbereichs der Regressionskoeffizienten (siehe Abschnitt 2.3.3) anstreben (KLEPPMANN 2011). Vor- und Nachteile D-optimaler Versuchspläne sind in PETERSEN (1991) aufgeführt.

Für die Anwendung der SVM existieren eine Reihe von Vorgehensweisen, welche sich in verschiedene Schritte gliedern. Die wichtigsten Schritte zur Durchführung der SVM sind *die Systemanalyse, die Versuchsstrategie, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung* ggf. ergänzt um einen Validierungsschritt (MAYERS 1997 und GUNDLACH 2004). Darüber hinaus wenden die Ansätze von Taguchi (TAGUCHI 1986) und Shainin (SHAININ & SHAININ 1988 und BHOTE 1990) die klassischen Werkzeuge der SVM an. Das Vorgehen nach Taguchi hat die robuste Gestaltung von Prozessen gegenüber Störgrößen zum Ziel (REINHART 1996). Die Versuchsplanung nach Shainin grenzt die Eingangsgrößen unter Berufung auf das Pareto-Prinzip mit Hilfe sieben grundlegender Werkzeuge schrittweise ein (REINHART 1996). Dabei wird versucht, die Haupteinflussgrößen streuender Qualitätsmerkmale zu identifizieren und deren Einstellung zu optimieren (GUNDLACH 2004).

Weiterführende Informationen zur SVM können einschlägigen Werken entnommen werden: PETERSEN (1991), SCHEFFLER (1997), SCHULZE (1999), MYERS ET AL.

(2009), SIEBERTZ ET AL. (2010), GUNDLACH (2004) und KLEPPMANN (2011). Die Auswertung der durch die Versuchsdurchführung entstehenden Daten mit den Methoden der Statistik wird im folgenden Abschnitt thematisiert.

### 2.3.3 Regressionsanalyse

Die Statistik bietet eine Reihe von Möglichkeiten zur Auswertung von Versuchsdaten. Im Rahmen dieser Arbeit stehen die Regressionsanalyse und die bei deren Anwendung eingesetzten statistischen Kennzahlen und Analysemethoden im Vordergrund. Die Regressionsanalyse ist eine Methode zur Identifikation empirischer Modelle zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen. Entsprechend den zu untersuchenden Zusammenhängen werden die *lineare Regression*, die *nicht lineare Regression* und die *multiple Regression* unterschieden (KRISHNAMOORTHY & KRISHNAMOORTHY 2011). Nach SEBER & WILD (1989) und MYERS ET AL. (2009) können lineare Regressionsmodelle nicht lineare Faktorausdrücke enthalten. Entscheidend ist die Linearität der Regressionskoeffizienten  $b_j$ . Mit Gleichung (2.1) ist ein allgemeines, multiples lineares Regressionsmodell mit  $m$  Faktoren gegeben, das den Zusammenhang zwischen einer abhängigen Variable  $y$  und den unabhängigen Variablen  $x_j$  sowie einem Fehlerterm  $e$  beschreibt (MYERS ET AL. 2009).

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m + e \quad (2.1)$$

In der Regressionsanalyse gilt es, die Regressionskoeffizienten so zu bestimmen, dass das zu Grunde gelegte Modell die Versuchsdaten möglichst gut beschreibt. Hierzu wird häufig die Methode der kleinsten Quadrate eingesetzt (MYERS ET AL. 2009), welche im Folgenden kurz vorgestellt wird. Im ersten Schritt wird Gleichung (2.1) für jeden der zur Verfügung stehenden  $i = 1, 2, \dots, n$  Datenpunkte aufgestellt und in Matrix-Vektor-Schreibweise überführt (Gleichung (2.2)). Dabei fasst die Modellmatrix  $\underline{X}$  die unabhängigen Variablen zusammen. Im zweiten Schritt ist die Summe der Fehlerquadrate  $L$  entsprechend Gleichung (2.3) zu minimieren (MYERS ET AL. 2009).

$$\underline{y} = \underline{X}\underline{b} + \underline{e} \quad (2.2)$$

$$L = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \underline{e}^T \underline{e} = (\underline{y} - \underline{X}\underline{b})^T (\underline{y} - \underline{X}\underline{b}) \quad (2.3)$$

Umformungen und Ableitung führen zu den gesuchten, geschätzten Koeffizienten  $\hat{\underline{b}}$  (Gleichung (2.4)) und damit zum angepassten Regressionsmodell nach Gleichung

(2.5) zur Vorhersage des Zielgrößenvektors  $\underline{\hat{y}}$ . Die Differenz zwischen den tatsächlichen Werten der abhängigen Größe und den vorhergesagten Werten ergibt den Vektor der Residuen  $\underline{r}$  entsprechend Gleichung (2.6). (MYERS ET AL. 2009)

$$\underline{\hat{b}} = (\underline{X}^T \underline{X})^{-1} \underline{X}^T \underline{y} \quad (2.4)$$

$$\underline{\hat{y}} = \underline{X} \underline{\hat{b}} \quad (2.5)$$

$$\underline{r} = \underline{y} - \underline{\hat{y}} \quad (2.6)$$

Zur Beurteilung der Güte von Regressionsmodellen existieren eine Reihe statistischer Kennzahlen. Der Quotient aus den Quadraten der vorhergesagten Werte der abhängigen Größe und der tatsächlichen Werte ist das sog. Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells  $R^2$  (GROSS 2003, Gleichung (2.7)). Um den Einfluss der Anzahl der Modellterme auf das Bestimmtheitsmaß zu kompensieren, wird häufig das korrigierte Bestimmtheitsmaß  $R_{kor}^2$  nach Gleichung (2.8) verwendet. Dabei entspricht  $n$  der Anzahl der betrachteten Versuchsdaten und  $p$  der Anzahl der Modellkoeffizienten. Beide Gütemaße können Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei die Qualität der Anpassung umso besser ist, je größer  $R^2$  und  $R_{kor}^2$  sind.

$$R^2 = \frac{\|\underline{\hat{y}}\|^2}{\|\underline{y}\|^2} = \frac{\underline{y}^T \underline{X} (\underline{X}^T \underline{X})^{-1} \underline{X}^T \underline{y}}{\underline{y}^T \underline{y}} \quad (2.7)$$

$$R_{kor}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2) \quad (2.8)$$

Des Weiteren kann zu den Vorhersagewerten des Regressionsmodells ein Vertrauensbereich, auch Konfidenzintervall bezeichnet, angegeben werden. In diesem Bereich befinden sich die Vorhersagewerte des Regressionsmodells mit der Vertrauenswahrscheinlichkeit bzw. dem Konfidenzniveau  $1 - \alpha$  (SIBBERTSEN & LEHNE 2015). Dabei entspricht  $\alpha$  der Irrtumswahrscheinlichkeit, welche üblicherweise zu 5 % angenommen wird. Zur Berechnung der oberen und unteren Grenze des Vertrauensbereichs wird auf MYERS ET AL. (2009), FAHRMEIR (2010) und SIBBERTSEN & LEHNE (2015) verwiesen.

Auf Basis der Irrtumswahrscheinlichkeit kann die Signifikanz der einzelnen Koeffizienten des Regressionsmodells ermittelt werden. Die Vorgehensweise hierzu wird in GUNDLACH (2004) und MYERS ET AL. (2009) beschrieben. Mit Hilfe dieser Information kann in der schrittweisen Regressionsanalyse über den Ausschluss bzw. die

Aufnahme von Modelltermen entschieden werden. In der einschlägigen Literatur zur Regressionsanalyse (bspw. SEBER & WILD 1989 und GROSS 2003) sowie zur Statistik im Allgemeinen (bspw. FAHRMEIR 2010 und SIBBERTSEN & LEHNE 2015) sind weiterführende Informationen zu finden.

## 2.4 Methoden zur Analyse fertigungstechnischer Prozessketten

### 2.4.1 Analyse technischer Systeme

Unter *Analysen* werden Untersuchungen zum Erkennen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen in Systemen sowie zur Aufklärung der Struktur, Funktionalität und Vernetzung von Systemen verstanden (SCHÄFER 2003). Diese Untersuchungen stellen eine geplante Abfolge von Aktivitäten dar, wie bspw. die Definition der Systemgrenze und die Planung und Durchführung von Experimenten. Zur Gewährleistung einer zielgerichteten Analyse sind die einzelnen Aktivitäten im Allgemeinen aufeinander abzustimmen und bzgl. des Analyseziels sowie deren Randbedingungen auszuwählen. In den folgenden Abschnitten werden Methoden und Vorgehensweisen zur Analyse fertigungstechnischer Prozessketten zusammengefasst. Häufig kommen dabei etablierte Werkzeuge des Qualitätsmanagements zum Einsatz.

Zur Analyse technischer Systeme kann grundsätzlich der *deduktive* und der *induktive* Ansatz gewählt werden. Im Falle der Deduktion werden aus allgemeingültigen Theorien oder Modellen Erkenntnisse für einen speziellen Fall *qualitativ* oder *quantitativ* abgeleitet. Eine deduktiv-qualitative Analyse wird auch als heuristische Analyse bezeichnet (SCHÄFER 2003). Demgegenüber werden beim induktiven Vorgehen verallgemeinerte Erkenntnisse aus Einzelfällen gefolgert. Kommen hierbei praktische Erfahrungen oder Experimente zum Einsatz, spricht man von einem *empirischen* Vorgehen (STRAUB ET AL. 1994). Nach SCHÄFER (2003) werden empirische Untersuchungen in *phänomenologische* und *datenbasierte* Untersuchungen unterteilt. Bei den datenbasierten Untersuchungen kann wiederum der *labororientierte* und der *feldorientierte Ansatz* unterschieden werden (siehe Abbildung 4).

In den Ingenieurwissenschaften sind empirische Untersuchungen mittels Experimenten nach dem Laborprinzip weit verbreitet. Dabei werden unabhängige Variablen variiert und durch Konstanthalten aller anderen Einflussgrößen, entsprechend dem sog. Ceteris-Paribus-Prinzip (STRAUB ET AL. 1994 und SARKAR & PFEIFER 2006), deren Auswirkungen auf abhängige Variablen ermittelt. Die ordnungsgemäße und statistisch korrekte Planung der Experimente im Rahmen der Versuchsstrategie wird durch

die SVM (siehe Abschnitt 2.3.2) ermöglicht. Feldorientierte Untersuchungen lassen sich nach HIELSCHER (2008) weiter in Experimente im Feld und Feldbeobachtungen unterteilen. Letztere basieren auf Beobachtungen des realen Systemverhaltens ohne gezieltes Verändern oder Konstanthalten von Einflussgrößen. Hierbei wird angenommen, dass alle Einflüsse auf das System in einer ausreichend großen, repräsentativen Datenbasis abgebildet sind (SCHÄFER 2003). Dementsprechend weisen die in feldorientierten Untersuchungen erhobenen Daten einen stärkeren Bezug zum Kontext auf, in dem das System betrieben wird, als dies bei labororientierten Untersuchungen der Fall ist. Als Nachteil der feldorientierten Untersuchungen ist die Gefahr der Analyse von nicht kausalen Korrelationen zu nennen (siehe *Pseudokausalität* in Abschnitt 2.2.3). Nach SCHÄFER (2003) ist dies durch die schlechte Isolierbarkeit der Einflüsse bei feldorientierten Beobachtungen bedingt. Die feldorientierte Analyse ist nicht mit dem Begriff der *Feldversuche* zu verwechseln, welcher in erster Linie auf den Funktionstest von technischen Systemen unter realen Bedingungen abzielt. Neben den erläuterten induktiven, datenbasierten Analysekonzepten beruhen die in der industriellen Praxis weitverbreiteten phänomenologischen Untersuchungen auf der Analyse von Einzelfällen unter umfassender Berücksichtigung des Kontexts (STRAUB ET AL. 1994).

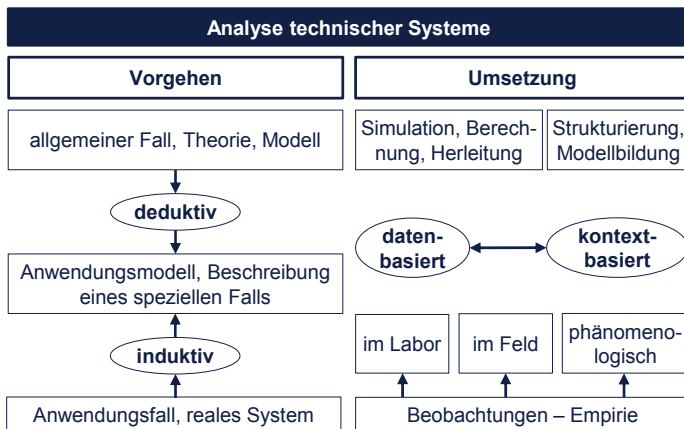


Abbildung 4: Ansätze zur Analyse von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen in technischen Systemen in Anlehnung an SCHÄFER (2003)

Die im Folgenden zusammengefassten Arbeiten zur Analyse fertigungstechnischer Prozessketten werden entsprechend ihres grundlegenden Analyseansatzes gegliedert. Dabei ist es möglich, dass sich Arbeiten auf einzelne Analyseansätze beschränken



oder deduktiv-qualitative Ansätze mit induktiven Analysen kombinieren. Die dargestellten Vorgehensweisen wurden auf unterschiedlich komplexe Prozessketten angewandt. Der Großteil der Anwendungsfälle bezieht sich auf die Herstellung keramischer Bauteile, deren Prozesskette im Zeitraum ab Mitte der 1990er bis Anfang der 2000er Jahre mehrfach wissenschaftlich analysiert wurde. Im Gegensatz zu Bauteilen, welche mit einfacheren Prozessketten und vorwiegend mit fertigungstechnischen Prozessen hergestellt werden, entstehen keramische Bauteile nicht aus Halbzeugen, sondern direkt aus Rohstoffen. Dementsprechend kommen verfahrens- und fertigungstechnische Prozesse zum Einsatz. Darüber hinaus existierten unbekannte Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Stellgrößen und der Bauteilqualität. Die Fehlerentdeckung in späteren Prozessen als die Fehlerentstehung erschwert die Prozesskettenanalyse zusätzlich. Aus diesen Gründen stellen die Ansätze zur Analyse der Prozesskette für keramische Bauteile eine bedeutende Grundlage für die vorliegende Arbeit dar.

### 2.4.2 Deduktiv-qualitative Modellierung und Analysen

HARTUNG (1994) entwickelt eine Methode für das integrierte Qualitätsmanagement zur Produktplanung, Produkt- und Prozessgestaltung. Letztere ist auf die Auswahl eines Fertigungs- und Montagekonzeptes fokussiert. Die Konzepte werden in einer verknüpften Anwendung der Prozess-FMEA, der FTA und des HoQ aus dem QFD bzgl. der Auswirkung von Fehlern in der Produktion auf die Produktqualität bewertet. Die Methode wird am Beispiel der Entwicklung des Blatteinzugs eines Fotokopierers angewandt, wobei der Schwerpunkt auf der Produktgestaltung liegt.

Auf Basis des QFD stellt WENGLER (1996) eine Methodik für die Qualitätsplanung und -verbesserung in der Keramikindustrie vor, deren Kernelemente ein Beschreibungs-, ein Erklärungs- und ein Entscheidungsmodell sind. Das Beschreibungsmodell dient der systematischen Darstellung der Systemelemente, welche sich aus dem Produkt und der Prozesskette ergeben, wohingegen das Erklärungsmodell die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Systemelementen abbildet. Das Entscheidungsmodell ermöglicht es, Maßnahmen zur Verbesserung der Produktqualität auf Basis des Wissens im Erklärungsmodell abzuleiten. Mit diesem Ansatz können Korrelationen zwischen den Qualitätsmerkmalen, den Zwischenproduktmerkmalen und den Prozessparametern in einer Prozesskette untersucht und bewertet werden. Darüber hinaus werden die Einflüsse der Prozessparameter auf die Produktqualität betrachtet. Hierbei werden die indirekten Wirkungen der Prozessparameter über Zwischenproduktmerkmale auf die Qualitätsmerkmale berechnet. Dies erfolgt allerdings nicht über mehrere Prozesskettenelemente hinweg, sodass keine prozesskettenweite

Betrachtung der indirekten Wirkungen stattfindet. Die Beschränkung auf die domänenspezifischen HoQ-Matrizen führt dazu, dass Wechselwirkungen der Prozessparameter und der Zwischenproduktmerkmale auf die Qualitätsmerkmale nicht darstellbar sind. Durch die QFD-typische Vorgehensweise werden Kundenanforderungen, Qualitätsmerkmale, Zwischenproduktmerkmale und Prozessparameter domänenweise miteinander korreliert ohne dabei dem sequentiellen Charakter fertigungstechnischer Prozessketten Rechnung zu tragen. Bei der Analyse von Ursache-Wirkungs-Beziehungen in fertigungstechnischen Prozessketten mit einer Vielzahl an Prozessen und Zwischenprodukten gerät die HoQ-basierte Verknüpfung von Qualitätsmerkmalen und Zwischenprodukten bzw. von Zwischenprodukten und Prozessparametern über die gesamte Prozesskette schnell an ihre Grenzen bzgl. Informationsakquise, Darstellung und Unterstützung bei der empirischen Absicherung.

MAYERS (1997) schlägt zur Vorbereitung empirischer Analysen das *heuristische Screening* vor. Dieses gliedert sich in die Schritte Sammlung, Strukturierung, Eingrenzung und Bewertung und verfolgt das Ziel, die in der SVM zu berücksichtigenden Einflussgrößen mit Hilfe von Heuristiken im Sinne des Pareto-Prinzips auszuwählen. Für jeden Schritt werden heuristische Methoden zur Unterstützung der Ausführung vorgeschlagen. Die Eingrenzung und Bewertung möglicher Ursachen einer Zielgröße wird mit Hilfe einer erweiterten Intensitäts-Beziehungsmatrix erreicht, in welcher die Beziehungen der Ursachen untereinander und in einer weiteren Spalte die Beziehungen zwischen den Ursachen und der Zielgröße qualitativ abgebildet werden. Dabei kann neben der Intensität der Beziehungen auch die jeweilige Sicherheit der Information in zwei Stufen angegeben werden. Auf diese Weise können sowohl Wechselwirkungen der Einflussgrößen als auch die Wirkung auf eine Zielgröße in einer Matrix dargestellt werden. Das heuristische Screening erfolgt zielgrößenbezogen, sodass für jede Zielgröße eine eigene Intensitäts-Beziehungsmatrix zu erarbeiten ist. Prozessübergreifende Betrachtungen sind mit der vorgestellten Methode nicht möglich, da im Falle der Bewertung mehrerer einzelner Prozesse keine Verknüpfungsmöglichkeiten existieren. Das Ergebnis des heuristischen Screenings kann in Portfolio-Diagrammen unter Verwendung der Zeilen- und Spaltensummen dargestellt werden.

Von ZAPP (1998) wird zum einen eine Anforderungsanalyse vorgestellt, in welcher die an das Produkt gestellten Anforderungen mit Hilfe einer Anforderungskette über die Bauteilebene bis auf die Ebene der Rohstoffe herunter gebrochen werden. Zum anderen werden durch eine entgegengesetzte, die Produktrealisierung beschreibende Wirkkette Anforderungen an die Prozesskettengestaltung identifiziert. Dabei kommt

ZAPP (1998) zu dem Schluss, dass für eine Prozesskettenoptimierung eine unabhängige Betrachtung der Prozesse nicht zielführend ist, sondern auch die Wechselwirkungen zwischen den Prozessen untersucht werden müssen. Die durchgeführten Analysen sind vorrangig heuristischer Natur und greifen bspw. auf Relationendiagramme zurück. Ein dritter Hauptbestandteil der Arbeit ist die statistische Analyse der Merkmalsvererbung und -vernetzung sowie eine Vorgehensweise zu deren Beschreibung (ZAPP 1998). Dabei wird untersucht, inwiefern Produktmerkmale untereinander vernetzt sind und sich gegenseitig beeinflussen. Zur Beschreibung des Prozesskettenverhaltens werden die Mehrmerkmalsfähigkeit und die Prozesskettenfähigkeit eingeführt. Dabei beschreibt die Mehrmerkmalsfähigkeit die Prozessfähigkeit eines Einzelprozesses bzgl. mehrerer Zielgrößen. Die Prozesskettenfähigkeit stellt die Prozessfähigkeit mehrerer Prozesse bzgl. der Qualitätsmerkmale dar. Diese Kennzahlen bieten einen großen Mehrwert zur Bewertung einer laufenden Produktion, tragen aber nicht zur Prozesskettenanalyse beim Produktionsanlauf bei. Anwendung findet die Methode bei der Bearbeitung von Hochleistungskeramiken durch ultraschallgestütztes Schleifen.

JUNG (2000) baut ein prozessnahes Optimierungsmodell für komplexe, industrielle Prozesse auf. Zur Analyse der Prozesse wird vorhandenes Wissen mit Hilfe einer Prozess-FMEA gesammelt (JUNG 2000). Die Modellierung der Prozesskette erfolgt auf Basis der *Structured Analysis and Design Technique* (SADT). Dabei wird die Prozesskette als Abfolge von Prozessschritten aufgefasst, welche Eingangsgrößen besitzen, die durch sog. Mechanismen in Ausgangsgrößen umgewandelt werden. Die Ausgangsgrößen eines Prozesses werden als Eingangsgrößen des folgenden Prozesses oder als Eigenschaft des Fertigproduktes angesehen. In Abhängigkeit der Ergebnisse aus den Experimenten nach dem Laborprinzip wird das Prozessmodell angepasst und damit eine Reduzierung künftiger Versuchspläne im Falle experimentell nicht bestätigter Effekte erreicht. Als Nachteil des deduktiv-qualitativen Ansatzes von JUNG (2000) ist ein hoher Aufwand zur Modellierung der einzelnen Prozesse anzuführen. Darüber hinaus werden keine prozessübergreifenden und indirekten Ursache-Wirkungs-Beziehungen betrachtet. Außerdem bleibt unklar, wie die systematische Verknüpfung der FMEA mit dem Prozessmodell durchzuführen ist.

Die Vorgehensweise von STEINS (2000) zur qualitätsgerechten Optimierung komplexer Produktionssysteme gliedert sich in eine *Vor-, Haupt- und Detailstudie*. Auf jeder dieser Ebenen wird ein Optimierungszyklus durchlaufen, der wiederum aus einer *Situationsanalyse, Modellierung, Festlegung der Optimierungsschwerpunkte und Lösung des Optimierungsproblems* besteht. Zu diesen einzelnen Phasen des Optimie-

rungszyklus werden innovative und konventionelle Methoden als Handlungsmöglichkeiten angegeben. So sind für die Situationsanalyse Methoden der TRIZ und für die Modellierung der Hauptprozesse der fertigungstechnischen Prozesskette sog. Beschreibungskarten vorgesehen. Letztere fassen die Informationen zu Teilprozessen, Eingangs- und Ausgangsgrößen, Betriebsmitteln sowie zu Material- und Informationsflüssen zusammen. Im Rahmen der Modellierung der Prozesskette erfolgt durch Standardfragen zu schädlichen und nützlichen Funktionen eine primärfunktionsorientierte, heuristische Ursache-Wirkungs-Analyse. Die weitere Einschränkung und Lösung des Optimierungsproblems ist durch Methoden der WOIS und des Systems Engineerings geprägt. Anwendungsfälle sind eine Endmontagelinie für Verkehrsflugzeuge und eine Prozesskette zur Herstellung von Solarmodulen in der Pilotphase. Die Vorgehensweise setzt im Wesentlichen identifizierte Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge voraus und geht nicht genauer auf eine Quantifizierung dieser ein, sodass keine Optimierung im streng mathematischen Sinne erfolgt.

EICHGRÜN (2003) verfolgt das Ziel der Steigerung der Prozesssicherheit und betrachtet die Themenbereiche Modellierung, Analyse, Gestaltung und Führung von Prozessketten. Das vorgestellte Konzept basiert auf einem Referenzmodell der fertigungstechnischen Prozesskette und einem Umsetzungsmodell mit sechs Zyklusphasen. Sämtliche Schritte des Konzeptes werden anhand der Fertigung von Ventilen aus Hochleistungskeramik konkretisiert. In der ersten Phase des Konzeptes wird der Sollzustand des Fertigteils definiert und in einem Werkstückmodell abgebildet, dessen Beschreibungsdimensionen *Geometrie*, *Oberfläche*, *Randzone* und *Werkstückkern* sind. Für jede dieser vier Dimensionen wird eine generische, strukturierte Liste von Eigenschaften zur Vereinfachung der Beschreibung bereitgestellt (EICHGRÜN 2003). Im Rahmen der zweiten Phase wird der Sollzustand mit dem Istzustand des Fertigteils verglichen und daraus die Zielgrößen und -werte für das weitere Vorgehen abgeleitet. Für die Durchführung dieser Phase werden die Existenz von Fertigteilen und das Vorliegen von Messergebnissen zu den betrachteten Produktmerkmalen vorausgesetzt, welche unter Verwendung der zu untersuchenden Prozesskette gefertigt wurden. Dementsprechend ist der Ansatz nur bedingt für den Produktionsanlauf einer Prozesskette anwendbar. Die dritte Phase besteht aus einer modellbasierten, deduktiven Systemanalyse der Prozesskettenstruktur mit Hilfe der SADT. Das Prozesskettenverhalten wird in einer Bewertungsmatrix abgebildet. Darin werden im inneren Matrixfeld Zusammenhänge zwischen Werkstückmerkmalen und Prozesseinheiten und in Dachmatrizen die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Merkmalen bzw. den Prozesseinheiten eingetragen. Die dreistufige Bewertung erfolgt durch ein interdisziplinäres Projektteam mit prozessübergreifenden Kompetenzen. Zur Gewährleistung einer strukturierten Bewertung werden Methoden, wie die FMEA, vorge-

schlagen. Dabei wird nicht beantwortet, wie die Informationen aus den Bewertungsmethoden in die Bewertungsmatrix übertragen werden können. Abschließend findet in dieser Phase die Zieldefinition für die nachfolgende empirische Analyse der Prozesskette statt.

SCHÄFER (2003) erarbeitet ein Referenzmodell für den Betrachtungsraum *Fertigteil, Prozesskette, Analyse und Gestaltung*. Auf dieser Grundlage wird die Prozesskette erst in einer deduktiven und anschließend in einer induktiven Phase analysiert. Schwerpunkt der deduktiven Analyse ist die Verhaltensmodellierung der Prozesskette auf Basis der Bewertungen einer interdisziplinären Arbeitsgruppe. Dieser Schritt gliedert sich in eine vorwärts und einer rückwärts gekoppelte Analyse. Bei der vorwärtsgerichteten Bewertung werden die direkten und indirekten Wirkungen von Systemparametern auf die Produkteigenschaften und auf andere Systemparameter erfasst. Hierfür werden das Ursache-Wirkungs-Diagramm, das Baum-Diagramm und das Relationendiagramm empfohlen. Bei der rückwärts gekoppelten Vorgehensweise werden von einer Produkteigenschaft ausgehend rückwärts die Einflüsse auf diese modelliert, bspw. unter Anwendung einer FMEA oder FTA. SCHÄFER (2003) geht dabei nicht auf die Details der Methodenanwendung zur Erreichung der Analyseziele ein. Insbesondere die Verknüpfung zu vorhergehenden und nachfolgenden Schritten bleibt offen. Zur Darstellung der Analyseergebnisse wird eine Einfluss-Wirkungs-Matrix verwendet. Die darin eingetragenen Zusammenhänge werden bzgl. ihrer Zuverlässigkeit in *nachgewiesen* und *vermutet* unterschieden. Aus den in der Einfluss-Wirkungs-Matrix offengelegten Erkenntnislücken wird der Erkenntnisbedarf für die induktive Analyse abgeleitet. Zusätzlich wird die Qualitätsrelevanz, die Erfassungsmöglichkeit und der Erfassungsaufwand der Größen im Bereich der Erkenntnislücken mit Hilfe von Expertenwissen erfasst.

BETTIN (2004) setzt den Fokus auf Qualitätsregelkreise für fertigungstechnische Prozessketten sowie die Auswahl von Maßnahmen zur Erfassung der Qualitätszielgrößen. Um den Nachteilen der konventionellen, rückwärtswirkenden Regelungen entgegenzuwirken, schlägt BETTIN (2004) eine Prozesskettenregelung auf Basis informationstechnisch verketteter, modellbasierter Regelkreise vor. Hierfür wird ein mathematisches Prozesskettenmodell aufgebaut, welches auf einer linearen Matrix-Vektor-Darstellung beruht. In Matrizen werden Prozessfunktionen abgebildet, welche Eingangs- in Ausgangsvektoren überführen. Die Ausgangsvektoren enthalten die Zwischenprodukteigenschaften als Ergebnis des betrachteten Prozesses. Dabei ist der Ausgangsvektor eines Prozesses der Eingangsvektor des darauffolgenden Prozesses. Im Falle des letzten Prozesses enthält der Ausgangsvektor die Qualitätsmerkmale des

Fertigteils. Die Prozessfunktionen werden durch Matrixmultiplikation über die Prozesskette miteinander verknüpft. Die in Versuchen ermittelten funktionalen Zusammenhänge werden zusammen mit zusätzlichem Erfahrungswissen in Form von Regeln in ein wissensbasiertes System übertragen, welches die Grundlage für die modellbasierten Qualitätsregelkreise darstellt. Die Regeln werden bspw. mathematisch oder in einer Fuzzy-Beschreibung formuliert. Die quantitative Modellierung von Prozessketten mit Hilfe von Matrizen stellt eine mathematisch fundierte und aussichtsreiche Beschreibungsform dar. Der Ansatz von BETTIN (2004) lässt aber einige Aspekte, wie die Modellierung von prozessübergreifenden Wirkungen, offen.

Die Vorgehensweise von HIELSCHER (2008) zur fehlerbasierten Optimierung der Bauteilqualität fertigungstechnischer Prozessketten setzt die Schwerpunkte auf die Ableitung eines Erfassungsplans für Prozess- und Produktgrößen, die Bewertung der Datenqualität und die Auslegung eines zentralen Datenspeichers als Grundvoraussetzung für eine umfassende Analyse von Prozessketten. Die Analyse selbst beginnt mit dem Aufbau eines Bauteilmodells sowie der Definition des Soll- und Istzustands des betrachteten Bauteils. Im Anschluss an eine Grob- und Feinmodellierung der Prozesskette werden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Fertigungsfehlern eines Bauteils und den möglichen Einflussgrößen ermittelt. Dieser Schritt erfolgt expertenbasiert unter Einsatz einer an das HoQ angelehnten Bewertungsmatrix, ohne Berücksichtigung von Bauteil-Zwischenprodukten und indirekten Ursache-Wirkungs-Ketten. Weiteren Handlungsbedarf identifiziert HIELSCHER (2008) insbesondere bei der Automatisierung der Datenanalyse und -interpretation sowie bei der Erarbeitung eines allgemeingültigen und detaillierten Prozesskettenmodells.

In der Publikationsreihe GROßMANN & WIEMER (2010), GROßMANN ET AL. (2010) und GROßMANN & WIEMER (2011) sowie in den Veröffentlichungen GROßMANN ET AL. (2012A), GROßMANN ET AL. (2012B) und GROßMANN ET AL. (2013) wird eine Methodik zur Modellierung und Analyse innovativer Prozessketten in Verbindung mit einem datenbankbasierten Software-Tool vorgestellt. Nach GROßMANN & WIEMER (2010) fehlt es an Methoden, welche einen schnellen Aufbau von Prozesswissen für eine reproduzierbare Fertigung neuer Produkte ermöglichen. Ebenso ist kommerziell erhältliche Software zur rechnergestützten Arbeitsplanung (engl. Computer-Aided Process Planning, CAPP), zum Produktlebenszyklusmanagement (PLM) und zur rechnerunterstützten Fertigung (engl. Computer-Aided Manufacturing, CAM) nicht für die Analyse komplexer Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in fertigungstechnischen Prozessketten geeignet (GROßMANN ET AL. 2010 und GROßMANN ET AL. 2013). Die zu untersuchenden, innovativen Prozessketten werden häufig als nicht reprodu-

zierbar angesehen, was u. a. durch folgende Argumente untermauert wird: die Verarbeitung neuartiger Werkstoffe, der Einsatz neuartiger Fertigungstechnologien, das lückenhafte Analysewissen und die eingeschränkte Steuerbarkeit durch geringe Automatisierungsgrade. Die entwickelte Methodik besteht im Wesentlichen aus den Schritten *Prozessmodellierung*, *Datenerfassung* und *Datenanalyse*. Das Kernelement stellt ein die Prozesskette beschreibendes Datenmodell dar, welches in eine Datenbank integriert ist. Dabei wird die Prozesskette in die einzelnen Prozessschritte zerlegt. Diese werden auf Basis ihrer Ursachen, insbesondere den Eigenschaften des eingehenden Zwischenproduktes, und ihrer Wirkungen, den Eigenschaften des ausgehenden Zwischenproduktes, beschrieben. Darüber hinaus werden alle weiteren am Prozess beteiligten Elemente berücksichtigt. Hierzu zählen Werkzeuge, Maschinen, Hilfsstoffe und die Prozessumgebung mit ihren Einflussgrößen. Außerdem werden neben den technologischen Prozessen auch Prüfprozesse modelliert, welche die zu prüfenden Produkteigenschaften und Prüfmethoden enthalten (GROßMANN ET AL. 2012B). Das Wissen zur Struktur der Prozesskette stammt von Experten. Über *zielorientierte Diskussionen* und *spezielle Fragetechniken* (GROßMANN ET AL. 2013) hinaus wird für die Expertenbefragung keine methodische Unterstützung geboten. Bei der Verknüpfung der einzelnen Prozesse zur Prozesskette sind die Toleranzen bzw. Soll-Zwischenprodukteigenschaften an den Schnittstellen von Anfang an zu berücksichtigen (GROßMANN ET AL. 2012B).

### 2.4.3 Induktiv-labororientierte Analysen

Im Bereich der induktiv-labororientierten Analysen führt BOURDON (1994) eine Optimierung der Prozessrobustheit beim Spritzgießen nach Taguchi durch. Dabei werden Maschinenparameter anhand von praktischem Wissen, Ergebnissen aus Literaturrecherchen und Erkenntnissen aus der Vorgehensweise nach Shainin bzgl. ihrer Qualitätsrelevanz kategorisiert. Diese Einteilung ist die Grundlage für Experimente nach dem Laborprinzip, wobei in einem Versuchsplan maximal fünf qualitätsrelevante Parameter aufgenommen werden. Auf Basis der aus den Versuchen erlangten Erkenntnisse werden verbesserte Parametereinstellungen abgeleitet und in Bestätigungsexperimenten überprüft. Das Konstanthalten der restlichen Parameter führt zu einer eingeschränkten Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den Serienbetrieb aufgrund vernachlässigter Wechselwirkungen.

WENGLER (1996) überprüft die bspw. durch Konstruktions- und Prozess-FMEA heuristisch ermittelten Zusammenhänge mit Hilfe der SVM. Dabei bietet ein Selektionschema Unterstützung bei der Auswahl eines Versuchsplans unter Berücksichtigung

des Versuchsziels, der Anzahl an Faktorstufen und der vermuteten Wechselwirkungen. Die Anwendung erfolgt im Rahmen der Herstellung von keramischen Bauteilen. Der induktiv-labororientierte Ansatz geht nicht auf die spezifischen Anforderungen zur Analyse von Prozessketten ein.

Die Arbeit von MAYERS (1997) stellt eine experimentelle Prozessanalyse mittels SVM dar, geeignet für die Produkt- und Prozessoptimierung. Im Anschluss an das *heuristische Screening* schlägt MAYERS (1997) für die experimentelle Systemanalyse eine Vorgehensweise in drei Schritten vor: *Screening Experimente*, *experimentelle Optimumsuche* und *Untersuchung im Optimalgebiet*. Für die Auswertung der Daten aus Untersuchungen im Optimalgebiet wird die Regressionsanalyse nahegelegt. Die Validierung wird am Beispiel der Produkt- und Prozessoptimierung eines Abgasrückführventils und einer Kabelschaltung durchgeführt. Auch MAYERS (1997) behandelt nicht die Analyse von Prozessketten.

JUNG (2000) setzt für die Analyse komplexer Prozessketten und zur Vertiefung des Prozessverständnisses die SVM ein. Zu jedem Prozess werden Versuchspläne aufgebaut, welche als Faktoren auch Ausgangsgrößen vorhergehender Prozesse umfassen können. Somit sind die einzelnen Versuchspläne untereinander verknüpft. JUNG (2000) beschreibt Ansätze, wie diese Versuchspläne mit zunehmendem Prozesswissen reduziert und unter bestimmten Randbedingungen voneinander entkoppelt werden können. Zur Auswertung der Versuche wird eine rückwärtsgerichtete, entgegen der Prozessreihenfolge stattfindende Vorgehensweise unter Anwendung der Regressionsanalyse empfohlen. Hierzu wird zum einen auf statistische Kennzahlen, wie dem Vertrauensbereich und Signifikanzwerte, zurückgegriffen, zum anderen werden Haupteffekte und Mehrfaktorwechselwirkungen voneinander differenziert. Das Vorgehen wird auf die Prozesskette der Hartmetallherstellung angewandt. Defizite der Prozesskettenanalyse von JUNG (2000) sind die fehlende Berücksichtigung indirekter prozessübergreifender Zusammenhänge und der damit einhergehende hohe Versuchsaufwand. Des Weiteren wird nicht auf die speziellen Herausforderungen des Produktionsanlaufs eingegangen.

Der Beitrag von RYZKO (2001) zur Prozessanalyse und -optimierung in der verfahrenstechnischen Elastomerverarbeitung greift auf die klassische SVM zurück. Ziele sind die Auswahl geeigneter Prozessgrößen und Prüfmethoden, die empirische Modellierung der Einzelprozesse und deren anschließende Optimierung. Mit dieser Arbeit wird die Anwendbarkeit der SVM auf verfahrenstechnische Prozesse belegt. Zur Auswertung der Versuchsergebnisse kommen vorwiegend die Korrelations- und die Regressionsanalyse sowie damit verbundene statistische Kennzahlen zur Modellgüte



und Signifikanz der Faktoren zum Einsatz. Darüber hinaus werden mit Hilfe von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) und linearen Regressionsanalysen Modelle zur Prognose der Prozessergebnisse aufgebaut. Die Analyse von Prozessketten und der Produktionsanlauf werden nicht betrachtet.

Zur Bestimmung linearer Prozessfunktionen wendet BETTIN (2004) eine auf der SVM beruhende Prozesskettenanalyse an, deren Untersuchungsumfang in einem ersten Schritt durch die Festlegung der Qualitätsmerkmale eingegrenzt wird. Im zweiten Schritt werden prozessweise alle Prozessparameter und Störgrößen auf Basis von Expertenwissen hinsichtlich ihrer Bedeutung für die ausgewählten Qualitätsmerkmale, ihrer Messbarkeit und dem dafür erforderlichen Erfassungsaufwand bewertet. Für diese Bewertung und Auswahl wird keine methodische Unterstützung angeboten. Der Ansatz von BETTIN (2004) wird am Beispiel des Umspritzens von Metalleinlegeilen an drei Prozessschritten validiert.

In GROßMANN ET AL. (2012A) und GROßMANN ET AL. (2013) werden statistische Versuchspläne zur experimentellen Analyse einzelner Prozesse innerhalb komplexer Prozessketten eingesetzt. Zur Datenerfassung werden automatisiert Eingabemasken aus einem Prozesskettenmodell generiert. Die erfassten Daten werden mit Hilfe der Software R statistisch ausgewertet. Die entwickelte Methode erhebt den Anspruch, eine durchgängige Dokumentation von Versuchsergebnissen in Verbindung mit einer Möglichkeit zur Berücksichtigung kontextbasierter Erfahrungen und qualitätsrelevanter Beobachtungen aus der Versuchsdurchführung zu gewährleisten.

### 2.4.4 Induktiv-feldorientierte Analysen

Der auf Felddaten basierende Ansatz von MOLITOR (1997) realisiert prozessübergreifende Qualitätsregelkreise am Beispiel der Getriebefertigung. Der Fokus liegt dabei auf der automatisierten Fehlerdiagnose mit Hilfe von Klassifikationsmethoden, welche auf wissensbasierten Ansätzen oder Methoden der künstlichen Intelligenz beruhen. Wissensbasierte Systeme setzen Kenntnisse über die qualitätsrelevanten Ursache-Wirkungs-Beziehungen voraus. Die eingesetzten KNN werden mit Hilfe von umfangreichen Datensätzen trainiert, welche sowohl die Merkmale des Fertigteils als auch die Messwerte der relevanten Prozess- und Zwischenproduktmerkmale umfassen. Somit sind die Grundvoraussetzungen zur Anwendung des Ansatzes entweder eine bzgl. der Fertigproduktqualität verstandene Prozesskette oder eine umfassende Datenbasis, wie sie nur aus einer in der Serienproduktion betriebenen Prozesskette gewonnen werden kann.

EICHGRÜN (2003) sieht für die empirische Analyse von fertigungstechnischen Prozessketten sowohl einen phänomenologischen als auch einen feldorientierten Ansatz vor. Zur Zieldefinition wird eine Bewertungsmatrix eingesetzt, um Wissenslücken zu Ursache-Wirkungs-Beziehungen in der Prozesskette zu schließen. Hierfür werden rein auf Beobachtung basierende Methoden diskutiert. Dies sind zum einen kontextbasierte Methoden, wie phänomenologische Untersuchungen, und zum anderen datenbasierte Methoden analog zu SCHÄFER (2003). Die konkrete Anwendung und die Verknüpfung dieser Methoden mit der Bewertungsmatrix bleiben offen. Zur Aufklärung aller relevanten Ursache-Wirkungs-Beziehungen wird die Iteration der Bewertung und der empirischen Analyse vorgeschlagen.

SCHÄFER (2003) stellt einen Ansatz zur datenbasierten Ermittlung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen in fertigungstechnischen Prozessketten vor. Im Rahmen der induktiven Prozesskettenanalyse werden Beobachtungspläne, wie die Längsschnittuntersuchung und die Multiphasenuntersuchung, für datenbasierte, statistische Auswertungen verwendet. Dadurch wird die Anwendbarkeit des Konzeptes auf im Betrieb befindliche Prozessketten eingeschränkt. Vorteil dieses Analyseansatzes gegenüber Untersuchungen nach dem Laborprinzip ist, dass eine laufende Produktion kaum beeinträchtigt wird. Über die Analyse hinaus werden Maßnahmen zur Gestaltung und Verbesserung fertigungstechnischer Prozessketten abgeleitet. Dazu gehören die Anpassung der Toleranzen an Schnittstellen, die Anpassung der Erfassungsmethode und der Erfassungsdichte, die adaptive Prozessführung, die Anpassung der Prozessfolge, -funktionalität und -verknüpfung sowie Maßnahmen zur Streuungsreduktion in Prozessen. Am Beispiel der Blechbeschichtung wird das Konzept umgesetzt.

HASENER (2004) untersucht statistische Methoden in der Holzverarbeitung zur Prognose der Qualität. Mit Hilfe von Regressionsanalysen werden Modelle der mehrstufigen Prozesskette von Faserplatten zur Bewertung der Vorhersagefähigkeit der Produktqualität aufgebaut. Hierzu werden ein Beobachtungs- und ein Vorhersagedatensatz aus der Serienproduktion verwendet, welche jeweils Produktionszeiträume von mehreren Monaten umfassen. Es wird ausführlich auf Kennzahlen zur Bewertung der Modellgüte und auf statistische Verfahren zur Variablenauswahl eingegangen. Technologische Kriterien werden in der Auswahl und Ergebnisbewertung nicht berücksichtigt. HASENER (2004) hebt drei Anwendungsfälle für die erarbeiteten Prognosemodelle hervor: Die Identifikation der bedeutendsten Prozessvariablen einer Prozesskette, die Quantifizierung der dazugehörigen Einflüsse in Verbindung mit der

Vorhersage der Produktqualität, insbesondere wenn im Produktionsbetrieb aufwändig bestimmbare, qualitätsrelevante Größen vorliegen, und die Optimierung der Prozessvariablen.

HIELSCHER (2008) identifiziert den Untersuchungsbedarf mit Hilfe von Bewertungsmatrizen. Die feldorientierten Analysen basieren auf Längsschnitt- und Multiphasenstudien. Zur Durchführung der Analyse der somit gewonnenen Daten wird ein Anteil fehlerhafter Bauteile von mindestens 5 % benötigt (HIELSCHER 2008). Angewendet wird die Vorgehensweise auf die Fertigung elektronischer Steuerrechner und Sensoren.

### 2.4.5 Fazit

Zur Erreichung der Zielsetzung dieser Arbeit weisen die bestehenden Ansätze zur qualitätsorientierten Analyse fertigungstechnischer Prozessketten einige Defizite auf. Diese Defizite werden im Folgenden anhand allgemeiner und spezieller Bewertungskriterien dargestellt. Die Kriterien resultieren aus der Zielsetzung im dargelegten Untersuchungsgebiet und münden in Kapitel 3 in die Definition der Anforderungen an die zu konzipierende Methodik. In Abbildung 5 werden die in den vorhergehenden Abschnitten vorgestellten Arbeiten im Überblick bewertet.

- *Eignung für komplexe Prozessketten:* Kein Forschungsansatz ist geeignet, komplexe Prozessketten zu modellieren und deren Produktionsanlauf abzubilden. Keine der bekannten Vorgehensweisen zur Analyse fertigungstechnischer Prozessketten wurde an einem Anwendungsfall mit einer heterogenen Prozesskette validiert, welche verfahrens-, fertigungs- und montagetechnische Prozesse abdeckt. Insbesondere findet auch keine Betrachtung von fertig montierten funktionalen Baugruppen und Produkten statt, wodurch die in Abschnitt 2.2.4 dargestellte besondere Komplexität der Montage nicht adressiert wird.
- *Eignung für den Produktionsanlauf von Prozessketten:* In den jüngeren Veröffentlichungen ist eine Tendenz zur Analyse großer Datenmengen aus feldorientierten Untersuchungen (SCHÄFER 2003, HASENER 2004 und HIELSCHER 2008) festzustellen. Dies spiegelt sich im aktuellen Trend zur Analyse großer Datenmengen wider, der zusammen mit der Herausforderung vielfältiger Datenquellen als *Big Data* bezeichnet wird (KETTNER 2013). Dabei kann die Identifikation von Einflussfaktoren und Abhängigkeiten auf die Produktqualität aus umfangreichen Qualitätsdaten mit Hilfe von Data-Mining-Ansätzen erfolgen. In Anbetracht der anfangs dargestellten Trends zu kürzeren Produkt-

lebenszyklen sowie den damit einhergehenden, häufigeren Produktionsanläufen von Prozessketten sind feldorientierte Analysen jedoch nicht zielführend. Zur Gewinnung des notwendigen Datenumfangs ist im Allgemeinen eine Prozesskette erforderlich, welche bereits im Zustand der Serienproduktion betrieben wird.

Legende	spezielle Kriterien							allgemeine Kriterien			
Der Forschungsansatz erfüllt die Anforderung... <div><div></div> nicht</div> <div><div></div> kaum</div> <div><div></div> teilweise</div> <div><div></div> gut</div> <div><div></div> nahezu vollständig</div>	Eignung für komplexe Prozessketten	Eignung für den Produktionsanlauf von Prozessketten	methodische Erfassung der Prozesskettenstruktur	prozessübergreifende Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge	indirekte Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge	qualitative Ursache-Wirkungs-Analyse methodisch unterstützt	quantitative Ursache-Wirkungs-Analyse methodisch unterstützt	Anwendbarkeit	Praxistauglichkeit	Transparenz	Übertragbarkeit
BOURDON (1994)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
HARTUNG (1994)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
WENGLER (1996)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
MAYERS (1997)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
MOLITOR (1997)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
ZAPP (1998)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
JUNG (2000)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
STEINS (2000)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
RYZKO (2001)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
EICHGRÜN (2003)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
SCHÄFER (2003)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
BETTIN (2004)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
HASENER (2004)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
HIELSCHER (2008)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
GROßMANN ET AL. (2012A)	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>

Abbildung 5: Bewertung der Ansätze zur Analyse fertigungstechnischer Prozessketten

- *methodische Erfassung der Prozesskettenstruktur*: Im Rahmen der deduktiv-qualitativen Untersuchungen wird i. d. R. auf Expertenwissen zurückgegriffen. Es fehlt ein methodischer Ansatz, der eine effiziente und bzgl. der Analyseziele ausgerichtete Akquisition von Expertenwissen für komplexe Prozessketten ermöglicht.
- *prozessübergreifende Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge*: Die existierenden Ansätze zur deduktiv-qualitativen Untersuchung von Prozessketten gliedern sich im Wesentlichen in zwei Gruppen: HoQ-basierte und einflussmatrizenbasierte Ansätze. Erstere werden vorwiegend zur Ableitung von Zwischenproduktmerkmalen aus übergeordneten Produkthanforderungen verwendet. Diese führen zu einer starken Ausrichtung der Prozesskettenanalyse an den Zielgrößen der Produktentwicklung. Zweitere stellen die Wechselwirkungen zwischen Einflussgrößen und die Wirkungen von Einflussgrößen auf eine Zielgröße dar. Es ist kein Ansatz bekannt, der eine prozessübergreifende Bewertung der Wirkungen und Wechselwirkungen auf mehrere Zielgrößen erlaubt.
- *Indirekte Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge* werden nicht berücksichtigt. Diese sind wesentlich zur Abschätzung der Auswirkungen mehrstufiger, prozessübergreifender Zusammenhänge.
- *methodische Unterstützung der qualitativen und quantitativen Ursache-Wirkungs-Analyse*: Zur Vorbereitung induktiver Untersuchungen werden in einigen Ansätzen heuristische Analysen vorgeschaltet, um Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge qualitativ zu beschreiben. Hierzu wird teilweise auf unterstützende Methoden aus dem QM verwiesen oder zurückgegriffen. Jedoch ist kein Ansatz bekannt, der eine durchgängige qualitative und quantitative Analyse der gesamten Prozesskette ermöglicht. Zum einen sind die heuristischen Untersuchungen i. d. R. auf einzelne Prozesse oder kurze Prozesskettenabschnitte beschränkt. Zum anderen werden diese Werkzeuge nicht oder nur in geringem Umfang methodisch verknüpft. Des Weiteren erfolgt in den meisten Fällen keine Rückführung der induktiv erlangten Erkenntnisse in die deduktiven Analyseschritte, sodass die verschiedenen Informationsstände weder validiert werden noch für weitere empirische Untersuchungen zur Verfügung stehen.

## 2.5 Komplexitätsmanagement

### 2.5.1 Prinzipien zur Komplexitätsbeherrschung

THE INTERNATIONAL ACADEMY OF PRODUCTION ENGINEERING (2013) definiert *Komplexitätsmanagement* als “holistic approach to avoid, reduce, or control complexity in all relevant fields of enterprises to maximize the costumers’ benefit that arises from it”. Ansätze des Komplexitätsmanagements stammen vorwiegend aus der Produktentwicklung (LINDEMANN ET AL. 2009) und gehen häufig mit dem Themenbereich des Variantenmanagements einher (MAURER 2007).

Aus dem Blickwinkel der Betriebswirtschaftslehre nennt REIB (1993B) vier Maßnahmen zur Beherrschung von Komplexität: *Dimensionieren*, *Differenzieren*, *Spezifizieren* und *Stabilisieren*. *Dimensionieren* zielt auf die Anzahl der Systemelemente und -relationen und damit die Komplexitätsdimension *Vielzahl* ab. Auf der Seite der Elemente kann eine Redimensionierung durch *Erweiterung* oder *Bereinigung* erfolgen. Letztere gliedert sich in Maßnahmen der Konzentration bzw. Reduktion, welche entweder durch eine nicht selektive Dezimierung von Systemelementen oder durch eine fokussierte Selektion, bspw. durch Priorisierung, erfolgen kann. Darüber hinaus können durch *Klassenbildung* (bspw. Sortieren oder Gruppieren) und durch *Komplexbildung* (bspw. Konfigurieren oder Prozessbildung) Systemelemente aggregiert werden und dadurch die Anzahl der zu betrachtenden Elemente reduziert werden. Auf Seite der Relationen können Maßnahmen der *Entkopplung* (bspw. Modularisierung) oder *Kopplung* (bspw. verstärkte Zusammenarbeit von Geschäftsbereichen) zum Einsatz kommen. Komplexitätsmanagement durch *Differenzieren* versucht die *Vielfalt* des betrachteten Systems zu beherrschen und gliedert sich in Maßnahmen zur *Diversifizierung* (bspw. bewusste Interdisziplinarität und Variantenvielfalt) und zur *Homogenisierung* (bspw. durch Standardisierung). *Spezifizieren* adressiert die Komplexitätsdimension *Vieldeutigkeit*. Dabei kann sowohl eine bewusste Variation (bspw. Förderung der Lernfähigkeit eines Systems) als auch eine Determinierung erfolgen. Im Falle der Determinierung werden Freiheitsgrade des Systems eingeschränkt, bspw. bei Systemanalysen unter Anwendung des Ceteris-Paribus-Prinzips (siehe Abschnitt 2.4.1) durch Konstanthalten von eigentlich variablen Größen. Darüber hinaus können durch gezielte Disziplinierungsmaßnahmen Abhängigkeiten konkretisiert und Unschärfen beseitigt werden, bspw. durch eine Zuweisung von Aufgaben zu Ressourcen und eine Funktionstrennung statt einer Funktionsintegration. Die *Stabilisierung* von komplexen Systemen zielt auf das Zeitverhalten und damit die *Veränderlichkeit* ab. Stabilisierung kann durch gezielte Dynamisierungsmaßnahmen (Rüstzeitverkürzung

und Auftragsabwicklung in Kleinserien) und Verstetigungsaktivitäten (bspw. Mindesttaktzeiten und geringe Fluktuation) zur Beherrschung der Komplexität beitragen.

MAURER (2007) führt drei Prinzipien des Komplexitätsmanagements mit Fokus auf die Produktentwicklung an. Erstens ist die vollständige *Akquisition und Bewertung* der Systemelemente und -relationen in Bezug zu den Untersuchungszielen eine Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Komplexitätsmanagement. Zur Modellierung werden häufig matrixbasierte Ansätze verwendet, welche im Falle umfangreicher Systeme für den Anwender schnell unübersichtlich werden und dadurch die Qualität des Modells beeinträchtigen. Zweitens kann mit Hilfe der *Vermeidung und Reduktion* die Systemkomplexität durch das Eliminieren von nicht funktionsrelevanten Systembestandteilen beherrschbar gemacht werden. Als drittes Prinzip wird der bewusste Umgang mit Komplexität als Wettbewerbsvorteil genannt. Beispielhafte Werkzeuge hierfür sind systematische Problemlösungsansätze, die Reduktion von Schnittstellen und das sog. *piecemeal engineering*, bei dem das System durch kleine, reversible Veränderungen untersucht wird.

### 2.5.2 Werkzeuge des Komplexitätsmanagements

Die wichtigsten Werkzeuge des Komplexitätsmanagements werden in MAURER (2007) und KREIMEYER (2010) ausführlich beschrieben und hier auszugsweise vorgestellt. Der Fokus liegt entsprechend der in Kapitel 3 aufgezeigten Anforderungen auf der Graphentheorie und den matrixbasierten Methoden.

Das *Systems Engineering* ist eine wichtige Methodik zur Entwicklung von Systemen (SCHÄFER 2003 und MAURER 2007). Das *Vorgehen vom Groben zum Detail*, das *Denken in Varianten*, die *Phasengliederung von Projekten* und die *Lösungsfindung durch Problemlösungszyklen* stellen grundlegende Handlungsprinzipien im Zusammenhang mit komplexen Systemen dar (BÜCHEL & DAENZER 1989).

*Operations Research* (dt. Unternehmensforschung) ist eine weitere Methodensammlung, welche sich vorwiegend der mathematischen Optimierung von und Entscheidungsfindung für ablauf- und planungstheoretische Fragestellungen in Unternehmen widmet, bspw. Transport- und Umladeprobleme aus der Logistik (ZIMMERMANN 2008). Hierbei kommen u. a. Methoden der linearen und nichtlinearen Optimierung sowie der Spiel-, Entscheidungs-, Warteschlangen- und Graphentheorie zum Einsatz. Zur Anwendung der Methoden des Operation Research sind quantitative Daten oder funktionale Zusammenhänge notwendig (MAURER 2007).

Des Weiteren stellt *System Dynamics* eine Methodik zur Simulation des Verhaltens komplexer, dynamischer Systeme mit geschlossenen Wirkungsketten (engl. feedback loops) dar. Die Anwendungsschwerpunkte liegen im sozio-ökonomischen Bereich. Die Modellierung und die Simulation können qualitativ und quantitativ durchgeführt werden (COYLE 2000), wobei die zu modellierenden Zusammenhänge bekannt sein müssen. Die verwendeten Einflussdiagramme werden bei umfangreichen Systemen unübersichtlich (MAURER 2007).

Die *Graphentheorie* liefert die mathematischen Grundlagen zur Systembeschreibung und -analyse von beliebigen Netzwerken (KREIMEYER 2010). Graphen werden in den unterschiedlichsten Anwendungsfällen eingesetzt, bspw. in der Produktionstechnik bei der Suche nach der kürzesten Gesamtrüstzeit mehrerer Fertigungsaufträge und in der Informationstechnik in Suchmaschinen für Webseiten (TURAU 2009). Ein Graph  $G = (N, E)$  besteht aus einer Menge von Punkten  $N$ , auch als *Knoten* bezeichnet, einer Menge von Kanten  $E$  und der Information, welche Knoten über Kanten miteinander verbunden sind. In der praktischen Anwendung sind die Knoten und Kanten eines Graphen mit einer physikalischen Interpretation zu verknüpfen (GROSS & YELLEN 2006). Die Kanten können dabei gerichtet oder ungerichtet und mit Werten gewichtet sein. Zur Analyse mit Hilfe von Algorithmen wird eine zweckmäßige Datenstruktur der Graphen benötigt. Hierfür bieten sich verschiedene Möglichkeiten an, u. a. Adjazenzmatrizen, Adjazenzlisten und Kantentabellen (LÄUCHLI 1991). Die Adjazenzmatrix eines Graphen ist eine  $n \times n$  Matrix, wobei  $n$  der Anzahl an Systemknoten entspricht. Einträge in der Matrix bilden die Kanten ab (siehe Abbildung 6). Ein *Weg* oder *Pfad* (engl. *path*) ist Teil eines Graphen und besitzt eine bestimmte Knoten- und Kantenmenge (TITTMANN 2003). Mit der algorithmenbasierten Berechnung von Pfaden stellt die Graphentheorie eine vielversprechende Option zur Berechnung von prozessübergreifenden, gewichteten Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen in fertigungstechnischen Prozessketten dar.



Abbildung 6: Gerichteter Graph und seine Adjazenzmatrix in Anlehnung an LÄUCHLI (1991)

*Matrizen* sind im Komplexitätsmanagement weit verbreitet und eignen sich zur Darstellung von Verbindungen zwischen Systemelementen (YASSINE ET AL. 2003). Von



LINDEMANN ET AL. (2009) werden matrixbasierte Ansätze des Komplexitätsmanagements und damit verbundene Strukturanalysen der betrachteten Systeme als *Strukturelles Komplexitätsmanagement* bezeichnet. MAURER (2007) unterscheidet zwischen Intra-Domain, Inter-Domain, kombinierten Intra- und Inter-Domain Matrizen und Multiple-Domain Matrizen (MDM). In diesem Zusammenhang wird unter dem Begriff *Domäne* (engl. Domain) eine Gruppe von Systemelementen verstanden, welche das gleiche primäre Klassifizierungsmerkmal aufweisen. Die Intra-Domain Matrix wird von STEWARD (1981) auch als Design Structure Matrix (DSM) bezeichnet und zur Untersuchung von Rückkopplungsschleifen im Produktentwicklungsprozess verwendet. BROWNING (2001) definiert eine DSM als eine quadratische Matrix mit symmetrischen Zeilen- und Spaltenbedeutungen, welche die Beziehungen von Elementen einer Domäne untereinander aufzeigt (siehe Abbildung 7 links). Die im Zusammenhang mit Graphen eingeführte Adjazenzmatrix entspricht nach KREIMEYER (2010) einer DSM, wobei die Knoten eines Graphen den Systemelementen der Matrizen entsprechen. Nach DANILOVIC & BROWNING (2007) stellt die Inter-Domain Matrix, auch als Domain Mapping Matrix (DMM) bezeichnet, die Beziehungen zwischen Elementen aus unterschiedlichen Domänen dar, welche den Zeilen und Spalten der Matrix zugeordnet sind (siehe Abbildung 7 rechts).

	Element A1	Element A2	Element A3	Element A4	Element A5
Element A1				X	X
Element A2					
Element A3					
Element A4	X				
Element A5		X	X		

	Element B1	Element B2	Element B3	Element B4	Element B5	Element B6
Element A1	X					
Element A2		X				
Element A3		X	X		X	X
Element A4						
Element A5	X					X

Abbildung 7: Beispielhafte binäre DSM (links) und DMM (rechts)

Durch eine kombinierte Anwendung von DSM und DMM können sowohl die Beziehungen zwischen Elementen verschiedener Domänen als auch die Wechselwirkungen innerhalb einer Domäne betrachtet werden. Beispielsweise verwendet LINDEMANN (2009) DSM und DMM zur Strukturierung von Problemen im Produktentwicklungsprozess.

Die Weiterentwicklung der kombinierten Anwendung von Intra- und Inter-Domain Matrizen zu einem generischen Ansatz bezeichnet MAURER (2007) als MDM. Eine

MDM kann als eine DSM aufgefasst werden, welche aus kleineren DSM auf der Diagonalen und DMM außerhalb der Diagonalen aufgebaut ist (siehe Abbildung 8). Da eine DSM einer Adjazenzmatrix entspricht, kann auch eine MDM durch Graphen dargestellt werden. Als Nachteil der MDM-Modellierung nennen KÖNIG ET AL. (2008) die mit der Anzahl der Systemelemente schnell zunehmenden Matrizendimensionen, die begrenzte Lesbarkeit vor allem bei großen Matrizen und die fehlende grafische Struktur, bspw. gegenüber Flussdiagrammen.

		A			B				C		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	1	<b>DSM<sub>A</sub></b>			<b>DMM<sub>A-B</sub></b>				<b>DMM<sub>A-C</sub></b>		
	2										
	3										
B	4	<b>DMM<sub>B-A</sub></b>			<b>DSM<sub>B</sub></b>				<b>DMM<sub>B-C</sub></b>		
	5										
	6										
	7										
C	8	<b>DMM<sub>C-A</sub></b>			<b>DMM<sub>C-B</sub></b>				<b>DSM<sub>C</sub></b>		
	9										
	10										

Abbildung 8: Aufbau einer MDM mit den Domänen A, B und C in Anlehnung an MAURER (2007)

Durch die Integration mehrerer Domänen in eine MDM ist es möglich, auf Basis der direkten Zusammenhänge zwischen den Systemelementen auch die indirekten Zusammenhänge zu ermitteln. Zur Berechnung indirekter Zusammenhänge zwischen Elementen einer DSM mit den Informationen in einer DMM stellt MAURER (2007) sechs verschiedene Fälle vor (siehe Abbildung 9). In den Fällen eins bis drei sind zwei Elemente einer Domäne über ein weiteres Element einer anderen Domäne verbunden. In den Fällen vier bis sechs beruht der indirekte Zusammenhang auf einem Zusammenhang zweier Elemente einer anderen Domäne.

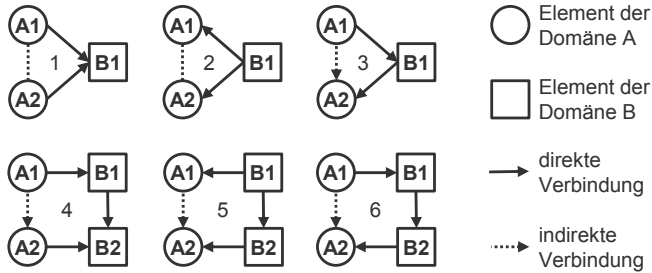


Abbildung 9: Fallunterscheidung zur Berechnung indirekter Verbindungen in einer MDM in Anlehnung an MAURER (2007)

Die Kenntnis der indirekten Zusammenhänge ermöglicht vorwärts- und rückwärtsorientierte Analysen von Ursache-Wirkungs-Ketten. Eine *Vorwärtsanalyse* stellt ausgehend von einem spezifischen Systemknoten als Ursache alle davon ausgehenden Wirkungen dar. Von HUB (1994) wird hierzu der Begriff *Analyse der Wirkungsausbreitung* verwendet und MAURER (2007) spricht von einer *feed-forward-analysis*. Demgegenüber liefert eine *Rückwärtsanalyse* alle direkten und indirekten Ursachen, welche auf das betrachtete Systemelement wirken (HUB 1994). Die Rückwärtsanalyse wird von MAURER (2007) auch als *trace-back-analysis* bezeichnet. Eine weitere wichtige Analysemöglichkeit von DSM sind die *Aktiv-* und *Passivsummen* der Systemelemente. Die Aktivsumme addiert die Anzahl bzw. die Stärke der Verbindungen, welche von einem Knoten bzw. Element ausgehen. Die Passivsumme gibt die Anzahl bzw. die Stärke der Verbindungen an, welche zu einem Knoten führen. Dementsprechend werden Elemente, welche auf viele andere Elemente wirken bzw. stark auf andere Elemente wirken, als *aktiv* bezeichnet. Stark beeinflusste Elemente werden als *passiv* bezeichnet (MAURER 2007). Darüber hinaus stellt MAURER (2007) eine umfangreiche Zusammenfassung weiterer Analysemethoden für Matrizen bereit. Nach EPPINGER & BROWNING (2012) gibt es noch großen Forschungsbedarf insbesondere bzgl. ganzheitlicher Analysemethoden für Matrizen des Komplexitätsmanagements.

BIEDERMANN & LINDEMANN (2008) übertragen die Ansätze zur Berechnung von rekursiven Schleifen im Produktentwicklungsprozess, sog. Kreisschlüssen, mit Hilfe von Matrixmultiplikationen auf eine MDM mit drei Domänen. YASSINE ET AL. (2003) berechnen im Rahmen der als *Connectivity Maps* bezeichneten Methode indirekte Verbindungen zweier DMM ebenfalls mit Matrixmultiplikation. Die Verknüpfung zweier DSM mit einer DMM kommt auch in der Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix nach PULS (2002) zum Tragen. Darüber hinaus kann das aus dem QM

bekannte HoQ als MDM interpretiert werden (MAURER 2007). Dabei stellt die dreiecksförmige Dachmatrix des HoQ eine DSM dar, in welcher die Abhängigkeiten von Elementen einer Domäne untereinander abgebildet werden. Die Matrizen zur Ableitung von Produkt- und Prozessanforderungen aus den Kundenwünschen sind als DMM aufzufassen. Der gegenüber einer vollständigen MDM reduzierte Umfang des HoQ führt zu dem, dass in der Dachmatrix nur ungerichtete Zusammenhänge zwischen gleichen Elementen abgebildet werden können (MAURER 2007), und zum anderen können aufgrund der eingeschränkten Anzahl an DMM nicht alle Inter-Domain-Zusammenhänge berücksichtigt werden.

Zur Analyse großer Netzwerke können auch Werkzeuge der *Netzwerktheorie* eingesetzt werden. Gegenüber der Graphentheorie, bei der die Analyse spezifischer Knoten und Kanten im Vordergrund steht, ist in der Netzwerktheorie die Analyse globaler Eigenschaften ganzer Netzwerke teils mit statistischen Methoden im Fokus (KREIMEYER 2010). Die untersuchten Netzwerke sind i. d. R. sozialer (bspw. die Organisationsstruktur eines Konzerns), informationstechnischer (bspw. das Internet), technologischer (bspw. das Telefonnetz) oder biologischer Art (bspw. die Nahrungsmittelkette) (KREIMEYER 2010). Eine Übersicht zum Stand der Technik in der Netzwerktheorie wird u. a. in NEWMAN (2003) gegeben.

### 2.5.3 Anwendung des Strukturellen Komplexitätsmanagements

Die Methoden des matrizenbasierten Komplexitätsmanagements werden vorwiegend in der Produktentwicklung angewendet. Ein Beispiel ist der Ansatz von GÄRTNER ET AL. (2008) zur Darstellung der Auswirkungen von Produktanpassungen auf die Kosten und die Dauer des Entwicklungsprozesses. Dazu wird ein *rework vector* definiert, der sich aus einer Produkt-DSM und einer Prozess-Produkt-DMM berechnen lässt und die Prozessaktivitäten angibt, welche für die Produktanpassung durchlaufen werden müssen. Des Weiteren stellt DE WECK (2007) Veränderungen in einem System, z. B. aufgrund der Verwendung neuer Technologien, mittels einer sog. Delta-DSM dar. In Verbindung mit der ursprünglichen DSM des Systems lässt sich durch Matrixaddition die DSM des veränderten Systems berechnen.

HELTEN ET AL. (2010) wendet MDM an, um Produkt- und Produktionskonzepte auf verschiedenen Abstraktionsstufen zu modellieren und Verbindungen zu entdecken. Durch die MDM-basierte Analyse können Unterschiede zwischen Produktionskonzepten und deren Einfluss auf die Produktgestaltung aufgezeigt werden. Die Bewertung der alternativen Produktionskonzepte findet aufgrund der frühen Planungsphase

auf einem abstrakten Niveau statt. MAISENBACHER ET AL. (2012) analysiert den Einfluss der Schweißreihenfolge auf den Schweißverzug von Bauteilen mit Hilfe einer MDM. Die Analyse beginnt mit einer Informationsakquise auf Basis einer Literaturrecherche, woraus sowohl die Elemente einer initialen DSM identifiziert als auch deren Zusammenhänge in die DSM eingetragen werden können. Durch die Definition von Domänen, wie z. B. *Geometrie* und *Prozessparameter*, entsteht eine MDM. Diese MDM wird in mehreren Schritten um fehlende Zusammenhänge ergänzt, um unbedeutende Zusammenhänge reduziert und durch Redefinition von Domänen umstrukturiert. Neben einer Visualisierung der direkten und indirekten Zusammenhänge bis zur dritten Stufe werden die theoretisch wichtigsten Ursache-Wirkungs-Ketten zwischen der Schweißreihenfolge und dem Verzug dargestellt. Diese Anwendung der MDM beschränkt sich auf einen einzelnen Fertigungsprozess und zeigt keine methodische Vorgehensweise zur Informationsakquise im Rahmen einer deduktiven Prozessanalyse auf. FAROOQ ET AL. (2013) beschreiben die Anwendung einer DSM zur Fehleranalyse in der Prozesskette zur Herstellung von Sprühdosen. In der als *Non Conformity Matrix (NCM)* bezeichneten DSM werden Qualitätsabweichungen der Zwischenprodukteigenschaften entlang des Herstellungsprozesses abgebildet. Übergeordnete Ziele sind die Reduzierung der Komplexität, die Identifikation kritischer Herstellungsprozesse und die Verbesserung der Qualität der Fertigprodukte. FAROOQ ET AL. (2013) stellen hierzu ein Vorgehen in zehn Stufen bereit. Dieses umfasst die Informationsakquise, den Aufbau der NCM, die Analyse der Matrixstruktur und der Abhängigkeiten, die Identifizierung kritischer Herstellungsprozesse und deren empirische Analyse. Umgesetzte Verbesserungen am Herstellungsprozess werden abschließend in die NCM übertragen. Dabei wird die methodische Verknüpfung der NCM mit der Versuchsplanung und der Rückführung der Erkenntnisse nicht erklärt. FAROOQ ET AL. (2014) bilden das im Unternehmen vorhandene Expertenwissen in mehreren Stufen in der in FAROOQ ET AL. (2013) beschriebenen NCM ab. Dabei werden die Prozesse jeweils in eigenen Domänen abgebildet und anschließend domänenspezifische und domänenübergreifende Abhängigkeiten zwischen den Qualitätsabweichungen identifiziert. Die Durchführung der Informationsakquise und der daraus resultierende Aufbau der NCM werden nicht betrachtet.

Darüber hinaus können aufgrund der Analogie zwischen MDM und dem HoQ des QFD auch die in Abschnitt 2.4 bereits genannten Ansätze von HARTUNG (1994) und WENGLER (1996) als Beispiele für die Anwendung matrixbasierter Methoden des Komplexitätsmanagements angeführt werden. Des Weiteren kann die Einfluss-Wirkungsmatrix von SCHÄFER (2003) als DMM interpretiert werden.

### 2.5.4 Fazit

In der industriellen Praxis und insbesondere in der Forschung existieren eine Vielzahl von Methoden und umfangreichen Theorien zur Beherrschung komplexer Systeme. Im Kontext der Entwicklung technischer Produkte haben sich im letzten Jahrzehnt matrixbasierte Methoden des Strukturellen Komplexitätsmanagements etabliert. Bislang wurden diese Methoden nicht vollumfänglich auf komplexe, fertigungstechnische Fragestellungen übertragen. Es ist kein Ansatz bekannt, der eine MDM zur Analyse der Ursache-Wirkungs-Beziehungen in fertigungstechnischen Prozessketten anwendet. Lediglich die HoQ-Matrizen, welche eine vereinfachte Form einer MDM darstellen, kommen zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Elementen der Domänen Qualitätsmerkmale, Zwischenproduktmerkmale und Prozessparameter zum Einsatz, ohne den sequentiellen Charakter fertigungstechnischer Prozessketten zu modellieren. Mit Hilfe mehrerer aneinandergereihter HoQ-Matrizen wäre die Modellierung von Prozessketten denkbar. Prinzipiell ermöglichen HoQ-basierte Prozesskettenmodelle auch die Berechnung indirekter Ursache-Wirkungs-Ketten, jedoch können diese nicht in der im HoQ enthaltenen DMM dokumentiert werden. Aus eben diesem Grund können im HoQ prozessübergreifende, direkte Ursache-Wirkungs-Beziehungen nicht modelliert werden.

Das Wissen zum Aufbau der Matrizen des strukturellen Komplexitätsmanagements wird häufig mit Hilfe von Literaturrecherchen oder Experten akquiriert. MAURER (2007) beschreibt eine Vorgehensweise zur Wissensakquise und Systemmodellierung in mehreren Schritten. Zunächst erfolgt die Definition der Systemstruktur unter Einbeziehung existierender Informationsquellen, wie bspw. Stücklisten, und Kreativitätstechniken, bspw. Mind-Mapping und Brain-Storming. Im zweiten Schritt werden die Systemelemente in Domänen klassifiziert und die MDM aufgebaut. Anschließend erfolgt eine weitere Informationsakquise mit dem Ziel, die Zusammenhänge zwischen den Systemelementen zeilen- oder spaltenweise in die MDM einzutragen. Darüber hinaus ist kein Ansatz bekannt, welcher zielgerichtet Wissen für die Weiterverarbeitung in den Matrizen des Komplexitätsmanagements erfasst. Bei komplexen Systemen besteht insbesondere Unterstützungsbedarf für die aufwendige Bewertung der zahlreichen Zusammenhänge zwischen den Systemelementen. Laut KREIMEYER (2010) ist eine große Herausforderung der heuristischen Systemmodellierung die Konsolidierung unterschiedlicher Meinungen, welche es zu lösen gilt.

Die in Abschnitt 2.5.1 dargestellten, allgemeinen Prinzipien des Komplexitätsmanagements sind bzgl. der Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten nicht

oder nur auszugsweise umgesetzt. Forschungsbedarf besteht zur Selektion qualitätsrelevanter Ursache-Wirkungs-Beziehungen durch methodische Priorisierung sowie zur systematischen und physikalisch vertretbaren Determinierung komplexer Systeme im Hinblick auf die Anwendung des Ceteris-Paribus-Prinzips. Zur Übertragung der Matrizen des strukturellen Komplexitätsmanagements auf fertigungstechnische Prozessketten gibt es keine Handlungsempfehlungen zur geeigneten Aggregation (Prinzip der Komplexbildung) fertigungstechnischer Prozesse und deren Gliederung in Domänen. Außerdem kann Aufklärungsbedarf zur gezielten kausalen Kopplung und Entkopplung von fertigungstechnischen Prozessen und Prozesskettenabschnitten hinsichtlich der Komplexitätsbeherrschung konstatiert werden.

## 2.6 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Auf Basis detaillierter Begriffsklärungen wurde das Untersuchungsgebiet der Arbeit dargelegt: Die Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten bzgl. der für die realisierte Beschaffenheit des Produktes relevanten Ursache-Wirkungs-Beziehungen. In diesem Rahmen wurden bestehende Vorarbeiten aus den Bereichen der Analyse fertigungstechnischer Prozessketten und des Komplexitätsmanagements sowie deren Werkzeuge und Methoden vorgestellt.

Die Gegenüberstellung der Zielsetzung und der existierenden Methoden nach dem Stand der Technik führt zu folgendem Handlungsbedarf:

- Die vollständige, methodische Berücksichtigung der Komplexitätsdimensionen fertigungstechnischer Prozessketten entsprechend der Definition in Abschnitt 2.2.4 und die Validierung der Analysemethodik anhand eines entsprechenden industrienahen Anwendungsfalls mit einem komplett montierten und funktionalen Produkt.
- Die methodische Unterstützung des Produktionsanlaufs komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten durch angepasste, qualitätsorientierte Analyseansätze.
- Die Übertragung und Spezifizierung der allgemeinen Prinzipien der Komplexitätsbeherrschung sowie der Methoden und Werkzeuge des Strukturellen Komplexitätsmanagements auf die Anforderungen der Modellierung und Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten.
- Die strukturierte Wissensakquisition und Verarbeitung unterschiedlicher Expertenmeinungen als Ausgangsbasis für die Anwendung der Methoden des Komplexitätsmanagements.

- Der Ausbau der Untersuchungsmethoden für die in komplexen, fertigungstechnischen Prozessketten existierenden langen Kausalketten, um die kognitiven Defizite des Menschen, welche oft zur Fixierung auf kurze und unverzweigte Kausalketten führen (STEINS 2000), auszugleichen.
- Der Ausbau der deduktiv-qualitativen Ansätze zur Prozesskettenanalyse bzgl. mehrerer Zielgrößen in Verbindung mit einer Quantifizierung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge.

Zusammenfassend bedarf es einer integralen Methodik zur zeit- und ressourceneffizienten, qualitätsorientierten Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten, welche die notwendigen Erkenntnisse in Form von quantifizierten, funktionalen Zusammenhängen zur nachgelagerten Führung und Optimierung der Prozesskette liefert.



## 3 Konzeption der Methodik

### 3.1 Allgemeines

In Kapitel 2 ist der Bedarf für eine Methodik zur qualitätsorientierten Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten aufgezeigt worden, welche es in diesem Kapitel zu konzipieren gilt. Die allgemeinen und speziellen Anforderungen in Abschnitt 3.2 stellen zusammen mit der Detaillierung des Betrachtungsumfangs, der Darstellung des Referenzmodells und der Spezifizierung der Systemgrenze die Grundlagen für die Konzeption der Methodik dar. Hierbei ist das reale System *fertigungstechnische Prozesskette* durch ein den Anforderungen gerechtes Modellsystem, einhergehend mit einer geeigneten Darstellungsform, abzubilden. Anschließend ist die grundlegende Vorgehensweise zum Aufbau der konzipierten Modelle zu erarbeiten.

### 3.2 Anforderungen an die Methodik

#### 3.2.1 Allgemeine Anforderungen

Eine Methodik, welche Mitarbeiter der technischen Planung und des betrieblichen Qualitätsmanagements unterstützen soll, muss einigen allgemeinen, vom speziellen Einsatzzweck unabhängigen Anforderungen gerecht werden.

**Anwendbarkeit:** Unter der Anwendbarkeit der Methodik werden ein systematischer Ablauf, die Reproduzierbarkeit des Vorgehens und der Analyseergebnisse sowie eine einfache Durchführbarkeit verstanden. Letztere äußert sich durch die Verständlichkeit der verwendeten Symbole und Begriffe (GROßMANN & WIEMER 2010), die Voraussetzung nur geringfügiger Methodenkenntnisse und den Einsatz bekannter Planungs- und Analyseverfahren.

**Praxistauglichkeit:** Die Praxistauglichkeit einer Methodik wird durch eine den Anwender unterstützende Strukturierung des zu untersuchenden Problems und die Verwendung etablierter Software-Werkzeuge erreicht. Darüber hinaus fördern ein angemessener Detaillierungsgrad der Ein- und Ausgaben der Methodik sowie ein geringer Umsetzungsaufwand den Einsatz in der Praxis.

**Übertragbarkeit:** Die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle, Unternehmen und Branchen wird durch die Allgemeingültigkeit und die Skalierbarkeit der verwendeten Methoden und Modellierungsvorschriften erreicht. Die zu betrachtenden Systemelemente und die qualitätsrelevanten Ursache-Wirkungs-Beziehungen sind für jedes Produkt und jede Prozesskette unterschiedlich. Dementsprechend ist es wichtig, die zu entwickelnde Methodik durch einen im Rahmen der Definition fertigungstechnischer Prozessketten allgemeingültigen Aufbau übertragbar zu gestalten. Skalierbarkeit wird durch die Möglichkeit zur Anpassung bzw. Erweiterung der verwendeten Modelle, Werkzeuge und Berechnungsvorschriften bzgl. der Anzahl der Systemelemente und deren Zusammenhänge sichergestellt.

**Transparenz:** Der Nutzen der Methodik erhöht sich durch eine hohe Transparenz der Vorgehensweise und der Modelle. Daher ist der Methodenablauf für den Anwender leicht nachvollziehbar und die Darstellung der Modelle möglichst übersichtlich zu gestalten.

**Pragmatische Modellierung:** Im Rahmen der Methodik kommen Modelle zur Beschreibung realer, fertigungstechnischer Prozessketten zum Einsatz, welche grundlegenden Anforderungen genügen müssen (WENGLER 1996 und MELING 2012):

- Die Abbildung der zu modellierenden Prozesskette durch eine Überführung der Merkmale des Originalsystems in Modellmerkmale.
- Die Vereinfachung des Originalsystems durch Beschränkung auf Elemente und Zusammenhänge, welche für den Modellierungszweck relevant sind.
- Die pragmatische Ausführung des Modells im Sinne der Zielsetzung.

#### 3.2.2 Spezielle Anforderungen

Zum Erreichen der Zielsetzung müssen von der zu konzipierenden Methodik spezielle Anforderungen erfüllt werden. Diese gliedern sich in die gesamte Methodik betreffende, globale Anforderungen und Anforderungen, welche den in Abschnitt 1.2 formulierten Forschungsfragen zugeordnet werden können.

**Eignung für komplexe Prozessketten:** Entsprechend der Zielsetzung soll die Methodik in besonderem Maß auf die Komplexität von fertigungstechnischen Prozessketten eingehen. Die Eignung hierfür wird mit den folgenden Kriterien bewertet:

- Behandlung unterschiedlicher Prozessarten
- Modellierung und Untersuchung einer Vielzahl von Systemelementen und Ursache-Wirkungs-Beziehungen

- Umgang mit einem hohen Grad an Unkenntnis von Ursache-Wirkungs-Beziehungen in der Prozesskette
- Berücksichtigung nichtlinearer, wechselwirkender und zeitabhängiger Ursache-Wirkungs-Beziehungen

**Durchgängigkeit des Erkenntnisprozesses:** In Anbetracht der Komplexität der zu untersuchenden Prozesskette ist der Erkenntnisprozess, von ersten unscharfen Annahmen bis zu quantifizierten Ursache-Wirkungs-Beziehungen, durchgängig methodisch zu unterstützen. Ein besonderes Augenmerk ist auf die Gestaltung der Schnittstellen zwischen den Lösungsbausteinen der Methodik zu legen, welche geeignet für eine rechnergestützte Automatisierung des Gesamtablaufs zu beschreiben sind.

**Vollständigkeit der Modellierung:** Zur Sicherstellung valider qualitativer und quantitativer Analysen muss eine vollständige Modellierung der zu untersuchenden Prozesskette erfolgen. Hierzu gehören neben den verfahrens-, fertigungs- und montagetechnischen Prozessen auch alle potentiell qualitätsbeeinflussenden Transport- und Lagerprozesse (GROßMANN & WIEMER 2010).

**Unterstützung der menschlichen Kognition:** Die Methodik muss den Defiziten des menschlichen Denkvermögens beim Umgang mit komplexen Systemen (WENGLER 1996 und STEINS 2000) mit Hilfe einer strukturierten Wissensakquisition und -organisation, geeigneten Darstellungsformen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen und der Bereitstellung aufgabenspezifischer Entscheidungsgrundlagen begegnen.

**Eignung für kleine und unsichere Wissensbasis:** Für die Anwendung auf neue Prozessketten, zu welchen im Allgemeinen und im speziellen Unternehmen kein oder nur wenig Wissen vorliegt, ist die Methodik so zu gestalten, dass ausgehend von einer kleinen und unsicheren Wissensbasis erfolgreich Analyseergebnisse abgeleitet werden können. Dies kann durch Hilfestellungen bei der Prozesskettenmodellierung und durch eine lückenlose, systematische Akquisition der Ursache-Wirkungs-Beziehungen erfolgen. Insbesondere soll die Methodik nicht von einer laufenden Produktion abhängig sein, um die in der Zielsetzung geforderte Eignung für den Produktionsanlauf von Prozessketten zu gewährleisten.

**Umgang mit prozessübergreifenden und indirekten Ursache-Wirkungs-Beziehungen:** Zur Identifikation der Qualitätseinflüsse auf das Fertigprodukt einer komplexen Prozesskette sind prozessübergreifende und indirekte Ursache-Wirkungs-Beziehungen von essentieller Bedeutung. Folglich muss die Methodik Lösungen zur Modellierung, Berechnung, Darstellung, Analyse und Dokumentation dieser Beziehungsklassen bereitstellen.

**Kombinierte Betrachtung unterschiedlichen Wissens:** In Übereinstimmung mit WENGLER (1996) stellt die Lösungssuche zur Erreichung der Zielsetzung eine Kombination aus der Übertragung bekannter Zusammenhänge und der Entdeckung neuer Beziehungen dar. Ein deduktiv-qualitatives Analyseverfahren in Verbindung mit einer empirischen Analyse führt im Fortgang der Untersuchungen unter den Randbedingungen einer komplexen Prozesskette und eingeschränkter Analyseressourcen zwangsweise zu einem qualitativen und einem unvollständigen quantitativen Informationsstand. Daraus resultiert die Notwendigkeit zur kombinierten Betrachtung der qualitativen und quantitativen Informationen.

**Erkenntnisgewinn durch quantitative Systemanalyse:** Entsprechend der Zielsetzung sind die Analyseergebnisse der Methodik Grundlage für eine weitere Optimierung und Maßnahmen zur Führung der Prozesskette, bspw. zur Ableitung von Sollwerten und Toleranzvorgaben für die einzelnen Prozesse. In diesem Zusammenhang sind quantitative, funktionale Beschreibungen der Ursache-Wirkungs-Beziehungen unerlässlich. Diese sind in der Methodik durch einen quantitativen Analyseschritt zu identifizieren.

**Unterstützung der quantitativen Systemanalyse:** Die Durchführung von quantitativen Systemanalysen erfordert im Falle komplexer Prozessketten eine aufwendige und sorgfältige Planung. Die Methodik soll unter Verwendung der modellierten Ursache-Wirkungs-Beziehungen in der Prozesskette eine Planungsunterstützung für quantitative Systemanalysen bieten. Darüber hinaus sind Werkzeuge für eine nachvollziehbare Dokumentation der Analyseergebnisse vorzusehen.

**Deterministische Modellierung:** Nach WENGLER (1996) kann die Qualität eines Fertigproduktes einer Prozesskette mit stochastischem Systemverhalten nicht gewährleistet werden. Dementsprechend muss durch die Methodik eine deterministische Verhaltensbeschreibung erfolgen, welche bei gleichen Einflussgrößen gleiche Ausgangsgrößen bedingt.

**Reduktion auf das Wesentliche:** Über die allgemeinen Modellierungsanforderungen hinaus ist das Prozesskettenmodell für die quantitativen Analysen zur Verringerung des Umsetzungsaufwands auf die wesentlichen, qualitätsbestimmenden Systemelemente und Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu reduzieren.

Alle an die zu konzipierende Methodik gestellten Anforderungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

*Tabelle 2: Allgemeine und spezielle Anforderungen an die zu konzipierende Methodik*

Einordnung	Anforderung
allgemeine Anforderungen	Anwendbarkeit
	Praxistauglichkeit
	Übertragbarkeit
	Transparenz
	pragmatische Modellierung
globale Anforderungen	Eignung für komplexe Prozessketten
	Durchgängigkeit des Erkenntnisprozesses
	Vollständigkeit der Modellierung
	Unterstützung der menschlichen Kognition
Forschungsfrage 1 – Wissensakquisition	Eignung für kleine und unsichere Wissensbasis
Forschungsfrage 2 – Wissensinterpretation	Umgang mit prozessübergreifenden und indirekten Ursache-Wirkungs-Beziehungen
	kombinierte Betrachtung unterschiedlichen Wissens
Forschungsfrage 3 – Quantifizierung	Erkenntnisgewinn durch quantitative Systemanalyse
	Unterstützung der quantitativen Systemanalyse
	deterministische Modellierung
	Reduktion auf das Wesentliche

### 3.3 Betrachtungsumfang

Nach der Darlegung der Anforderungen an die zu erarbeitende Methodik wird an dieser Stelle auf die zu betrachtenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge eingegangen. Außerdem wird aufgezeigt, wie sich die Methodik in den Produktionsanlauf einer Prozesskette sowie in die Planungsphasen von Produktionssystemen einordnet.

#### 3.3.1 Relevante Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge

Die zu konzipierende Methodik soll den Anwender dazu befähigen, sämtliche Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den betrachteten Systemelementen fertigungstechnischer Prozessketten qualitativ abzubilden. Zur Reduktion des Untersuchungsaufwands ist die quantitative Analyse auf die unbekannten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zu beschränken. Dementsprechend sind bekannte Zusammenhänge und in der Produktentwicklung definierte Sollwerte als Zielvorgaben für die Produktion aufzugreifen und in der Planung der empirischen Analyse zu berücksichtigen

(WESTERMEIER ET AL. 2013). Eine Kategorisierung der Zusammenhänge bzgl. des Prozessbezugs und des Kenntnisstands ermöglicht eine Abgrenzung der für die quantitative Analyse relevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge entsprechend Abbildung 10. Das quantitative Analyseziel der zu gestaltenden Methodik sind prozessbezogene und prozessübergreifende Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge mit unbekanntem empirischen oder naturgesetzlichen Hintergrund bzw. Zusammenhänge, deren Aufwand zur quantitativen Deduktion aus bekannten Naturgesetzen die für die Analyse zur Verfügung stehenden Ressourcen übersteigt (rechte Spalte in Abbildung 10). Prozessübergreifende Zusammenhänge können sowohl Auswirkungen auf nachfolgende Prozesse und Zwischenprodukte als auch auf die Qualitätsmerkmale des Fertigproduktes besitzen. In Abbildung 10 sind Beispiele für diese Ursache-Wirkungs-Kategorien anhand des Prozesses Laserstrahlschneiden aufgeführt. Der Prozess Laserstrahlschneiden ist Bestandteil der Prozesskette zur Herstellung von Batteriezellen und dient dem Zuschnitt einzelner Elektroden aus dem Eingangsprodukt Elektrodenrolle. Durch diesen Prozess werden u. a. die Zwischenproduktmerkmale Geometrie der Elektroden und Breite der Wärmeeinflusszone in der Nähe des Schnittbereichs bestimmt. Beide Zwischenproduktmerkmale sind relevant für die Qualität der aus den Elektroden entstehenden Batteriezellen, jedoch ist der Stand der Erkenntnisse zu den jeweiligen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen unterschiedlich.

Ursache-Wirkungs-Zusammenhang		
	bekannt	unbekannt
prozess-bezogen	z. B. Zusammenhang zwischen der Schnittgeschwindigkeit und der Abweichung von der Soll-Elektrodengeometrie	z. B. Zusammenhang zwischen der Laserleistung und der Wärmeeinflusszone im Elektrodenrandbereich
prozess-übergreifend	z. B. Zusammenhang zwischen der Abweichung von der Soll-Elektrodengeometrie und der theoretischen Kapazität der Elektrode	z. B. Zusammenhang zwischen der Wärmeeinflusszone im Elektrodenrandbereich und der Zellkapazität sowie der Lebensdauer

Abbildung 10: Kategorisierung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in fertigungstechnischen Prozessketten anhand von Beispielen

### 3.3.2 Unterstützung des Produktionsanlaufs

Die zu konzipierende Methodik soll in besonderer Weise dem Produktionsanlauf eines Produktes gerecht werden, aber nicht darauf beschränkt sein. Ausgehend von ersten Erkenntnissen aus der Produktentwicklung und dem Prototypenbau soll die

Methodik den Produktentstehungsprozess über den Produktionsanlauf bis zur Serienproduktion begleiten. Dabei soll das Wissen zu qualitätsrelevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen zu jeder Phase aufgenommen werden und somit Nutzen für die Durchführung der nachfolgenden Phasen bringen. Insbesondere der Skalierung der Produktionssysteme mit Hilfe von Pilotlinien wie es u. a. in der Batterie- und der Halbleiterproduktion praktiziert wird (NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT 2012 und BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF) 2014) und den steigenden Stückzahlen im Produktionsanlauf ist Rechnung zu tragen (siehe Abbildung 11).

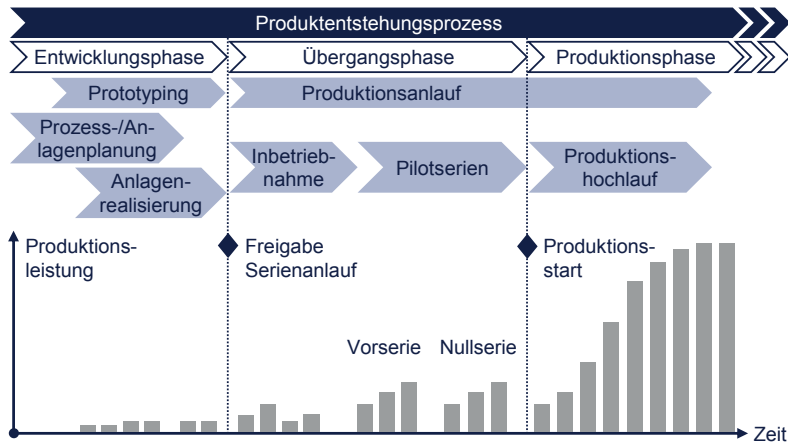


Abbildung 11: Einordnung des Produktionsanlaufs in den Produktentstehungsprozess in Anlehnung an RENNER (2012) mit idealtypischer Anlaufkurve in Anlehnung an FLEISCHER ET AL. (2005)

### 3.3.3 Interaktion mit den Planungsphasen von Produktionssystemen

Informationen über qualitätsrelevante Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge stellen einen wertvollen Beitrag für den Planungsprozess von Produktionssystemen dar. Folglich sollen zwischen der zu schaffenden Methodik und dem Planungs- sowie Realisierungsprozess der Anlagentechnik Informationen ausgetauscht werden. Hervorzuheben ist, dass die Methodik nicht in das Planungsvorgehen zur Prozesskettengestaltung eingreift, sondern Schnittstellen zum Informationsaustausch zwischen dem Planungsvorgehen und der qualitätsorientierten Prozesskettenanalyse zum gegenseitigen Nutzen vorgesehen werden. In Abbildung 12 ist der Informationsfluss zwischen der zu konzipierenden Methodik und einem beispielhaften Planungsvorgehen dargestellt.

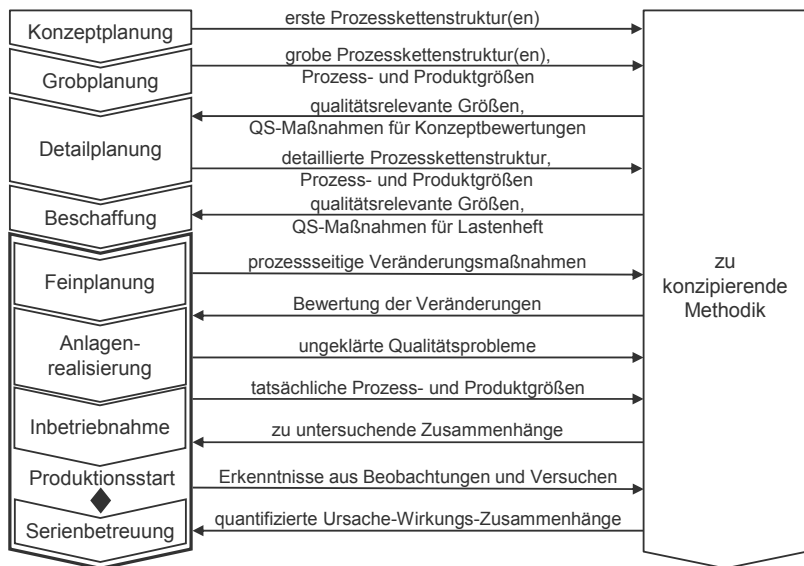


Abbildung 12: Informationsfluss zwischen den Planungsphasen von Produktionssystemen am Beispiel des automobilen Karosseriebaus in Anlehnung an MELING (2012) und der zu konzipierenden Methodik

### 3.4 Referenzmodell und Systemgrenze

Der Konzeption der Methodik wird ein qualitätsorientiertes Referenzmodell der fertigungstechnischen Prozesskette entsprechend Abbildung 13 zu Grunde gelegt. Das Referenzmodell ist ein Objektmodell zur allgemeingültigen Beschreibung des dargelegten Untersuchungsgebietes mit den relevanten Systembestandteilen. Es besteht aus den Objekten *Qualitätsplanung* und *-prüfung*, *Fertigprodukt*, *Prozesskette*, *Prozesskettengestaltung* und *-führung* sowie der *Analyse* und zeigt deren Beziehungen zueinander. Das Fertigprodukt ist durch dessen realisierte Beschaffenheit und Ausführungsqualität im Referenzmodell abgebildet. Die Prozesskette wird durch die Modellelemente *Prozesskettenrealisierung*, *Prozesskettenelemente* und *Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge* repräsentiert.



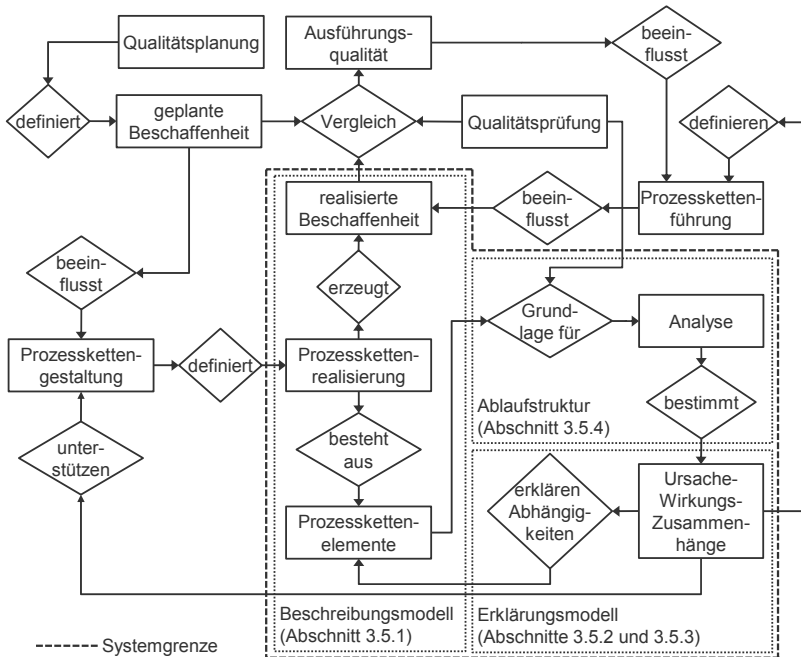


Abbildung 13: *Qualitätsorientiertes Referenzmodell fertigungstechnischer Prozessketten und Systemgrenze der vorliegenden Arbeit*

Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht die Ausführungsqualität des Fertigteils, welche durch einen Vergleich der realisierten mit der geplanten Beschaffenheit im Zuge der Qualitätsprüfung bestimmt wird. Die geplante Beschaffenheit wird durch die Qualitätsplanung definiert. Die realisierte Beschaffenheit wird durch die Prozesskette erzeugt, welche sich in verschiedenen Ausbaustufen befinden kann. Die Struktur und die Elemente der Prozesskette mit ihrer anlagentechnischen Umsetzung werden durch die Prozesskettengestaltung geschaffen. Maßnahmen zur Prozesskettenführung dienen zur Korrektur der realisierten Beschaffenheit, angestoßen durch die erzielte Ausführungsqualität oder durch Ergebnisse der Qualitätsprüfung von Zwischenprodukten der Prozesskette. Die Planungs- und Optimierungsaktivitäten, welche sowohl in der Prozesskettengestaltung als auch der -führung ablaufen, werden durch Kenntnis der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Prozesskettenelementen und dem Fertigprodukt befähigt oder unterstützt. Die Analyse der Prozesskette bestimmt die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge qualitativ oder quantitativ mit Hilfe von Analysemethoden. In Abbildung 13 sind die Bestandteile der Methodik

*Beschreibungsmodell, Erklärungsmodell und Ablaufstruktur* eingezeichnet, welche in der folgenden Konzeption detailliert werden.

## 3.5 Aufbau der Teilmodelle und der Ablaufstruktur

Die Konzeption der Methodik erfolgt durch eine Synthese der dargestellten Grundlagen und der Anforderungen unter Berücksichtigung der Systemgrenze. Ausgehend vom Referenzmodell werden konkrete, allgemeingültige Modelle und Vorgehensweisen für die Analyse der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge mit Einfluss auf die Ausführungsqualität der Fertigprodukte fertigungstechnischer Prozessketten abgeleitet. Im Folgenden wird auf den Aufbau des Beschreibungsmodells (Abschnitt 3.5.1), des Erklärungsmodells (Abschnitte 3.5.2 und 3.5.3) sowie die Ablaufstruktur der Methodik eingegangen (Abschnitt 3.5.4). Dabei stellt das Beschreibungsmodell eine systematische Abbildung der Struktur der fertigungstechnischen Prozesskette und der realisierten Beschaffenheit des Fertigproduktes dar. Das Erklärungsmodell bildet die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Elementen auf qualitative und quantitative Weise ab. Das dafür erforderliche Wissen wird durch ein kombiniertes deduktives und induktives Analyseverfahren akquiriert. Eine integrierte Ablaufstruktur setzt die einzelnen Modelle und Methoden der Gesamtmethodik zueinander in Beziehung und ordnet diese in einen logisch-zeitlichen Ablauf ein.

### 3.5.1 Beschreibungsmodell

Aufgabe des Beschreibungsmodells ist die Abbildung der Struktur des Wirk- und Zielsystems. Als Zielsystem wird die Ausführungsqualität  $Q_A$  des Fertigproduktes verwendet. Die Menge der geplanten Beschaffenheit  $B_p$  als Ergebnis eines Qualitätsplanungsvorgehens wird dabei als bekannt vorausgesetzt. Die resultierenden geplanten Merkmale mit ihren Merkmalswerten werden für die mathematische Beschreibung im Weiteren als Vektor  $\underline{p}$  zusammengefasst. Analog wird der Vektor der realisierten Merkmale des Fertigproduktes  $\underline{r}$  eingeführt. Damit kann das Zielsystem mit Gleichung (3.1) beschrieben werden.

$$Q_A = f(\underline{p}, \underline{r}) \text{ bspw. } Q_A = \min |(\underline{p} - \underline{r})^T(\underline{p} - \underline{r})| \quad (3.1)$$

Der funktionale Zusammenhang zur Berechnung einer skalaren oder mehrdimensionalen Ausführungsqualität wird im Sinne einer unternehmens- und anwendungsspezifischen Definition bewusst offen gelassen. In der einschlägigen Literatur finden

sich hierzu unterschiedliche Definitionen. Als Beispiel sei das klassische Qualitätsverständnis anhand der plakativen Aussage „nur so gut wie nötig“ gegenüber dem Qualitätsverständnis von Taguchi (TAGUCHI 1986) erwähnt.

### **Beschreibung eines fertigungstechnischen Prozesses**

Das zu untersuchende Wirksystem ist mit der fertigungstechnischen Prozesskette gegeben. Dessen Systemelemente wurden in Abschnitt 2.2.2 dargestellt. Die Merkmalswerte eines Zwischenproduktes  $\underline{y}_i$  als Ausgangsgrößen eines einzelnen Prozesses  $i$  einer Prozesskette können dementsprechend als Funktion der Einflussgrößen beschrieben werden (Gleichung (3.2)):

$$\underline{y}_i = f_i(\underline{e}_i, \underline{s}_i, \underline{x}_i, \underline{y}_{i-1}, \underline{z}_i) = f_i(\underline{d}_i) \text{ mit } \underline{d}_i = (\underline{e}_i^T, \underline{s}_i^T, \underline{x}_i^T, \underline{y}_{i-1}^T, \underline{z}_i^T)^T \quad (3.2)$$

Mit

$\underline{d}_i$	Vektor der Einflussgrößen des Prozesses $i$
$\underline{e}_i$	Vektor der Eingangsproduktmerkmale in den Prozess $i$
$\underline{s}_i$	Vektor der Störgrößen des Prozesses $i$
$\underline{x}_i$	Vektor der Stellgrößen des Prozesses $i$
$\underline{y}_{i-1}$	Vektor der Merkmale des Zwischenproduktes $i - 1$
$\underline{z}_i$	Vektor der Zustandsgrößen des Prozesses $i$

Nach EPPINGER & BROWNING (2012) bringt die Modellierung komplexer Systeme auf Basis von Matrizen wesentliche Vorteile mit sich. Zu diesen Vorteilen zählen vor allem die prägnante Darstellung der Systemstruktur, die Visualisierung der Zusammenhänge, Analysemöglichkeiten zur Ableitung von Erkenntnissen sowie die flexible Erweiterbarkeit. Aus diesen Gründen wird das Beschreibungsmodell der Methodik in Matrixdarstellung umgesetzt. Handelt es sich bei  $f_i$  um eine lineare Funktion, so kann der Ausgangsvektor des Prozesses  $i$  durch eine Linearkombination der Einträge des Eingangsvektors beschrieben werden. Durch die Darstellung dieser Abbildungsvorschrift in einer Matrix  $\underline{D}_i$  ergibt sich die Prozessfunktion nach Gleichung (3.3). Dabei entspricht  $a$  der Anzahl der Einflussgrößen und  $b$  der Anzahl der Ausgangsgrößen. Durch die Abbildung der Domäne *Einflussgrößen* auf die Domäne *Ausgangsgrößen* kann  $\underline{D}_i$  als DMM betrachtet werden.

$$\underline{y}_i = \underline{D}_i^T \underline{d}_i \text{ mit} \quad \dim(\underline{D}_i) = a \times b, \dim(\underline{d}_i) = a \times 1, \dim(\underline{y}_i) = b \times 1 \quad (3.3)$$

### **Beschreibung einer fertigungstechnischen Prozesskette**

Die Verkettung der einzelnen Prozesse zur Prozesskette, bei der die Zwischenprodukte als Ausgangsgrößen eines Prozesses auch eine Teilmenge der Eingangsgrößen des nachfolgenden Prozesses darstellen, führt auf Basis von Gleichung (3.2) am Beispiel eines Prozesses  $i$  und eines vorgelagerten Prozesses  $i - 1$  zu Gleichung (3.4).

$$\underline{y}_i = f_i(\underline{e}_i, \underline{s}_i, \underline{x}_i, f_{i-1}(\underline{e}_{i-1}, \underline{s}_{i-1}, \underline{x}_{i-1}, \underline{y}_{i-2}, \underline{z}_{i-1}), \underline{z}_i) \quad (3.4)$$

Führt man diese Verkettung linearer Prozessfunktionen für die gesamte Prozesskette mit  $n$  Einzelprozessen durch und setzt die Ausgangsgrößen des letzten Prozesses gleich mit den realisierten Merkmalen des Fertigproduktes, so ergeben sich die Gleichungen (3.5) und (3.6).

$$\underline{r} = \underline{y}_n = f_n(\underline{e}_1, \underline{s}_1, \underline{x}_1, \underline{z}_1, \underline{e}_2, \underline{s}_2, \underline{x}_2, \underline{z}_2, \dots, \underline{e}_n, \underline{s}_n, \underline{x}_n, \underline{z}_n) = f_n(\underline{d}_n) \quad (3.5)$$

$$\underline{r} = \underline{D}_n^T \underline{d}_n \quad (3.6)$$

Die als DMM interpretierbare Matrix  $\underline{D}_n$  bildet dabei alle Einflussgrößen aller Prozesse der Prozesskette auf die realisierten Merkmale des Fertigproduktes ab. Da hierbei ausschließlich das Ein-/Ausgangsverhalten modelliert wird, kann nach HABERFELLNER (2012) von einer *wirkungsorientierten Betrachtung* des Systems fertigungstechnische Prozesskette gesprochen werden (nach SCHRÖDER 2010 auch als *Blackbox-Betrachtung* bezeichnet). Eine derartige Systembetrachtung steht im Widerspruch zur allgemeinen Forderung nach *Transparenz* sowie den speziellen Anforderungen *Eignung für komplexe Prozessketten* und *Unterstützung der Systemanalyse*. Mit diesem Beschreibungsmodell würde sich sowohl eine induktive als auch eine deduktive Systemanalyse zur Bestimmung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge einer komplexen Prozesskette schwierig gestalten. In Übereinstimmung mit den Prinzipien zur Komplexitätsbeherrschung nach Abschnitt 2.5.1 wird der Detaillierungsgrad des Beschreibungsmodells durch die Abbildung des Ein-/Ausgangsverhaltens der Einzelprozesse erhöht. Somit erfolgt eine *strukturorientierte Modellierung* des Systems fertigungstechnische Prozesskette. Hierzu wird der Vektor der Einflussgrößen  $\underline{d}_n$  durch die Integration aller Zwischenproduktmerkmale  $\underline{y}_1, \underline{y}_2, \dots, \underline{y}_n$  unter Wahrung der Prozesskettenstruktur zu einem Vektor aller Prozesskettenelemente  $\underline{m}$  erweitert (siehe Gleichung (3.7)).

$$\begin{aligned} \underline{m} &= \left( \underline{e}_1^T, \underline{s}_1^T, \underline{x}_1^T, \underline{y}_1^T, \underline{z}_1^T, \underline{e}_2^T, \underline{s}_2^T, \underline{x}_2^T, \underline{y}_2^T, \underline{z}_2^T, \dots, \underline{e}_n^T, \underline{s}_n^T, \underline{x}_n^T, \underline{z}_n^T, \underline{y}_n^T \right)^T \\ &= \left( \underline{e}_1^T, \underline{s}_1^T, \underline{x}_1^T, \underline{y}_1^T, \underline{z}_1^T, \underline{e}_2^T, \underline{s}_2^T, \underline{x}_2^T, \underline{y}_2^T, \underline{z}_2^T, \dots, \underline{e}_n^T, \underline{s}_n^T, \underline{x}_n^T, \underline{z}_n^T, \underline{r}^T \right)^T \end{aligned} \quad (3.7)$$

Dieser Prozesskettenvektor wird als Basis zur Definition einer symmetrischen Matrix  $\underline{M}$  verwendet, in welcher die Zwischenproduktmerkmale sowohl als Wirkungen als auch als Ursachen auftreten können. Dadurch wird die Beschreibung aller Einzelprozesse und der Prozesskette als Ganzes ermöglicht (siehe Gleichung (3.8)).

$$\underline{m} = \underline{M}^T \underline{m} \quad (3.8)$$

Entsprechend der Definition in Abschnitt 2.5.2 stellt die Matrix  $\underline{M}^T$  eine MDM dar<sup>2</sup>. Um die Transparenz und die Interpretierbarkeit der MDM zu unterstützen, werden die Domänen in drei Ebenen untergliedert (siehe Tabelle 3). Die oberste Ebene bezeichnet die Domäne selbst. In der mittleren Ebene existieren je nach Domäne unterschiedliche Subdomänen und in der untersten Ebene befinden sich die eigentlichen Merkmale, Parameter und Größen. Jede der in Tabelle 3 dargestellten Domänen existiert für jeden Hauptprozess der Prozesskette.

*Tabelle 3: Prozessbezogene Domänenstruktur der MDM in Anlehnung an WESTERMEIER ET AL. (2014)*

Symbol	Domäne	Subdomänen	Elemente
$\underline{e}_i$	Eingangsproduktmerkmale	Eingangsprodukte, bspw. Halbzeuge	Merkmale, bspw. Härte und Viskosität
$\underline{s}_i$	Störgrößen	Umgebung, Material, Maschine, Mensch und Prozess	Größen, bspw. Umgebungstemperatur
$\underline{x}_i$	Stellgrößen	Prozessparameter und Maschinenparameter	Parameter, bspw. Schnittgeschwindigkeit und Kühlschmierstoff an/aus
$\underline{y}_i$ bzw. $\underline{r}_i$	Zwischenproduktmerkmale bzw. Qualitätsmerkmale	Zwischenprodukte, bspw. Anodentinte und Kathodentinte bzw. Merkmalskategorien, bspw. Geometrie, Lebensdauer und Sicherheit	Merkmale, bspw. Homogenität bzw. Länge, kalendarische Lebensdauer
$\underline{z}_i$	Zustandsgrößen	bspw. Maschine und Werkzeug	Größen, bspw. Temperatur und Verschleiß

In Abbildung 14 ist der Aufbau der MDM  $\underline{M}$  graphisch dargestellt. Für eine bessere Übersicht wurde auf die Darstellung der Subdomänen und Elemente verzichtet. Es ist ersichtlich, dass die Prozessreihenfolge in der MDM abgebildet werden kann und die Qualitätsmerkmale der realisierten Beschaffenheit als letzte Domäne in den MDM-Zeilen bzw. -Spalten enthalten sind. Der Detaillierungsgrad der Modellierung der ein-

<sup>2</sup> Leserichtung IC (engl. *inputs in columns*, dt. Eingänge in den Spalten) nach EPPINGER & BROWNING (2012)

zelen Prozesse der Prozesskette ist bedarfsgerecht an die Anforderungen der Analyseaufgabe anzupassen. SCHÄFER (2003) und EICHGRÜN (2003) strukturieren fertigungstechnische Prozessketten in die Subsysteme *Prozesseinheit*, *Prozess (Haupt- und Nebenprozesse)*, *Teilprozess* und *Aktivitäten*. Nach SCHÄFER (2003) ist die Detaillierung der Prozesskette bis auf die Ebene der Prozesseinheiten mit Haupt- und Nebenprozessen für die meisten Analyseaufgaben erforderlich.

	$\underline{e}_1^T$	$\underline{s}_1^T$	$\underline{x}_1^T$	$\underline{y}_1^T$	$\underline{z}_1^T$	$\dots$	$\underline{e}_n^T$	$\underline{s}_n^T$	$\underline{x}_n^T$	$\underline{z}_n^T$	$\underline{r}^T$
$\underline{e}_1$											
$\underline{s}_1$											
$\underline{x}_1$											
$\underline{y}_1$											
$\underline{z}_1$											
$\vdots$											
$\underline{e}_n$											
$\underline{s}_n$											
$\underline{x}_n$											
$\underline{z}_n$											
$\underline{r}$											

Abbildung 14: Graphische Darstellung des Aufbaus der Prozessketten-MDM M

### **Zusammenfassung der Beschreibungsmodelle**

Das in Gleichung (3.8) dargestellte Beschreibungsmodell wird für die Anwendung in deduktiv-qualitativen Systemanalysen und für die Abbildung quantitativer Zusammenhänge aus empirischen Untersuchungen weiter spezifiziert (Gleichungen (3.9) und (3.10)). Für die qualitative Beschreibung kommen  $j$  Teilmodelle und für die quantitative Beschreibung der Prozesskette  $k$  Teilmodelle jeweils für unterschiedliche, noch zu spezifizierende Beschreibungsdimensionen zum Einsatz.

Qualitative Prozesskettenbeschreibung:

$$[\underline{m}_1, \underline{m}_2, \dots, \underline{m}_j]_{qual} \sim [\underline{M}_1^T \underline{m}, \underline{M}_2^T \underline{m}, \dots, \underline{M}_j^T \underline{m}]_{qual} \quad (3.9)$$

Quantitative Prozesskettenbeschreibung:

$$[\underline{m}_1, \underline{m}_2, \dots, \underline{m}_k]_{quan} = [\underline{M}_1^T \underline{m}, \underline{M}_2^T \underline{m}, \dots, \underline{M}_k^T \underline{m}]_{quan} \quad (3.10)$$

Das Beschreibungsmodell stellt die Grundlage für die weitere Konzeption der Methodik dar. Mit der Matrix-Vektor-basierten Modellierung ist eine mathematische Beschreibung und graphische Darstellung des Beschreibungsmodells gegeben. Die Domänenelemente und die qualitativen sowie quantitativen Relationen zwischen den Elementen sind im Erklärungsprozess zu bestimmen.

### 3.5.2 Qualitatives Erklärungsmodell

Die Aufgabe des Erklärungsmodells ist es, aufzuzeigen, wie durch die Struktur des Wirksystems die Beschaffenheit der Objekte beeinflusst wird (WENGLER 1996). In diesem Kontext werden sowohl die Zwischenprodukte als auch das Fertigprodukt als Objekte aufgefasst. Hierzu sind die spezifischen Elemente des Wirksystems und deren Ursache-Wirkungs-Beziehungen untereinander zu identifizieren. Dies kann durch theoretisch-deduktive und empirisch-induktive Analysen erfolgen. Entsprechend der Anforderung *Kombinierte Betrachtung unterschiedlichen Wissens* bindet die Konzeption beide Analyseansätze ein. Hierdurch wird die Eignung der Methodik für neue Prozessketten sichergestellt, für welche nur eine kleine Wissensbasis existiert. Durch eine umfangreiche heuristische Analysephase, welche über bestehende Ansätze wie das *Heuristische Screening* nach MAYERS (1997) hinausgeht, wird die empirisch-induktive Analyse in einem iterativen Ablauf vorbereitet und unterstützt.

#### **Qualitative Darstellung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen**

Aus den Anforderungen *Eignung für kleine und unsichere Wissensbasis* und *Eignung für komplexe Prozessketten* in Verbindung mit dem Fokus auf Ursache-Wirkungs-Beziehungen mit unklarem naturgesetzlichen Hintergrund ergeben sich für die Gestaltung der theoretisch-deduktiven Analyse folgende Detailanforderungen an das qualitative Erklärungsmodell:

1. Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge sind qualitativ zu beschreiben.
2. Dies setzt zumindest qualitatives Wissen über die physikalischen Zusammenhänge in den einzelnen Prozessen voraus. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit der Befragung von Experten<sup>3</sup>.
3. Zur qualitativen Unterscheidung von sicherem und unsicherem Wissen bedarf es zusätzlicher Dimensionen zur Beschreibung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge.

---

<sup>3</sup> In Anlehnung an GLÄSER & LAUDEL (2010) bezeichnet der Begriff *Experte* die spezifische Rolle einer Person als Quelle von Spezialwissen über die zu erforschenden Sachverhalte.

4. Die Verwendung von unsicherem Wissen gebietet die Befragung mehrerer Experten sowie die Berücksichtigung und Verarbeitung unterschiedlicher Meinungen.

Diese Detailanforderungen werden in der Konzeption der Methodik durch folgende Maßnahmen berücksichtigt:

1. Die qualitative Beschreibung der Rangordnung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge bzgl. verschiedener Beschreibungsdimensionen erfordert die Festlegung einer geeigneten Bewertungsskala. Hierfür wird eine vierstufige Ordinalskala vorgeschlagen. Diese stellt einen Kompromiss zwischen der Unterscheidbarkeit der Zusammenhangsstärken und dem Bewertungsaufwand dar. Darüber hinaus verlangt diese mittelpunktfreie Skala eine klare Entscheidung, ob es sich bspw. um einen *starken* oder *schwachen* Zusammenhang handelt.
2. Unter Beachtung der allgemeinen Anforderungen *Anwendbarkeit* und *Praxistauglichkeit* ist das Expertenwissen durch ein strukturiertes und aufwandsarmes Vorgehen zu akquirieren. Dabei muss dieses Vorgehen eine zielgerichtete Erfassung der relevanten Systemelemente und der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ermöglichen.
3. Das qualitative Beschreibungsmodell nach Gleichung (3.9) auf Basis der Prozessketten-MDM beschreibt das System bzgl. mehrerer Dimensionen. Für jede Dimension wird hierzu eine eigene MDM aufgebaut. Zur Abbildung unsicheren Wissens wird die Beschreibungsdimension *Sicherheit* eingeführt. In Anlehnung an die etablierte Methode *FMEA* erfolgt zusätzlich zur Bewertung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge auch eine Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Ursachen (WESTERMEIER ET AL. 2013). Insgesamt ergeben sich damit für die qualitative Prozesskettenanalyse vier Beschreibungsdimensionen, welche in Tabelle 4 zusammengefasst sind. Die Ordinalskala zur Bewertung der vier Beschreibungsdimensionen wird in Tabelle 5 vorgestellt.
4. Existieren mehrere Expertenmeinungen  $n$  zu einem Ursache-Wirkungs-Zusammenhang, sind diese auf geeignete Weise zu gewichten und zu einer Bewertung zu verrechnen. Entsprechend Gleichung (3.11) werden Sicherheiten arithmetisch gemittelt. Nach Gleichung (3.12) werden die Werte der Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. der Bedeutung gewichtet mit den dazugehörigen Sicherheitswerten gemittelt (WESTERMEIER ET AL. 2014). Ergänzend werden zwei zusätzliche Regeln zum Umgang mit Mehrfachmeinungen definiert. Zum einen werden die Sicherheiten der resultierenden Bewertung als *unsicher* an-



genommen, falls sichere, sich widersprechende Auftretenswahrscheinlichkeiten oder Bedeutungen (Unterschied der Bewertungen  $\geq 2$ ) zu einem Zusammenhang vorliegen. Zum anderen werden unsichere und eher unsichere Meinungen nicht berücksichtigt, falls zum gleichen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang bereits sichere Meinungen vorliegen.

$$S_X = \frac{\sum_{i=1}^n S_{X,i}}{n}, X \in \{A, B\} \quad (3.11)$$

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i \cdot S_{X,i})}{\sum_{i=1}^n S_{X,i}}, X \in \{A, B\} \quad (3.12)$$

Tabelle 4: Beschreibungsdimensionen der qualitativen Prozesskettenanalyse

Beschreibungsdimension	Symbol	Erklärung
Auftretenswahrscheinlichkeit	$A$	Expertenmeinung zur Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Ursache eines Kausalzusammenhangs
Sicherheit der Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit	$S_A$	Selbstbewertung eines Experten zur Sicherheit der Bewertung von $A$
Bedeutung	$B$	Expertenmeinung zur Stärke eines Kausalzusammenhangs
Sicherheit der Bewertung der Bedeutung	$S_B$	Selbstbewertung eines Experten zur Sicherheit der Bewertung von $B$

Tabelle 5: Semantische Bedeutung der Bewertungsskala

Wert	Bewertung von $A$	Bewertung von $B$	Bewertung von $S$
0	unwahrscheinlich	schwach	unsicher
1	eher unwahrscheinlich	eher schwach	eher unsicher
2	eher wahrscheinlich	eher stark	eher sicher
3	wahrscheinlich	stark	sicher

### Indirekte Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge

Auf Basis der bislang erarbeiteten Erklärungsmodelle können qualitative, indirekte Ursache-Wirkungs-Beziehungen entsprechend der Anforderung *Umgang mit prozessübergreifenden und indirekten Ursache-Wirkungs-Beziehungen* über mehrere Domänen berechnet und modelliert werden. Zu dieser Thematik sind lediglich Ansätze zur Berechnung indirekter Verbindungen innerhalb einer DSM (MAURER 2007), über eine weitere Domäne (YASSINE ET AL. 2003) und graphische Methoden

(MAISENBACHER ET AL. 2012) bekannt. Mit Hilfe eines aus der Graphentheorie stammenden Pfadsuche-Algorithmus lassen sich die indirekten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge nach WESTERMEIER ET AL. (2014) aus der MDM der Bedeutungen  $\underline{M}_B$  berechnen. Der Algorithmus zur Berechnung der indirekten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge umfasst die folgenden Schritte:

1. Bestimmung aller möglichen Ursache-Wirkungs-Pfade zwischen zwei Elementen
2. Berechnung der gemittelten Bedeutungen  $\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_j$  aller Pfade mit Hilfe des arithmetischen Mittelwertes der Bedeutungen der einzelnen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge  $B_{j,i}$  eines Pfades  $j$  nach Gleichung (3.13).  $m_j$  entspricht der Anzahl der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, aus welchen sich der Pfad zusammensetzt. Die Werte der arithmetisch gemittelten Bedeutungen bewegen sich dabei in den Grenzen der qualitativen Bewertungsskala.

$$\bar{B}_j = \frac{\sum_{i=1}^{m_j} B_{j,i}}{m_j}, 0 \leq \bar{B}_j \leq 3 \quad (3.13)$$

3. Auswahl des Pfades mit der größten gemittelten, indirekten Bedeutung  $\bar{B}_j$
4. Eintragung des indirekten Bedeutungswertes  $\bar{B}_j$  in ein weiteres, qualitatives Erklärungsmodell  $\underline{M}_B^{ind}$  der Prozesskette auf Basis des Beschreibungsmodells aus Gleichung (3.9)

Ein Beispiel zur Anwendung des Algorithmus findet sich in WESTERMEIER ET AL. (2014). Darüber hinaus ist die Berechnung der indirekten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge auch durch geeignete Multiplikation der Submatrizen von  $\underline{M}_B$  möglich. Die indirekten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge bilden die prozessübergreifenden Ursache-Wirkungs-Ketten in einer Prozesskette ab. Mit diesen Informationen können aus der indirekten MDM auf einfache Weise alle Ursachen für eine beliebige Wirkung und umgekehrt identifiziert werden. Insbesondere zur Beurteilung der Qualitätsrelevanz von Ursachen bietet sich die Berechnung der indirekten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge mit Qualitätsmerkmalen an.

#### **Abbildung von Wechselwirkungen**

Die Anforderungen *Unterstützung der quantitativen Systemanalyse* und *Eignung für komplexe Prozessketten* werden adressiert, indem Wechselwirkungen von Systemelementen im qualitativen Erklärungsmodell berücksichtigt werden. Mathematisch interpretiert stellen Wechselwirkungen Produkte mehrerer Ursachen dar. Dementsprechend lassen sich Wechselwirkungen nicht im linearen Beschreibungsmodell nach Gleichung (3.9) abbilden. Um dennoch eine Hilfestellung für die empirische

Analyse der Prozesskette zu bieten, können existierende Wechselwirkungen zwischen zwei Elementen in einer separaten MDM der Wechselwirkungen  $\underline{M}^{int}$  eingetragen werden. Die Eintragung einer *1* steht für *Wechselwirkung vermutet* und einer *0* für *keine Wechselwirkung vermutet*.

### **Zusammenfassung der qualitativen Erklärungsmodelle**

In diesem Abschnitt wurden mehrere qualitative Beschreibungsdimensionen definiert, welche mit Hilfe von Expertenwissen die Abbildung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen in MDM ermöglichen. Diese MDM stellen die qualitativen Erklärungsmodelle der Arbeit und die Grundlagen für die weitere Analyse fertigungstechnischer Prozessketten dar. In Tabelle 6 sind die MDM-basierten Erklärungsmodelle zusammengefasst.

Tabelle 6: Zusammenfassung der qualitativen Erklärungsmodelle

Symbol	Erklärungsmodell der...
$\underline{M}_A$	...gemittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten von Ursachen
$\underline{M}_{S_A}$	...gemittelten Sicherheiten der Experten zur Bewertung von A
$\underline{M}_B$	...gemittelten Bedeutungen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen
$\underline{M}_{S_B}$	...gemittelten Sicherheiten der Experten zur Bewertung von B
$\underline{M}_B^{ind}$	...Bedeutungen von indirekten Ursache-Wirkungs-Beziehungen
$\underline{M}^{int}$	...Wechselwirkungen zwischen zwei Ursachen

### **3.5.3 Quantitatives Erklärungsmodell**

#### **Grundsätzliches Vorgehen zur quantitativen Systemanalyse**

Entsprechend Abschnitt 2.4.1 gibt es eine Reihe von Möglichkeiten zur quantitativen Systemanalyse: deduktiv-quantitative, induktiv-labororientierte und induktiv-feldorientierte Untersuchungen. Deduktiv-quantitative Analysen, bspw. mit Hilfe von Simulationen, setzen hochwertige Modelle und bekannte physikalische Wirkmechanismen voraus. Die deduktiv-quantitativen Methoden zur Systemanalyse stoßen bei komplexen Prozessketten an ihre Grenzen (SCHÄFER 2003). Die produktionsbedingten Ursache-Wirkungs-Ketten und deren Wechselwirkungen untereinander sind in komplexen Prozessketten und Produkten sehr vielfältig. Der Aufwand für deren Abbildung und Simulation in gekoppelten, analytischen oder numerischen Prozess-Produkt-Modellen wird dabei nicht den Anforderungen an eine Methodik zur

Unterstützung des Produktionsanlaufs neuer Prozessketten gerecht. Auch am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen sind deduktiv-quantitative Analysen im Zusammenhang mit Produktionseinflüssen bislang nicht bekannt. Es finden viele Forschungsaktivitäten zur Modellierung und Simulation des elektrischen Batterieverhaltens (bspw. RANGLES 1947) sowie des thermischen Verhaltens (bspw. GUO & WHITE 2013 und YI ET AL. 2013) statt. Mitunter gibt es auch Ansätze zur Modellierung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen einzelner Prozesse und der Produktqualität. So stellt KENNEY ET AL. 2012 die Abhängigkeiten zwischen Schichtdickenschwankungen und der Zellkapazität dar. Allerdings sind keine Arbeiten zur Modellierung rein produktionsinduzierter, in der Produktentwicklung nicht betrachteter Einflussgrößen, insbesondere in der Zellmontage, und deren Wechselwirkungen bekannt. Folglich wird der induktive Ansatz zur quantitativen Systemanalyse näher betrachtet. Eine Gegenüberstellung von Experimenten nach dem Laborprinzip und Untersuchungen im Feld findet sich in SCHÄFER (2003). Als Nachteile der induktiv-labororientierten Untersuchungen und deren Realisierung in der SVM werden im Zusammenhang mit der Analyse fertigungstechnischer Prozessketten in der Literatur (bspw. SCHÄFER 2003 und HIELSCHER 2008) im Wesentlichen die folgenden Punkte genannt:

- keine Unterstützung bei der Analyse prozessübergreifend vernetzter Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge
- Vernachlässigung instationärer Prozesse
- Schwierigkeiten im Umgang mit Störgrößen

Der entscheidende Nachteil der induktiv-feldorientierten Untersuchungen ergibt sich durch einen Abgleich mit der festgelegten Anforderung an die Methodik zur Eignung für eine kleine und unsichere Wissensbasis. Im Produktionsanlauf der Prozesskette kann nicht auf eine umfassende Datenbasis zurückgegriffen werden, welche für die feldorientierte Systemanalyse unabdinglich ist. Folglich wird für die quantitative Systemanalyse in dieser Arbeit der induktiv-labororientierte Ansatz gewählt, da die übri-gen Ansätze grundlegende Anforderungen nicht erfüllen können und somit auszuschließen sind. Für die Anwendung der SVM zur Umsetzung induktiv-labororientierter Untersuchungen gilt es, die oben aufgeführten Nachteile zu adressieren. Hierzu dient die deduktiv-qualitative Analysephase, welche versucht, alle Einflussgrößen und alle potentiellen Vernetzungen dieser zu berücksichtigen und dadurch eine induktiv-labororientierte Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten zu ermöglichen (siehe Kapitel 4).

### **Erklärungsmodell auf Basis induktiv-quantitativer Analysen**

Die Anforderungen *Erkenntnisgewinn durch quantitative Systemanalyse* und *Deterministische Modellierung* erfordern die Ableitung funktionaler Zusammenhänge aus den Versuchsergebnissen, insbesondere im Hinblick auf eine der Analyse nachfolgenden Optimierung der Prozesskette. Hierfür eignet sich entsprechend der einschlägigen Literatur vorwiegend die Methode der Regressionsanalyse (siehe Abschnitt 2.3.3). Deren Anwendung zur Versuchsauswertung und -interpretation wird in Abschnitt 4.4.6 näher betrachtet. An dieser Stelle wird auf den Aufbau des quantitativen Erklärungsmodells durch die methodisch grundlegende Verknüpfung der resultierenden Regressionsmodelle mit dem Beschreibungsmodell nach Gleichung (3.10) eingegangen. Ein beispielhaftes, multiples lineares Regressionsmodell zweiter Ordnung ist mit Gleichung (3.14) gegeben. Dabei stellt  $\hat{y}$  die geschätzte Zielgröße dar.  $x_1$  und  $x_2$  sind zwei unabhängige Variablen und bspw. Faktoren der induktiv-labororientierten Analyse. Sowohl die Zielgröße als auch die Faktoren sind Bestandteile des Prozesskettenvektors  $\underline{m}$  des Beschreibungsmodells.  $\hat{b}_i$  sind die in der Regressionsanalyse zu bestimmenden Koeffizienten. Um nun neben dem linearen Modellanteil auch die Konstante  $\hat{b}_0$  und die Koeffizienten des nichtlinearen Modellanteils  $\hat{b}_{1,1}$  und  $\hat{b}_{1,2}$  in das quantitative Erklärungsmodell aufnehmen zu können, wird der Prozesskettenvektor um die entsprechenden Modellterme erweitert (siehe Gleichung (3.15)). Da dieses Vorgehen auf eine vollständige, komplexe Prozesskette im Rahmen der hier verwendeten Definition verallgemeinerbar ist, ist das quantitative Erklärungsmodell der Methodik definiert.

$$\hat{y} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 + \hat{b}_{1,2} x_1 x_2 + \hat{b}_{1,1} x_1^2 \quad (3.14)$$

$$\underline{m}_{1,quan} = \begin{bmatrix} \vdots \\ x_1 \\ x_2 \\ \hat{y} \\ 1 \\ x_1 x_2 \\ x_1^2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hat{b}_1 & \hat{b}_2 & 0 & \hat{b}_0 & \hat{b}_{1,2} & \hat{b}_{1,1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ x_1 \\ x_2 \\ \hat{y} \\ 1 \\ x_1 x_2 \\ x_1^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Liegen zu einer Zielgröße neue Erkenntnisse vor, bspw. aufgrund einer umfassenden Analyse, so können diese unter Aufrechterhaltung des bisherigen Erkenntnisstands in ein neues Erklärungsmodell entsprechend des Aufbaus des quantitativen Beschreibungsmodells nach Gleichung (3.10) mit den Teilmodellen 1, 2, ...,  $k$  aufgenommen werden.

#### **Verknüpfung der qualitativen und quantitativen Analysephasen**

Aufgrund der großen Untersuchungsumfänge induktiv-labororientierter Analysen in komplexen Prozessketten ist in der Praxis ein iteratives Vorgehen erforderlich. Dementsprechend ist das qualitative Erklärungsmodell, als Planungsgrundlage der induktiv-quantitativen Analysephase, auf Basis der erlangten Erkenntnisse iterativ zu aktualisieren. Hierzu sind die quantitativen Ergebnisse einer Analyseiteration vor der Planung und Durchführung der nächsten Analyse auf geeignete Weise in das qualitative Erklärungsmodell zurückzuführen. Hierfür wird in Abschnitt 4.4.8 eine Transformation der quantitativen Analyseergebnisse vorgeschlagen.

#### **Zusammenfassung des quantitativen Erklärungsmodells**

Das quantitative Erklärungsmodell der Methodik beruht zusammenfassend auf folgenden Elementen:

- induktiv-quantitative Analysen der fertigungstechnischen Prozesskette mit Hilfe der SVM
- Auswertung der Versuchsergebnisse mit Hilfe der Methode der Regressionsanalyse
- Abbildung nichtlinearer Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge mit Wechselwirkungen durch eine bedarfsgerechte Erweiterung des Beschreibungsmodells
- Aktualisierung der qualitativen Erklärungsmodelle durch Transformation der quantitativen Analyseergebnisse

#### **3.5.4 Ablaufstruktur der Methodik**

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Beschreibungs- und Erklärungsmodelle stellen das Aufbausystem der Methodik dar. Im Weiteren wird der Ablauf des Methodensystems dargestellt. Im Rahmen eines Problemlösungsprozesses sind die Beschreibungs- und Erklärungsmodelle aufzubauen. Entsprechend Abbildung 15 wird das Methodensystem in drei Teilmethoden gegliedert, welche mit den grundlegenden Forschungsfragen der Arbeit korrespondieren.

Die Methode zur Wissensakquisition setzt die deduktiv-qualitative Analyse der Prozesskette mit Hilfe von Expertenwissen um (Methode 1). Zuerst ist das Beschreibungsmodell der Prozesskette zu konkretisieren. Hierzu sind die Qualitätsmerkmale des Fertigproduktes, die einzelnen Prozesse und deren Reihenfolge sowie die Zwischenprodukte zu bestimmen und zu dokumentieren. Die benötigten Informationen werden im Rahmen dieser Arbeit als gegeben angenommen und sind als Ergebnisse der Qualitätsplanung und der ersten Planungsschritte der Prozesskettengestaltung zu

beziehen. Im zweiten Schritt kann auf Basis der Prozesskettenbeschreibung die deduktiv-qualitative Analyse der Prozesskette erfolgen. Diese dient der Bewertung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen und der Erweiterung der Prozesskettenbeschreibung.

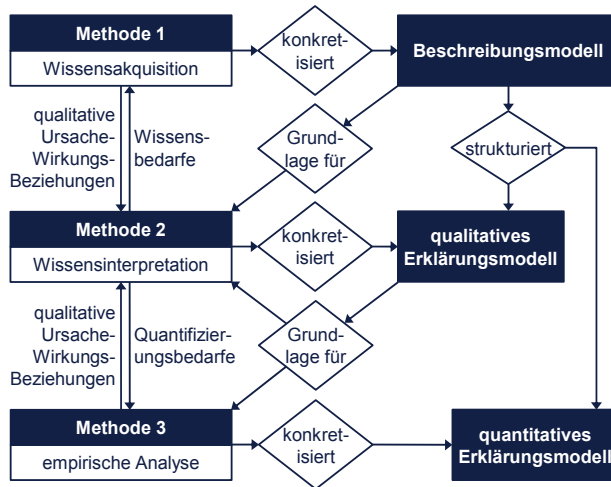


Abbildung 15: Ablaufstruktur der konzipierten Methodik

In der Methode zur Wissensinterpretation gilt es, auf Basis des konkretisierten Beschreibungsmodells und der qualitativen Informationen zur Prozesskette das qualitative Erklärungsmodell aufzubauen (Methode 2). Dabei werden die qualitätsrelevanten Systemelemente und Ursache-Wirkungs-Beziehungen sowie Wissensbedarfe identifiziert. Letztere sind zur iterativen Vervollständigung der qualitativen Prozesskettenbeschreibung in Methode 1 zurückzuführen. Das qualitative Erklärungsmodell stellt die Planungsgrundlage für die induktiv-quantitativen Analysen dar. Die qualitativen Informationen zur Prozesskette sind im Hinblick auf eine aufwandsarme und zielgerichtete induktiv-quantitative Analyse der Prozesskette geeignet zu interpretieren.

In der Methode zur empirischen Analyse ist das quantitative Beschreibungsmodell mit mathematischen Funktionen anzureichern, welche die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Systemelementen beschreiben (Methode 3). Darüber hinaus sind die Erkenntnisse aus den Experimenten in Methode 2 zurückzuführen. Die Aktualisierung der Planungsgrundlage von Methode 2 soll für folgende Analy-

seiterationen eine weitere Reduktion des Untersuchungsaufwands und damit ein zielgerichtetes Vorgehen ermöglichen. In Abhängigkeit der Komplexität und des Kenntnisstands bzw. des Wissensbedarfs der Prozesskettenanalyse ist Methode 3 auf unterschiedlichen Detaillierungsstufen durchzuführen (bspw. Screening Experimente, experimentelle Optimumsuche und Untersuchung im Optimalgebiet nach MAYERS 1997). Auf diese Weise entstehen als Ergebnis der Methodik qualitative und quantitative Erklärungsmodelle, welche für Maßnahmen der Prozesskettenführung zur Verfügung gestellt werden.

### 3.6 Zusammenfassung

Durch die Einordnung des Aufbausystems der Methodik in ein Referenzmodell der fertigungstechnischen Prozesskette wurden zusammen mit den allgemeinen und speziellen Anforderungen an die Methodik die Grundlagen zu deren Konzeption geschaffen. Die Darstellung der Systemgrenze anhand des Referenzmodells grenzt die Methodik gegenüber anderen Teilgebieten des Prozesskettenmanagements ab. Die Detaillierung des Betrachtungsumfangs aus den Perspektiven *Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge*, *Produktionsanlauf* und *Planung* ordnet die Methodik bzgl. des Untersuchungsziels, des Anwendungsgebietes und der unternehmensinternen Prozesse ein. Das Aufbausystem der Methodik wurde durch die Partialmodelle *Beschreibungsmodell* und *Erklärungsmodell* hergeleitet. Der grundlegende Ablauf des Methodensystems wurde in drei Teilmethoden gegliedert, welche die Modelle aufbauen und zum Erklärungsziel der Methodik führen. Somit wurde ein formaler Rahmen für eine Methodik zur qualitätsorientierten Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten erarbeitet, welchen es im Folgenden hinsichtlich der Anforderungen zu detaillieren gilt.



## 4 Detaillierung der Methodik

### 4.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten wird die in Kapitel 3 konzipierte Methodik anhand der eingeführten Teilmethoden detailliert. Tabelle 7 stellt die einzelnen Schritte im Überblick dar.

*Tabelle 7: Sequenzielle Auflistung der Ablaufstruktur der konzipierten Methodik*

<b>Qualitätsorientierte Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten</b>	
<b>Methode zur Wissensakquisition – Forschungsfrage 1</b>	<b>4.2</b>
Grundlegende Prozesskettenbeschreibung	4.2.1
Aufbau eines rechnerbasierten Akquise-Werkzeugs	4.2.2
Durchführung der Expertenbefragung	4.2.3
<b>Methode zur Wissensinterpretation – Forschungsfrage 2</b>	<b>4.3</b>
Ablauf der Interpretation und Reduktion	4.3.1
Aufbau des qualitativen Erklärungsmodells	4.3.2
Interpretation des qualitativen Erklärungsmodells	4.3.3
Fokussierung des qualitativen Erklärungsmodells	4.3.4
<b>Methode zur empirischen Analyse – Forschungsfrage 3</b>	<b>4.4</b>
Phasengliederung der empirischen Analyse	4.4.1
Definition des Untersuchungsumfangs	4.4.2
Versuchsstrategie	4.4.3
Vorbereitung der empirischen Analyse	4.4.4
Versuchsdurchführung	4.4.5
Versuchsauswertung	4.4.6
Interpretation und Validierung	4.4.7
Verknüpfung mit den Erklärungsmodellen	4.4.8

### 4.2 Methode zur Wissensakquisition

Die Methode zur Wissensakquisition dient der vollständigen Akquisition und Bewertung der Systemelemente und der qualitativen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge

in fertigungstechnischen Prozessketten mit Bezug zu den qualitätsbezogenen Analysezielen. Die Methodendetaillierung basiert auf den Prinzipien zur Komplexitätsbeherrschung aus Abschnitt 2.5.1. und wurde in Teilen in WESTERMEIER ET AL. (2013) publiziert.

#### 4.2.1 Grundlegende Prozesskettenbeschreibung

Die Durchführung der Akquisition von Expertenwissen wird durch grundlegendes Wissen über die Prozesskettenelemente und deren Struktur unterstützt. In Tabelle 8 sind die relevanten Elemente zusammengefasst, welche nach Abschnitt 3.5.1 zur Beschreibung des Systems *fertigungstechnische Prozesskette* notwendig sind. Prinzipiell können diese Informationen mit Hilfe der im Folgenden beschriebenen Schritte der Methode 1 gesammelt werden. Liegen bereits Informationen zur Prozesskette vor, so können diese als Ausgangsbasis für die Befragung der Experten verwendet werden.

*Tabelle 8: Zusammenfassung der notwendigen Systemelemente zur Beschreibung fertigungstechnischer Prozessketten*

Prozesskettenstruktur und Prozesskettenelemente
Qualitätsmerkmale
Prozesse und Prozessreihenfolge
Zwischenprodukte, Zwischenproduktstruktur und Zwischenproduktmerkmale
Prozess- und Maschinenparameter
zeitabhängige Zustandsgrößen
Umgebungsbedingungen und mögliche Störgrößen
Eingangsprodukte und Eingangsproduktmerkmale

Die Informationen können unter Verwendung verschiedenster Werkzeuge dargestellt werden. Voraussetzung ist die Möglichkeit zur prozessweisen Zuordnung der einzelnen Größen zu den Kategorien. Hierfür werden tabellarische oder graphische Darstellungen der prozessbezogenen, kategorisierten Größen sowie der gesamten Prozesskette bzw. der Reihenfolge der betrachteten Prozesse empfohlen (siehe Abbildung 31 und Tabelle 16 in Abschnitt 5.3.1).

Der Detaillierungsgrad zur Untergliederung der Prozesskette und der Zwischenprodukte in Subkategorien ist dem Anwender der Methodik überlassen und hängt maßgeblich vom gewünschten Detaillierungsgrad der weiteren Analysen ab. Wichtig ist die eindeutige Bezeichnung aller Parameter und Merkmale in der ganzen Prozesskette bspw. durch eine Nummerierung zusätzlich zum Namen. Darüber hinaus sind

in Anlehnung an WENGLER (1996) insbesondere bei Qualitätsmerkmalen, Eingangs- und Zwischenproduktmerkmalen sowie Prozessparametern Mittelwerte (engl. mean, M) und Standardabweichungen (engl. standard deviation, SD) in der Prozesskettenbeschreibung zu berücksichtigen, wenn zu einer Größe auch deren stochastische Streuung von Bedeutung ist.

Prädestinierte Informationsquellen zur Identifikation der gesuchten Systemelemente sind die Dokumentationen, welche im Rahmen des Planungsprozesses zur Prozesskettengestaltung entstehen, wie das *Anlagenkonzept* in der Phase *Konzeptplanung* nach MELING (2012). Weitere hilfreiche Dokumente können aus der Fertigungs- und Montageplanung stammen, wie *Arbeitspläne* (LOTTER & WIENDAHL 2012) und *Montagevorranggraphen* (BULLINGER 1986 und ROSS 2002). Qualitätsmerkmale mit dazugehörigen Zielwerten sollten durch die unternehmensinterne Qualitätsplanung bspw. aus den Kundenanforderungen abgeleitet werden. Als Orientierungshilfe bei der Bestimmung der Zwischenproduktmerkmale können u. a. die allgemeinen Merkmalslisten nach EICHGRÜN (2003) verwendet werden, welche in die Beschreibungsdimensionen *Geometrie*, *Oberfläche*, *Randzone* und *Werkstückkern* unterteilt sind und weitere Sub-Merkmalkategorien aufspannen. Diese systematische Betrachtung kann durch eine Dekomposition der Zwischenprodukte in die einzelnen Komponenten unterstützt werden, bspw. anhand eines hierarchischen Produktmodells und dessen Verknüpfung mit der Montageplanung. Letzteres wird am Beispiel einer Batteriezelle in REINHART ET AL. (2014) beschrieben. Störgrößen können mit Hilfe des Ursache-Wirkungs-Diagramms durch eine systematische Prüfung der Dimensionen *Mensch*, *Material*, *Umwelt*, *Maschine*, *Methode* und *Messung* nach DREWS & HILLEBRAND (2010) ergründet werden.

#### **4.2.2 Aufbau eines rechnerbasierten Akquise-Werkzeugs**

Das Werkzeug zur Befragung der Experten stellt das Kernelement der Methode zur Wissensakquisition dar und wurde bereits in WESTERMEIER ET AL. 2013 veröffentlicht. Für dessen Gestaltung sind die Eignung für komplexe Prozessketten mit vielen Systemelementen, ein durchgängiger Informationsfluss und eine einfache Anwendbarkeit von besonderer Bedeutung. Diese Anforderungen werden von keinem der etablierten Werkzeuge des Qualitätsmanagements erfüllt, wie der FMEA, der FTA und dem Ursache-Wirkungs-Diagramm. Darüber hinaus konnten in einer Marktrecherche keine geeigneten kommerziell erhältlichen Software-Produkte identifiziert werden. Deshalb wurde ein neues, rechnerbasiertes Akquise-Werkzeug mit Hilfe von Microsoft Excel® aufgebaut. Im Akquise-Werkzeug wird die herausfordernde Aufgabe zur Bewertung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen in einer komplexen

Prozesskette auf die Bewertung des Ein-/Ausgangsverhaltens von einzelnen Prozessen heruntergebrochen. Die Benutzeroberfläche ist dementsprechend in die einzelnen Prozesse gegliedert. Abbildung 16 zeigt einen schematischen Ausschnitt der Benutzeroberfläche zur Bewertung eines Prozesses. Die Gestaltung der Benutzeroberfläche ist an das Formblatt der FMEA angelehnt. In den Spalten *Potentielle Ursache* und *Potentielle Wirkung* erfolgt die Eingabe der am zu bewertenden Zusammenhang beteiligten Systemelemente. Wird eine grundlegende Prozesskettenbeschreibung entsprechend dem vorherigen Abschnitt hinterlegt, können in diesem Bereich mögliche Ursachen aus Ursachenkategorien und Wirkungen aus Wirkungskategorien aus Listen gewählt werden. Diese Listen korrespondieren mit den Subdomänen und Elementen des Beschreibungsmodells (siehe Tabelle 3). Existiert das gewünschte Element nicht in der Vorauswahl, kann eine Freitexteingabe der Ursachen und Folgen durchgeführt werden. Analog zum Beschreibungsmodell der Prozesskette ist die Menge der für einen Prozess  $i$  zur Auswahl stehenden Ursachen identisch mit den Einflussgrößen  $\underline{d}_i$ . Außerdem entsprechen die zur Auswahl stehenden Wirkungen den Zwischenproduktmerkmalen  $\underline{y}_i$ . Zusätzlich sollte jeder Ursache-Wirkungs-Zusammenhang durch die Beschreibung des vermuteten naturgesetzlichen Zusammenhangs detailliert werden. In den vier rechten Spalten erfolgt die Eingabe der qualitativen Bewertungen in den definierten Beschreibungsdimensionen mit Hilfe der Bewertungsskala nach Tabelle 5. Durch das Zusammenfassen mehrerer Zeilen besteht die Möglichkeit, die unterschiedlichen Ausprägungsformen von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen in komplexen Prozessketten nach Abschnitt 2.2.4 und nach Abbildung 3 aufzunehmen. Werden mehrere Ursachen oder Folgen in einem Zeilenblock angegeben, so werden diese jeweils mit einem logischen *UND* interpretiert. Demzufolge ist in den Zeilen 1 bis 3 von Abbildung 16 die Mehrfachwirkung einer Ursache beschrieben und in den Zeilen 4 und 5 eine Wechselwirkung von zwei Ursachen. Auf diese Weise lassen sich bereits in der deduktiv-qualitativen Analyse der Prozesskette *mehrfache Ursachen ohne Wechselwirkung*, *Wechselwirkungen* und *Mehrfachwirkungen* abbilden.

Zusammenfassend sind folgende Aspekte zum Werkzeug für die Akquise von Expertenwissen hervorzuheben:

- Die Bereitstellung vordefinierter Ursachen und Wirkungen entsprechend der grundlegenden Prozesskettenbeschreibung vereinfacht die Durchführung der Bewertungen. Darüber hinaus wird durch eine standardisierte Nomenklatur der Prozesskettenelemente eine einfache, rechnerbasierte Verknüpfung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen über die gesamte Prozesskette ermöglicht.

- Die Möglichkeit zur Eingabe von Freitext erlaubt den Experten eine restriktionsfreie Abbildung ihres Wissens und die Erweiterung bzw. Anpassung der bestehenden Prozesskettenbeschreibung. Der entstehende Mehraufwand zur Überprüfung von Freitexteingaben wird im folgenden Abschnitt adressiert.
- Bereits in der Phase der deduktiv-qualitativen Prozesskettenanalyse können für die induktiv-quantitativen Analysen entscheidende Informationen zu den Ausprägungsformen der komplexen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge gesammelt werden.

Zeilen-Nr.	potentielle Ursache		Zusammenhang	potentielle Wirkung		Bewertung			
	Ursachen-Kategorie	Ursache		Wirkungs-Kategorie	Wirkung	A	S <sub>A</sub>	B	S <sub>B</sub>
1	Subdomäne	Element	Naturgesetz, Phänomen, Erklärung,...	Subdomäne	Element	0...3	0...3	0...3	0...3
2				Subdomäne	Element			0...3	0...3
3				Subdomäne	Element			0...3	0...3
4	Subdomäne	Element	Naturgesetz, Phänomen, Erklärung,...	Subdomäne	Element	0...3	0...3	0...3	0...3
5	Subdomäne	Element				0...3	0...3		
6									

A: Expertenmeinung zur Wahrscheinlichkeit des Auftretens

S<sub>A</sub>: Selbstbewertung eines Experten zur Sicherheit der Bewertung von A

B: Expertenmeinung zur Stärke eines Kausalzusammenhangs

S<sub>B</sub>: Selbstbewertung eines Experten zur Sicherheit der Bewertung von B

Abbildung 16: Ausschnitt der Benutzeroberfläche des Werkzeugs zur Wissensakquisition

### 4.2.3 Durchführung der Expertenbefragung

Die Bedingungen zur Durchführung der deduktiv-qualitativen Prozesskettenanalyse werden anhand von drei Dimensionen beschrieben:

- personelle Besetzung
- zeitlicher Ablauf
- organisatorische Gestaltung

Die Methodik kann in einer projektähnlichen Organisationsstruktur umgesetzt werden. Dabei sollte der Projektleiter die theoretischen Methodenkenntnisse, die kapazitätsbezogenen Ressourcen zur Begleitung der deduktiven und induktiven Analysephasen und die sozialen Kompetenzen zur Moderation des Projektteams besitzen. Das Projektteam kann unternehmensinterne und -externe Experten für alle zu betrachten-

den Einzelprozesse umfassen. Hierfür eignen sich insbesondere Mitarbeiter der technischen Planung und der Technologieplanung. Darüber hinaus kann das Projektteam zeitweise durch projektfremde Mitarbeiter der Produktentwicklung, des Produktanwenders und der Anlagenlieferanten ergänzt werden. In der deduktiv-qualitativen Analysephase werden idealerweise zu jedem Prozess mehrere Experten befragt, um ein möglichst vollständiges Modell der Prozesskette zu erhalten. Die Durchführung der Expertenbefragung erfolgt in drei Schritten und ist in Abbildung 17 dargestellt.

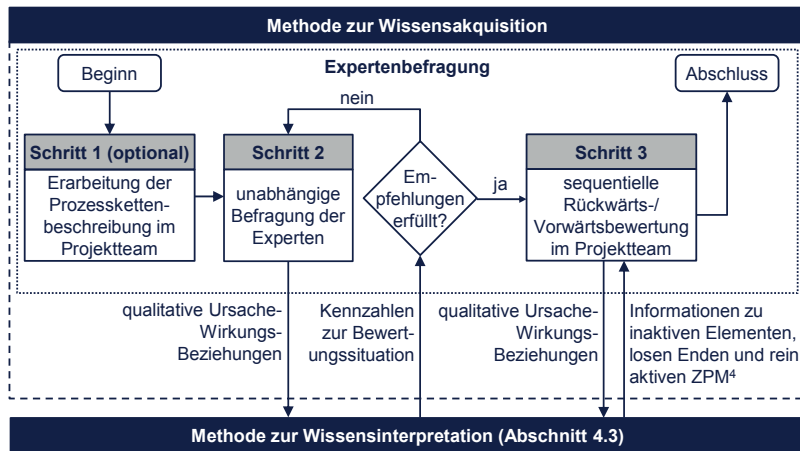


Abbildung 17: Detaillierte Ablaufstruktur der Expertenbefragung

Der erste Schritt dient der Erarbeitung der grundlegenden Prozesskettenbeschreibung (siehe Abschnitt 4.2.1) mit Hilfe des Projektteams, falls diese nicht vorliegt. Auf Basis dieser Beschreibung werden die Schritte 2 und 3 unter Verwendung des rechnerbasierten Akquise-Werkzeugs aus Abschnitt 4.2.2 durchgeführt. Im Rahmen von Schritt 2 erfolgt eine unabhängige Befragung der Mitglieder des Projektteams zu den einzelnen Prozessen entsprechend deren individuellen Expertisen. Ein Abgleich der Experteneingaben mit den in der Prozesskettenbeschreibung definierten Elementen legt die Freitexteingaben offen. Die Projektleitung prüft diese und entscheidet auf Basis der Zuordenbarkeit zu vorhandenen Prozesskettenelementen und dem sachlich logischen Beitrag zur Analyseaufgabe über den weiteren Umgang mit den Freitexteingaben (siehe Tabelle 9).

<sup>4</sup> Zwischenproduktmerkmalen

Tabelle 9: Fallunterscheidung zum Umgang mit Freitexteingaben

Nr.	Fall	Konsequenz
1	Die Freitexteingabe kann sinngemäß einem vorhandenen Element zugeordnet werden, lediglich die Bezeichnungen sind unterschiedlich.	Abgleich der Bezeichnungen der Prozesskettenelemente
2	Die Freitexteingabe kann keinem vorhandenen Element zugeordnet werden und liefert einen sachlich logischen Beitrag zur Analyse.	Erweiterung der Prozesskettenbeschreibung um ein neues Element
3	Die Freitexteingabe kann keinem vorhandenen Element zugeordnet werden und liefert keinen sachlich logischen Beitrag zur Analyse.	Hinterfragung und Zuordnung zu Fall 2 oder Entfernen der Freitexteingabe

Neben der Kontrolle von Freitexteingaben sind die Expertenbewertungen auf ihre formale Vollständigkeit zu prüfen. Eine vollständige Bewertung eines Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs enthält Eingaben in allen Spalten des Akquise-Werkzeugs. Diese Prüfung kann in der softwaretechnischen Realisierung der Auswertung oder als präventive Maßnahme zur Benutzerführung im Akquise-Werkzeug implementiert werden. Die Experteneingaben zu den Prozesskettenelementen und deren qualitative Ursache-Wirkungs-Beziehungen werden ausgewertet und interpretiert (Abschnitt 4.3). Die gesammelten und interpretierten Informationen sind die Grundlage für die Iteration von Schritt 2 und für die Durchführung von Schritt 3. Zur Beurteilung der inhaltlichen Vollständigkeit der Bewertungen zur gesamten Prozesskette im Rahmen von Schritt 2 werden in Tabelle 32 des Anhangs Leitfragen, Kennzahlen und Empfehlungen bereitgestellt. Abgeleitet aus der Zielsetzung für die deduktiv-qualitative Analyse und aus den Erfahrungen der Anwendung der Methode zur Wissensakquisition bieten diese Leitfragen, Kennzahlen und Empfehlungen eine Orientierungshilfe für den Übergang von Schritt 2 zu Schritt 3. Während für Schritt 2 Informationen zur Bewertungssituation der Prozesskettenelemente für die Beurteilung der Notwendigkeit weiterer Iterationen relevant sind, stehen für Schritt 3 Informationen zur Bewertung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Prozesskette im Vordergrund. Beispiele hierfür sind *inaktive Elemente* (engl. *isolated nodes*), *lose Enden* (engl. *end nodes*) und *rein aktive Zwischenproduktmerkmale* (engl. *start nodes*) entsprechend MAURER (2007). Im Sinne fertigungstechnischer Prozessketten sind inaktive Elemente Prozesskettenelemente, welche weder als Ursache noch als Wirkung auftreten. Lose Enden treten ausschließlich als Wirkung auf, ohne andere Elemente zu beeinflussen (siehe Abbildung 18). Rein aktive Zwischenproduktmerkmale treten als Ursache auf, werden aber von keinem anderen Element beeinflusst.

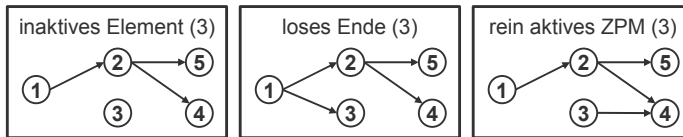


Abbildung 18: Darstellung von inaktiven Elementen, losen Enden und rein aktiven Zwischenproduktmerkmalen in Ursache-Wirkungen-Ketten

In Schritt 3 erfolgt eine sequentielle Analyse der Prozesskette. Diese kann vorwärtsgerichtet, also vom ersten bis zum letzten Prozess, oder rückwärtsgerichtet, vom letzten bis zum ersten Prozess, erfolgen (SCHÄFER 2003). Ziel von Schritt 3 ist die gezielte Vervollständigung der prozessübergreifenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den Prozesskettenelementen. Hierbei gilt es, die inaktiven Elemente, losen Enden und rein aktiven Zwischenproduktmerkmale gezielt zu hinterfragen und deren Anzahl zu reduzieren.

Die Befragung der Experten in Schritt 2 kann sowohl einzeln als auch in Gruppen durchgeführt werden. Für Schritt 3 bietet sich eine Befragungssitzung mit Workshop-Charakter unter Einbeziehung des gesamten Projektteams an. Da sich die Bewertungssituation zur Prozesskette bzgl. der losen Enden und inaktiven Elementen mit jeder neuen Bewertung ändern kann, ist eine „Echtzeit-Auswertung“ dieser Informationen sinnvoll. In Verbindung mit einer sequentiellen Abarbeitung der Prozesse können den Experten jeweils die zum aktuellen Prozess zu hinterfragenden Elemente visualisiert werden, unter Berücksichtigung der Bewertungen zu den vorherigen Prozessen. Auf diese Weise werden den Experten die Wissenslücken zur Prozesskette systematisch zur Bewertung vorgelegt. Zur Beschleunigung der Befragung ist jeder Experte zur Interaktion mit dem Akquise-Werkzeug zu befähigen, bspw. durch eine Einweisung und entsprechende Rechnerinfrastruktur im Workshop. Darüber hinaus ist die Anwesenheit eines Moderators zur Klärung operationaler Fragen zielführend. Eine stringente Moderation mit festgelegten Zeitintervallen zur Bewertung der einzelnen Prozesse ermöglicht die Bewertung kompletter Prozessketten in vertretbaren Zeiträumen. Zur Gewährleistung eines einheitlichen Verständnisses für die zu bewertenden Zusammenhänge ist die Visualisierung der Prozesse mit allen Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie der gesamten Prozesskette von großer Bedeutung.

Nach der Durchführung der Expertenbefragung unter Verwendung des vorgestellten Akquise-Werkzeugs und der beschriebenen Vorgehensweise für dessen Anwendung liegen folgende Informationen vor:



1. eine konkretisierte Beschreibung der Struktur und der Elemente der fertigungstechnischen Prozesskette als Ergebnis einer iterativen Konstruktion und Anpassung auf Basis von Expertenwissen und unternehmensinternen Dokumentationen
2. qualitative Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge dokumentiert in prozessbezogenen Tabellen

Der Umfang und die Struktur der Informationen ist konform mit dem Beschreibungsmodell nach Abschnitt 3.5.1. Im Rahmen eines schrittweisen, systematischen Vorgehens zur Akquisition der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in Verbindung mit definierten Richtlinien und Kennzahlen zur Beurteilung der Informationslage wird die Vollständigkeit der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Prozesskette auf Basis des zur Verfügung stehenden Wissens gewährleistet. Diese Informationen stellen die Grundlage für den Aufbau des qualitativen Erklärungsmodells und dessen Interpretation dar.

## **4.3 Methode zur Wissensinterpretation**

### **4.3.1 Ablauf der Interpretation und Reduktion**

Die Methode zur Wissensinterpretation für komplexe Prozessketten ist der deduktiv-qualitativen Analysephase der Methodik zuzuordnen und wurde bereits teilweise in WESTERMEIER ET AL. (2014) veröffentlicht. Dabei stellt die Methode zur Wissensinterpretation das Bindeglied zwischen der vorgelagerten Methode zur Wissensakquisition und der nachgelagerten induktiv-quantitativen Analyse dar. Das qualitative Erklärungsmodell wird aus dem qualitativen Wissen über die Prozesskettenelemente und deren Ursache-Wirkungs-Beziehungen aufgebaut (Abschnitt 4.3.2). Mit Hilfe der Ermittlung weiterer Wissensbedarfe durch eine iterative Anwendung der Methode der Wissensinterpretation wird die Wissenssammlung zielgerichtet vervollständigt (Abschnitt 4.3.3). Nach Abschluss der Akquisephase werden die für die empirische Analyse relevanten Systemelemente und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge identifiziert (Abschnitt 4.3.4). Hierzu wird das qualitative Erklärungsmodell durch die Anwendung einer Pareto-Analyse und die Bewertung der Qualitätsrelevanz auf die bedeutendsten Zusammenhänge und Systemelemente mit Einfluss auf die Fertigproduktqualität reduziert. Die Ergebnisse der empirischen Prozesskettenanalyse können durch eine Transformation (siehe Abschnitt 4.4.8) in das qualitative Erklä-

rungsmodell zurückgeführt werden, um wiederum für nachfolgende empirische Analysen eine aktuelle Planungsgrundlage zu erzeugen. Der Ablauf der Methode zur Wissensinterpretation ist in Abbildung 19 veranschaulicht.

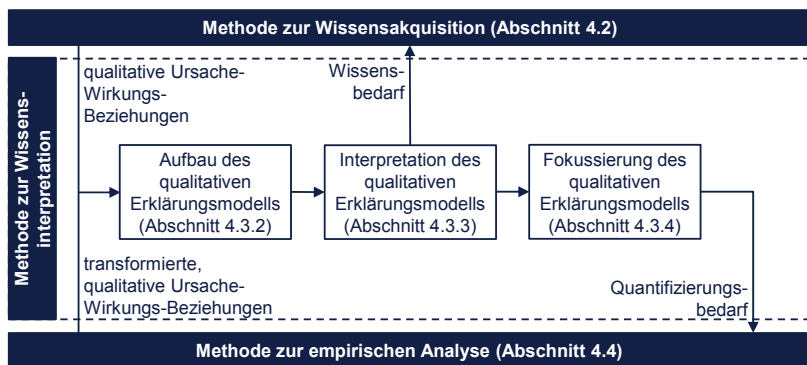


Abbildung 19: Ablauf der Methode zur Wissensinterpretation

### 4.3.2 Aufbau des qualitativen Erklärungsmodells

Das qualitative Erklärungsmodell wird aus der konkretisierten Prozesskettenbeschreibung und den gesammelten qualitativen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen erstellt. Aufgrund der Verwendung einer identischen Prozesskettenbeschreibung, sowohl für den Aufbau der Erklärungsmodelle als auch für das Akquise-Werkzeug, können die Informationen durch einen einfachen Abgleich der Einträge im Akquise-Werkzeug in die Spalten und Zeilen der MDM übertragen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zu gleichen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen mehrere Expertenmeinungen vorliegen können. Diese Mehrfachmeinungen sind mit den Gleichungen (3.11) und (3.12) zu verrechnen. Das Vorgehen zur Übertragung der Expertenbewertungen aus dem Akquise-Werkzeug in die MDM ist in Abbildung 20 an einem einfachen Beispiel für die Bedeutungswerte dargestellt. Zum Aufbau des vollständigen Erklärungsmodells ist dieses Vorgehen analog auf die anderen Beschreibungsdimensionen zu übertragen. Entsprechend der Ausführungen in Abschnitt 4.2.2 können Experten im Akquise-Werkzeug auch Wechselwirkungen von Ursachen abbilden. Für den Aufbau des Erklärungsmodells der Wechselwirkungen sind die Tabellen des Akquise-Werkzeugs auf Einträge von mehreren Ursachen in einem Zeilenblock zu prüfen. Die Information zu einer Wechselwirkung ist in  $\underline{M}^{int}$  in der entsprechenden Zeile und Spalte durch die Eintragung einer  $I$  zu übertragen. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 20 visualisiert. Dabei ist zu beachten, dass sich in der zweidimensionalen MDM nur Wechselwirkungen zweier Faktoren abbilden lassen.

Darüber hinaus geht durch die Eintragung in  $\underline{M}^{int}$  die Zuordnung der Wechselwirkung zum konkreten Ursache-Wirkungs-Zusammenhang verloren. Für die induktive Analysephase bleiben die Informationen erhalten, zwischen welchen Faktoren grundsätzlich mit Wechselwirkungen zu rechnen ist. Außerdem ist auf Basis von  $\underline{M}_B$  das Erklärungsmodell der indirekten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Prozesskette  $\underline{M}_B^{ind}$  unter Anwendung des Algorithmus aus Abschnitt 3.5.2 zu erstellen. Somit wurde das qualitative Erklärungsmodell für komplexe, fertigungstechnische Prozessketten vollständig aus den im Akquise-Werkzeug gespeicherten Erkenntnissen aus der Expertenbefragung aufgebaut.

Zeilen-Nr.	potentielle Ursache		Zusammenhang	potentielle Wirkung		Bewertung			
	Ursachen-Kategorie	Ursache		Wirkungs-Kategorie	Wirkung	A	S <sub>A</sub>	B	S <sub>B</sub>
1	PP	PP_1	Erfahrung_1	Komponente_1	ZPM_1	2	3	3	3
2									
3									
4	PP	PP_1	Vermutung_1	Komponente_1	ZPM_2	3	3	2	1
5	EP_1	EPM_2				2	2		
6									

	EPM_2	PP_1	ZPM_1	ZPM_2
EPM_2	-	1	0	0
PP_1	-	-	0	0
ZPM_1	-	-	-	0
ZPM_2	-	-	-	-

	EPM_2	PP_1	ZPM_1	ZPM_2
EPM_2	0	0	0	2
PP_1	0	0	3	2
ZPM_1	0	0	0	0
ZPM_2	0	0	0	0

EP: Eingangsprodukt, EPM: Eingangsproduktmerkmal  
ZPM: Zwischenproduktmerkmal, PP: Prozessparameter

Abbildung 20: Übertragung von Wechselwirkungen in die MDM  $\underline{M}^{int}$  und von einfachen Ursache-Wirkungs-Beziehungen in die MDM  $\underline{M}_B$

### 4.3.3 Interpretation des qualitativen Erklärungsmodells

Die Werkzeuge und Kennzahlen zur Interpretation des qualitativen Erklärungsmodells sind prinzipiell unabhängig vom Wissensursprung (deduktive oder induktive Analyse). Die Aktiv- und Passivsummen der MDM-basierten Erklärungsmodelle stellen die Grundlage für eine Reihe von Interpretationsmöglichkeiten des gesammelten Wissens dar. Auf Basis der Definition der Aktiv- und Passivsumme nach Abschnitt 2.5.2 und des hier verwendeten MDM-Aufbaus können die Aktiv- und Passivsummen mit den Gleichungen (4.1) und (4.2) ermittelt werden. Die Aktivsumme  $AS_z$

entspricht der Zeilensumme der Zeile  $z$  der zu interpretierenden MDM und die Passivsumme  $PS_s$  der Spaltensumme der Spalte  $s$ . Die symmetrischen MDM des Erklärungsmodells haben die Dimensionen  $p \times p$ . Dabei entspricht  $p$  der Anzahl der Prozesskettenelemente.  $M_{z,s}$  repräsentiert einen Eintrag in der betrachteten MDM.

$$AS_z = \sum_{s=1}^p M_{z,s} \quad (4.1)$$

$$PS_s = \sum_{z=1}^p M_{z,s} \quad (4.2)$$

Die Aktiv- und Passivsummen können prinzipiell auf jede MDM des Erklärungsmodells angewandt werden. Nach MAURER (2007) ist unter diesen Kennzahlen die Summe der Gewichte der auf ein Element wirkenden bzw. von einem Element ausgehenden Wirkungen zu verstehen. Im Rahmen des in dieser Arbeit aufgebauten Begriffssystems für die Analyse fertigungstechnischer Prozessketten wird das Gewicht von Ursache-Wirkungs-Beziehungen durch deren Bedeutungswert  $B$  zum Ausdruck gebracht. Dementsprechend werden die Aktiv- und Passivsumme im Weiteren zur Interpretation der MDM der Bedeutung  $\underline{M}_B$  und der MDM der indirekten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge  $\underline{M}_B^{ind}$  eingesetzt. Im Sinne der Anwendung auf fertigungstechnische Prozessketten spiegelt die Aktivsumme die Anzahl und die Bedeutungen der von einem Prozesskettenelement ausgehenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen wider. Aktive Elemente haben also eine große Wirkung auf die in der Prozesskette folgenden Elemente. Die Passivsumme ist konträr zu interpretieren. Passive Prozesskettenelemente werden von in der Prozesskette vorgelagerten Elementen stark beeinflusst. Abgeleitet aus der dargestellten Prozesskettendefinition sind Eingangsproduktmerkmale sowie Stell- und Störgrößen rein aktive Elemente, da diese nicht von der Prozesskette beeinflusst werden. Zwischenproduktmerkmale und Zustandsgrößen können sowohl eine Aktiv- als auch eine Passivsumme ungleich null besitzen, während die Qualitätsmerkmale des Fertigproduktes rein passive Elemente darstellen. Unter diesen Randbedingungen werden in der Interpretation des qualitativen Erklärungsmodells Kenngrößen für die Identifikation von Wissensbedarfen und Entscheidungshilfen für die empirische Prozesskettenanalyse abgeleitet.

### **Identifikation von Wissensbedarfen**

Wissensbedarfe im qualitativen Erklärungsmodell werden anhand der MDM der Bedeutungen  $\underline{M}_B$  identifiziert. Diese Informationen werden im Schritt 3 der Expertenbefragung verwendet (siehe Abschnitt 4.2.3). Die folgenden Kennzahlen stellen eine Übertragung der allgemeinen Kriterien *isolated nodes*, *end nodes* und *start nodes* für

die Analyse von Knoten und Kanten nach MAURER (2007) auf die Anwendung in fertigungstechnischen Prozessketten dar.

- **inaktive Elemente:**  $AS = 0, PS = 0$   
Inaktive Elemente wurden von den Experten bewusst oder unbewusst nicht bewertet bzw. bewusst in Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen mit Bedeutungswerten gleich null eingetragen. Die Existenz inaktiver Elemente in fertigungstechnischen Prozessketten ist plausibel. Trotzdem wird empfohlen, diese Elemente gezielt zu hinterfragen.
- **lose Enden:**  $AS = 0, PS \neq 0$   
Diese Elemente stellen das Ende einer oder mehrerer Ursache-Wirkungs-Ketten dar. Vorhergehende Elemente wirken auf dieses Element. Eine Veränderung dieses Elementes bewirkt aber keine Veränderung anderer Elemente. Lose Enden existieren in fertigungstechnischen Prozessketten, sollten aber hinterfragt werden.
- **rein aktive Zwischenproduktmerkmale:**  $AS \neq 0, PS = 0$   
Zwischenproduktmerkmale sind Ausgangsgrößen eines Prozesses und Eingangsgrößen des folgenden Prozesses. Folglich sollten Zwischenproduktmerkmale sowohl eine Aktiv- als auch eine Passivsumme ungleich null aufweisen. Andernfalls sind entsprechende Ursache-Wirkungs-Beziehungen nachzutragen. Häufig werden Zwischenproduktmerkmale in Prozessen nicht verändert.

### Entscheidungshilfen für die empirische Prozesskettenanalyse

Für die Planung der empirischen Prozesskettenanalyse können aus den Erklärungsmodellen hilfreiche Entscheidungsgrundlagen abgeleitet werden. Diese sind untergliedert in prozessspezifische Kennzahlen auf Basis der MDM  $\underline{M}_B$  und in prozessübergreifende Kennzahlen auf Basis der MDM der direkten und indirekten Bedeutungen.

#### **Prozessspezifische Kennzahlen:**

- **Aktivsumme der Stellgrößen:** Je größer die Aktivsumme einer Stellgröße ist, desto größer ist deren Einfluss auf das Zwischenprodukt. Wird ein Prozess empirisch analysiert, kann die Priorisierung der zu berücksichtigenden Faktoren mit Hilfe der jeweiligen Aktivsummen erfolgen.
- **Aktivsumme der Störgrößen:** Je größer die Aktivsumme einer Störgröße ist, desto größer ist deren Einfluss auf die Prozessdurchführung sowie die Qualität der Zwischen- und Fertigprodukte. Um die Gültigkeit des Ceteris-Paribus-

Prinzips sicherzustellen, kann die Aktivsumme als Entscheidungshilfe für die Einleitung von Maßnahmen zur Elimination von Störeinflüssen herangezogen werden.

- **Aktivität eines Prozesses  $Ak_i$ :** Im Rahmen der Analyse fertigungstechnischer Prozessketten wird die Aktivität eines Prozesses  $i$  als Quotient aus der Anzahl sowie der Bedeutung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge auf Basis der Stellgrößen  $\underline{x}_i$  und den Einflussgrößen  $\underline{d}_i$  ohne  $\underline{x}_i$  definiert. Dieser Zusammenhang wird in Gleichung (4.3) unter Verwendung der Matrixnormen der entsprechenden DMM, welche Submatrizen der MDM  $\underline{M}_B$  darstellen, mathematisch abgebildet. Als Matrixnorm kann bspw. die Frobenius-Norm verwendet werden (HERRMANN 2007). Aus dieser Kennzahl lässt sich die Aussage ableiten, ob die Zwischenproduktmerkmale  $\underline{y}_i$  vorwiegend durch die Prozessführung ( $Ak_i \rightarrow 1$ ) oder durch Störgrößen und Produktmerkmale am Prozesseingang ( $Ak_i \rightarrow 0$ ) beeinflusst werden. Mit dieser Information kann wiederum der Fokus einer empirischen Prozessanalyse gewählt werden.

$$Ak_i = \frac{\|DMM_{\underline{x}_i \rightarrow \underline{y}_i}\|}{\|DMM_{\underline{z}_i, \underline{z}_{i-1}, \underline{z}_{i-2} \rightarrow \underline{y}_i}\| + \|DMM_{\underline{x}_i \rightarrow \underline{y}_i}\|} \quad (4.3)$$

#### Prozessübergreifende Kennzahlen:

- **Aktivsumme der Eingangsprodukte:** Die Aktivsumme der Eingangsprodukte ist die Summe der Aktivsummen der Domäne eines spezifischen Eingangsproduktes. Je größer diese Kennzahl ist, desto stärker ist der Einfluss des Eingangsproduktes auf die Prozesskette. Diese Information kann bei der Planung von prozessbezogenen und prozessübergreifenden Experimenten und bei der Auslegung von Qualitätssicherungsmaßnahmen verwendet werden. Detaillierte Informationen können aus den Aktivsummen der einzelnen Eingangsproduktmerkmale gewonnen werden.
- **Passivsumme der Qualitätsmerkmale:** Je größer die Passivsumme eines Qualitätsmerkmals ist, desto stärker wird dieses durch die Prozesskette beeinflusst. Diese Kennzahl ist also ein Maß für den Produktionseinfluss auf die Qualität bzw. die einzelnen Qualitätsmerkmale. Durch den Ausschluss der Eingangsproduktomänen bei der Berechnung der Passivsummen kann die Aussagekraft verstärkt werden. Damit wird ein grundsätzliches Verständnis geschaffen, welche Qualitätsmerkmale für die empirische Prozesskettenanalyse besonders interessant sind bzw. bei welchen der Stellhebel der Produktion besonders groß ist.

- **Qualitätsrelevanz  $AS_z^{QR}$** : Die Qualitätsrelevanz eines Prozesskettenelements in der Zeile  $z$  berechnet sich nach Gleichung (4.4) aus dessen Aktivsummen der MDM  $\underline{M}_B$  und  $\underline{M}_B^{ind}$  eingeschränkt auf die Spalten der Domäne der Qualitätsmerkmale. Dabei entspricht  $r$  der Anzahl der Qualitätsmerkmale. Elemente, welche in diesen Spalten keine Einträge aufweisen, wirken auf kein Qualitätsmerkmal. Somit können unter Einbeziehung der indirekten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge alle Elemente bestimmt werden, welche einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Qualität des Fertigproduktes haben.

$$AS_z^{QR} = \sum_{s=p-r}^p M_{z,s} + M_{z,s}^{ind} \quad (4.4)$$

#### 4.3.4 Fokussierung des qualitativen Erklärungsmodells

Im Sinne der allgemeinen Prinzipien des Komplexitätsmanagements ist zur Beherrschung der Vielzahl der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und Elemente in komplexen, fertigungstechnischen Prozessketten eine Fokussierung auf die Wichtigsten mit Hilfe von Reduktionsmaßnahmen zielführend. Insbesondere zur Vorbereitung der induktiv-labororientierten Analyse der Prozesskette gilt es, die zu untersuchenden Zusammenhänge auf ein handhabbares Maß zu begrenzen. Dementsprechend folgt an dieser Stelle eine Reduktion des qualitativen Erklärungsmodells auf die bedeutendsten Zusammenhänge mit Einfluss auf die Qualität des Fertigproduktes. Zum einen wird eine Kategorisierung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge mit Hilfe einer Pareto-Analyse durchgeführt. Zum anderen werden nicht qualitätsrelevante Prozesskettenelemente entsprechend der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Qualitätsrelevanz identifiziert und ausgeschlossen.

Für das strukturelle Komplexitätsmanagement stellt MAURER (2007) eine ABC-Analyse vor, welche auf die Systemstruktur abzielt. Beispielsweise können aus der Häufigkeit, mit der Zusammenhänge in Rückkopplungen beteiligt sind, Maßnahmen zur Umstrukturierung eines Systems abgeleitet werden. Darüber hinaus wendet WERDICH (2011) die Pareto-Analyse auf eine FMEA zur Identifikation der bedeutendsten Ursachen an. In der vorliegenden Arbeit basiert die Pareto-Analyse nicht auf der Risikoprioritätszahl der FMEA, sondern auf dem Risiko, wie es im Risikomanagement verwendet wird. Das *Risiko*  $R$  eines Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs wird als Produkt aus Auftretenswahrscheinlichkeit und Bedeutung (CLARKSON ET AL. 2004) entsprechend Gleichung (4.5) definiert. Dabei werden nur Zusammenhänge in der Pareto-Analyse berücksichtigt, deren Auftretenswahrscheinlichkeit und Bedeutung

von den Experten mit einer hohen Bewertungssicherheit angegeben wurden. Der Sicherheits-Grenzwert zur Berücksichtigung von Zusammenhängen in der Pareto-Analyse kann mit  $S_{Grenz}$  festgelegt werden. Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, welche eine geringere Bewertungssicherheit aufweisen, werden nicht betrachtet und verbleiben unverändert im qualitativen Erklärungsmodell.

$$R_{z,s} = A_{z,s} B_{z,s} \quad \forall z, s \text{ mit } S_{A_{z,s}}, S_{B_{z,s}} \geq S_{Grenz} \quad (4.5)$$

Auf Basis dieser Risikodefinition wird die Pareto-Analyse durchgeführt. Hierzu werden Risikoklassen definiert und über die Anzahl der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge je Klasse das Gesamtrisiko jeder Klasse berechnet. Die Darstellung des Risikos der einzelnen Klassen über dem kumulierten Gesamtrisiko führt zum Pareto-Diagramm. Entsprechend der ABC-Analyse werden die Risikoklassen anhand ihres kumulierten Anteils am Gesamtrisiko in die Kategorien A, B und C eingeteilt (BLOHM 1997, KIENER 2006 und HOPP & SPEARMAN 2008). Dabei stellt A die Kategorie mit dem Größten (i. d. R. 60-85 %) und C mit dem geringsten kumulierten Gesamtrisiko (i. d. R. 5-15 %) dar (GIENKE & KÄMPF 2007). In Abhängigkeit der Definition dieser Kategorien und dem anzustrebenden Reduktionsgrad des qualitativen Erklärungsmodells können nun die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge der Kategorie C oder der Kategorien B und C auf Grund des geringen kumulierten Gesamtrisikos ausgeschlossen werden. Das heißt, dass Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge mit einer hohen Bewertungssicherheit von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden, wenn deren Bedeutung oder deren Auftretenswahrscheinlichkeit oder beide Bewertungen gering sind. In den qualitativen Erklärungsmodellen erfolgt der Ausschluss einzelner Ursache-Wirkungs-Beziehungen durch Löschen der Einträge in den entsprechenden Zeilen  $z$  und Spalten  $s$ . Dies kann entweder in den bestehenden MDM oder zur Aufrechterhaltung des Informationsstandes in neuen Versionen durchgeführt werden. Die Pareto-Analyse der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge wird in Kapitel 5 angewendet.

Das verbleibende qualitative Erklärungsmodell wird bzgl. der Qualitätsrelevanz der Systemelemente analysiert. Im Sinne einer zielorientierten Systemanalyse werden alle Elemente aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, welche keinen Einfluss auf die Qualität des Fertigproduktes aufweisen ( $AS_z^{QR} = 0$ ). Der Ausschluss eines Systemelementes kann entweder durch das Löschen aller Einträge in der entsprechende Zeile  $z$  und Spalte  $s$  oder durch das Entfernen des Systemelementes aus der grundlegenden Prozesskettenbeschreibung und dem Prozesskettenvektor  $\underline{m}$  umgesetzt werden. Somit werden in der weiteren empirischen Analyse der Prozesskette ausschließlich Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge betrachtet, welchen unsichere



Expertenbewertungen zu Grunde liegen oder welche mit hoher Sicherheit einen Einfluss auf die Fertigproduktqualität besitzen.

## 4.4 Methode zur empirischen Analyse

Die Methode zur empirischen Analyse komplexer Prozessketten verfolgt zwei Ziele: Zum einen gilt es, das übergeordnete Analyseziel der Arbeit durch die Identifikation formelmäßiger Zusammenhänge zwischen den Qualitätsmerkmalen und den bedeutendsten Qualitätseinflüssen zu erreichen und dieses Wissen im quantitativen Erklärungsmodell abzubilden. Zum anderen sind die Ergebnisse durch eine Transformation in das qualitative Erklärungsmodell zurückzuführen, um qualitative Interpretationen zum Prozesskettenverhalten sowie weitere empirische Analysen auf Basis einer aktuellen Planungsgrundlage zu ermöglichen. Die grundsätzliche Vorgehensweise der Methode stützt sich auf die allgemeine Vorgehensweise der SVM (siehe Abschnitt 2.3.2): *Definition des Untersuchungsumfangs, Auswahl der Versuchsstrategie, Versuchsdurchführung, Versuchsauswertung und Validierung*. Zur Erreichung der genannten Ziele im Zusammenhang mit komplexen, fertigungstechnischen Prozessketten wird diese Vorgehensweise in Anlehnung an WESTERMEIER ET AL. (2014) um vier wesentliche Elemente erweitert:

1. die grundsätzliche Gliederung in prozessbezogene und prozessübergreifende Untersuchungsphasen mit spezifischen Randbedingungen und definierten Schnittstellen (Abschnitt 4.4.1)
2. die systematische Definition des Untersuchungsumfangs mit Hilfe des qualitativen Erklärungsmodells einhergehend mit einer systematischen Absicherung der Untersuchungen gegenüber Störeinflüssen (Abschnitt 4.4.2) sowie einer angepassten Versuchsstrategie (Abschnitt 4.4.3)
3. die Unterstützung der Versuchsdurchführung mit aus dem qualitativen Erklärungsmodell ableitbaren Elementen (Abschnitt 4.4.4)
4. die Verknüpfung der Versuchsergebnisse mit dem qualitativen Erklärungsmodell und der Aufbau eines quantitativen Erklärungsmodells für fertigungstechnische Prozessketten (4.4.8)

### 4.4.1 Phasengliederung der empirischen Analyse

Das strukturorientierte Beschreibungsmodell fertigungstechnischer Prozessketten basiert auf der Betrachtung des Ein-/Ausgangsverhaltens der  $n$  Prozesse und deren Verkettung über die Merkmale der Zwischenprodukte. Zur Sicherstellung der Integrität der Versuchsergebnisse ist dieses grundsätzliche Prozesskettenverständnis auf die

empirische Analyse der Prozesskette zu übertragen. Daraus ergibt sich eine erste Analysephase, welche das Ein-/Ausgangsverhalten der einzelnen Prozesse untersucht. Ausgehend von im Untersuchungsgebiet grundsätzlich funktionsfähigen Prozessen und Anlagen gilt es, das im qualitativen Erklärungsmodell abgebildete Prozessverständnis zu überprüfen und zu quantifizieren. Hierbei liegt der Fokus auf Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen zwischen Stellgrößen und Zwischenproduktmerkmalen am Prozessausgang. Dem Einfluss von Störgrößen und unbekannten oder streuenden Zwischenproduktmerkmalen kann mit Maßnahmen wie der Randomisierung und der Blockbildung begegnet werden (siehe hierzu Abschnitt 4.4.3). Ein weiteres Ziel dieser ersten Phase ist es, jeden Prozess zur reproduzierbaren Herstellung definierter Merkmalswerte des jeweiligen Zwischenproduktes zu befähigen.

Eine Herausforderung der empirischen Untersuchung fertigungstechnischer Prozessketten ist die Messbarkeit der Zwischenproduktmerkmale. Insbesondere in Prozessketten mit Montageschritten kommen Zwischenproduktmerkmale vor, welche nur zerstörend oder mit hohem Aufwand zerstörungsfrei messbar sind. Somit können prozessübergreifende Zusammenhänge nach dem oben beschriebenen Vorgehen nicht untersucht werden. Für die Untersuchung der Produktionseinflüsse auf die Qualitätsmerkmale in komplexen Prozessketten stellt dies den Regelfall dar. Dementsprechend bedarf es für die Untersuchungen der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Merkmalen verschiedener Zwischenprodukte bzw. von Zwischenproduktmerkmalen und Qualitätsmerkmalen eine alternative Vorgehensweise unter Anwendung der Analyseergebnisse aus der ersten Phase. Hierzu werden in einer zweiten Analysephase die interessanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge mit Hilfe prozessübergreifender Versuchspläne untersucht. Dies erfolgt mit Unterstützung des qualitativen Erklärungsmodells hinsichtlich der Auswahl der zu untersuchenden Zusammenhänge und der Ableitung von Maßnahmen zur Durchführung der labororientierten Experimente.

Die empirische Analyse gliedert sich also in zwei zeitlich aufeinanderfolgende Phasen: Eine prozessbezogene Phase 1 und eine prozessübergreifende Phase 2. Die Ergebnisse beider Phasen werden zum einen durch Transformation in das qualitative Erklärungsmodell zurückgeführt und zum anderen in das quantitative Erklärungsmodell aufgenommen. Für beide Analysephasen liefert das qualitative Erklärungsmodell die Planungsgrundlage. Diese Phasengliederung ist in Abbildung 21 visualisiert.

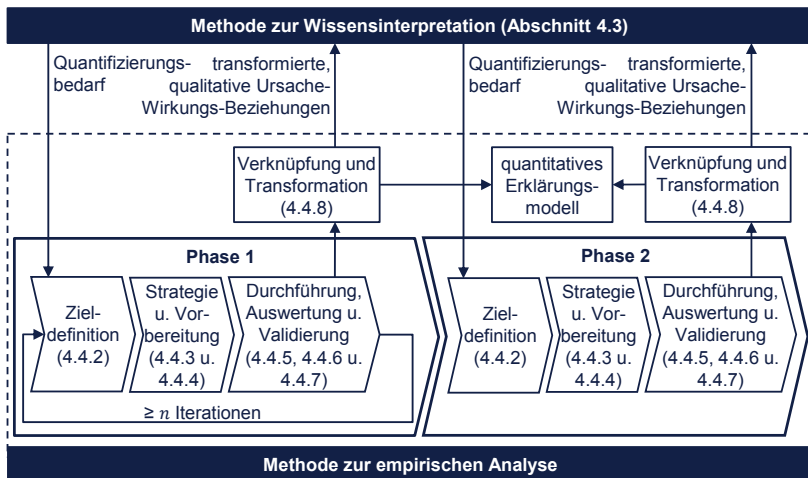


Abbildung 21: Phasengliederung der empirischen Prozesskettenanalyse

#### 4.4.2 Definition des Untersuchungsumfangs

Abgeleitet aus den übergeordneten Zielen der empirischen Prozesskettenanalyse und deren Phasengliederung sind die phasenspezifischen Untersuchungsumfänge zu definieren. Auf Basis der in Abschnitt 4.3.4 durchgeführten Fokussierung des qualitativen Erklärungsmodells sind an dieser Stelle die konkreten Faktoren und Zielgrößen der empirischen Analysen festzulegen. Hierzu werden in einem ersten Schritt unabhängig von der Analysephase die im qualitativen Erklärungsmodell verbliebenen Elemente und Zusammenhänge bzgl. der *Messbarkeit*, *Variation* und *Determiniertheit* bewertet. Anhand dieser Bewertung erfolgt die Auswahl der Faktoren und Zielgrößen für die prozessbezogene und prozessübergreifende Analysephase.

#### Messbarkeit, Variation und Determiniertheit

**Messbarkeit von Zwischenproduktmerkmalen:** Zur Vorbereitung der Versuchsdurchführung werden in Abschnitt 4.4.4 Prüfpläne für Eingangs- und Zwischenproduktmerkmale auf Basis des qualitativen Erklärungsmodells erarbeitet. Die merkmalsbezogenen Informationen *zerstörungsfrei messbar*, *zerstörend messbar* und *nicht messbar* fließen in die Definition der Analyseziele entsprechend Tabelle 10 ein. Durch Zerstörung messbare Merkmale können als Zielgrößen empirischer Untersuchungen verwendet werden. Existieren weitere Zielgrößen, so kann Mehraufwand für die Herstellung mehrerer, möglichst identischer Versuchsträger zur Ermittlung aller

Zielgrößen notwendig sein. Als Faktoren können zerstörend messbare Merkmale nur verwendet werden, wenn entweder identische Versuchsträger für die zerstörende Messung und für die Weiterverarbeitung hergestellt werden oder wenn ein Prozessmodell existiert, mit dessen Hilfe das Merkmal auf Basis der Prozesseingangsgrößen sicher prognostiziert werden kann. Letzteres ist für die prozessübergreifende Analysephase auf Basis der Erkenntnisse aus den prozessbezogenen Analysen vorstellbar. Aufgrund der mit diesen Abhilfemaßnahmen einhergehenden Unsicherheiten ist eine derartige Anwendung auf Ausnahmen zu beschränken.

*Tabelle 10: Erste Entscheidungstabelle für die Berücksichtigung von ZPM in empirischen Analysen*

Messbarkeit der ZPM	ZPM als Faktor	ZPM als Zielgröße
zerstörungsfrei	ja	ja
zerstörend	ja, in Ausnahmefällen	ja, mit Mehraufwand und Einschränkungen
nicht messbar	nein	nein

**Variation von Stellgrößen und die daraus resultierende Veränderlichkeit von Zwischenproduktmerkmalen:** In Abhängigkeit des Planungs- und Umsetzungsstadiums der zu analysierenden Prozesskette bzw. des betrachteten Prozesses sowie der spezifischen Untersuchungsinteressen und -möglichkeiten sind aus den im qualitativen Erklärungsmodell angegebenen Stellgrößen diejenigen auszuwählen, welche in einer empirischen Analyse tatsächlich variiert werden sollen. Die Nicht-Variation von Stellgrößen resultiert bspw. aus einer zeitlichen Priorisierung der Untersuchungen bestimmter Stellgrößen oder aus einer Aufwandsabschätzung, falls bspw. die Variation einer Stellgröße nur durch eine Modifikation des anlagentechnischen Aufbaus realisiert werden kann. Die stellgrößenbezogenen Informationen *variabel* oder *nicht variabel* sind von den Prozessexperten bzw. den Prozess- oder Anlagenverantwortlichen abzufragen und bspw. in einer untersuchungsbezogenen Liste zu dokumentieren. Nicht variable Stellgrößen scheiden für die Versuchsplanung als Faktoren aus. Die Nicht-Variation von Stellgrößen kann die Nicht-Veränderlichkeit von Zwischenproduktmerkmalen bedingen. Neue, rein aktive Zwischenproduktmerkmale können in der MDM durch eine Passivsumme gleich null identifiziert werden. Diese Elemente sind keine Zielgrößen der Versuchsplanung.

**Determiniertheit von Zwischenproduktmerkmalen und daraus resultierende Nicht-Variation von Stellgrößen:** Determinierte Zwischenproduktmerkmale kommen nur als Zielgrößen einer empirischen Untersuchung in Frage, wenn die beeinflussenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge gänzlich oder teilweise unbekannt

sind. Andernfalls sind diese aus der empirischen Analyse auszuschließen. Ein Beispiel aus der Herstellung von Batteriezellen ist die Sollwertvorgabe der Beschichtungsdicken der Elektroden. Die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zur Einstellung der gewünschten Beschichtungsdicken sind für verschiedene Auftragsverfahren bekannt, sodass die empirische Untersuchung des Beschichtungsprozesses dieses Zwischenproduktmerkmal nicht als Zielgröße berücksichtigen muss. In Tabelle 11 ist eine Fallunterscheidung zur Berücksichtigung von Zwischenproduktmerkmalen als Zielgrößen oder als Faktoren in Abhängigkeit der Vorgabe eines Sollwertes und der Kenntnis der auf das Zwischenproduktmerkmal eingehenden und ausgehenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge (UWZ) dargestellt (siehe auch Abschnitt 3.3.1).

*Tabelle 11: Zweite Entscheidungstabelle für die Berücksichtigung von ZPM in empirischen Analysen*

Informationslage			Entscheidung zur Analyse	
eingehender UWZ	Sollwert für ZPM	ausgehender UWZ	ZPM als Zielgröße	ZPM als Faktor
bekannt	vorgegeben	nicht relevant	nein	nein
unbekannt	vorgegeben	nicht relevant	ja	nein
bekannt	nicht vorgegeben oder nur impliziert	bekannt	nein	nein
		unbekannt	nein	ja
unbekannt	nicht vorgegeben oder nur impliziert	bekannt	ja	nein
		unbekannt	ja	ja

Die Festlegung von Zwischenproduktmerkmalen kann auch zur Nicht-Variation von weiteren Größen führen. Diese Informationen lassen sich aus dem qualitativen Erklärungsmodell ableiten. Am vorherigen Beispiel wird der Mittelwert der Beschichtungsdicke als gewünschter Sollwert mit Hilfe des Auftragsverfahrens Schlitzdüse durch den Volumenstrom der Beschichtungsteinte bestimmt. Dementsprechend kann dieser Prozessparameter unter der Randbedingung einer definierten Beschichtungsdicke als konstant betrachtet werden und muss nicht als Faktor einer empirischen Analyse berücksichtigt werden. Die Entscheidung zum Ausschluss von determinierten Zwischenproduktmerkmalen und dem Ausschluss der daraus folgenden, nicht variablen Stellgrößen hat durch die Prozessexperten in Abstimmung mit dem Projektleiter auf Basis der vorhandenen Dokumentationen zum Produkt (bspw. technische Zeichnungen und Rezepte) zu erfolgen. Die entsprechenden Informationen (*determiniert, nicht determiniert, variabel und nicht variabel*) sind wiederum zu dokumentieren.

Die benötigten Informationen zur Variation und Determiniertheit können in bilateralen Befragungen oder in einem ersten Versuchsplanungs-Workshop von den Prozessexperten und Anlagenverantwortlichen abgefragt werden. Für die einzelnen Analysephasen einschließlich gegebenenfalls notwendiger Iterationen können die Informationen zusammen mit der Messbarkeit in Listen entsprechend Abbildung 22 dokumentiert werden. Durch die Fokussierung des qualitativen Erklärungsmodells auf die Elemente und Beziehungen mit Qualitätseinfluss wird der Aufwand zur Informationsbeschaffung an dieser Stelle minimiert.

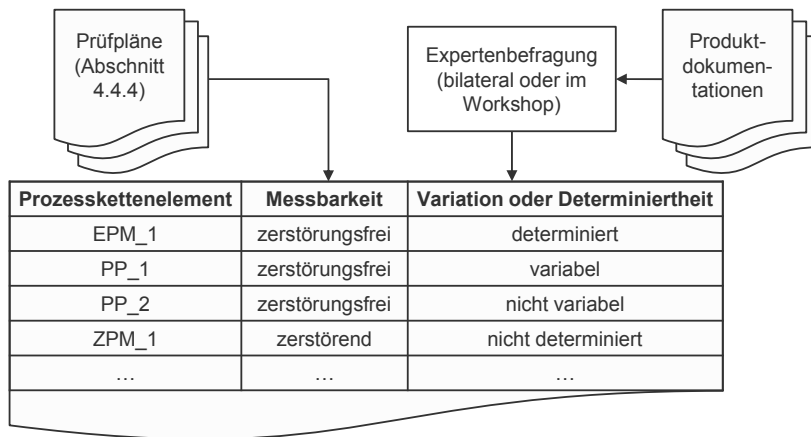


Abbildung 22: Informationsquellen und Dokumentation der Messbarkeit, Variation und Determiniertheit von Eingangsproduktmerkmalen (EPM), Prozessparametern (PP) und ZPM in einer Liste

### Untersuchungsziele in der prozessbezogenen Analysephase

Entsprechend dem vorhergehenden Abschnitt liegt der Fokus der prozessbezogenen Phase auf der Analyse des Übertragungsverhaltens der einzelnen Prozesse zwischen den Stellgrößen und den Zwischenproduktmerkmalen am Prozessausgang. Zur Identifikation der in der Versuchsplanung zu berücksichtigenden Größen sind die Informationen zur Messbarkeit, Variation und Determiniertheit ins qualitative Erklärungsmodell aufzunehmen. Aus der MDM lassen sich nun die qualitätsrelevanten Ein- und Ausgangsgrößen für jeden einzelnen Prozess in den prozessbezogenen DMM, also den Spalten der Domänen der einzelnen Zwischenprodukte (ZP), ablesen (siehe Abbildung 23). Eine übersichtlichere Darstellung der in den DMM enthaltenen Informationen kann mit Hilfe prozessbezogener Einflussmatrizen erreicht werden. Somit

kann für jeden Prozess eine überschaubare, matrixbasierte Darstellung aller relevanten Ein- und Ausgangsgrößen inklusive der qualitativen Abhängigkeiten für die prozessbezogene Versuchsplanung generiert werden. Dabei stellen die Zeileneinträge der Einflussmatrizen die potentiellen Faktoren und die Spalteneinträge die Zielgrößen für die empirische Prozessanalyse dar. Zur weiteren Priorisierung der Ein- und Ausgangsgrößen für die folgende Versuchsplanung können die Einflussmatrizen um die Information der Messbarkeit und Determiniertheit der Produktmerkmale sowie um die Aktivsumme (AS) der Einflussgrößen und die Passivsumme (PS) der ausgehenden Zwischenproduktmerkmale ergänzt werden (siehe Abbildung 23). Entsprechend des Erkenntnisstandes zu den einzelnen Prozessen sind die empirischen Untersuchungen in ihrem Umfang anzupassen. Um die Bereitstellung geeigneter Zwischenprodukte zu gewährleisten, bietet sich eine sequenzielle Untersuchung der Prozesskette vom ersten bis zum letzten Prozess an. Andernfalls können die prozessbezogenen Untersuchungen priorisiert werden, bspw. anhand der Aktivität der einzelnen Prozesse  $Ak_i$ .

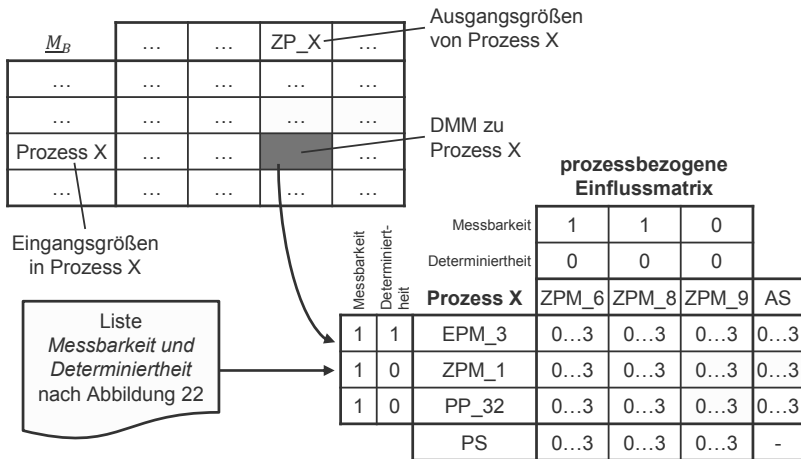


Abbildung 23: Prozessbezogene Einflussmatrix

### Untersuchungsziele in der prozessübergreifenden Analysephase

**Auswahl zu untersuchender Größen:** Die Untersuchungen der zweiten, prozessübergreifenden Analysephase werden auf Basis des durch die Ergebnisse der ersten Phase ergänzten qualitativen Erklärungsmodells geplant. Das Analyseziel der prozessübergreifenden Phase ist die Identifikation von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen zwischen Merkmalen verschiedener Zwischenprodukte sowie von Zwischen-

produktmerkmalen und Qualitätsmerkmalen. Voraussetzung für die Verwendung von Zwischenproduktmerkmalen als Faktoren einer prozessübergreifenden Analyse ist deren Messbarkeit und Einstellbarkeit auf Faktorstufen. Die Einstellbarkeit ist durch die Prozessanalyse der ersten Phase sicherzustellen. Nur in Ausnahmefällen sind Ursachen in Form von zerstörend messbaren Zwischenproduktmerkmalen durch Prozessparameter ersetzbar. Vor der Auswahl der Zwischenproduktmerkmale sind die Bewertungen der Messbarkeit, der Variation und der Determiniertheit zu überprüfen, gegebenenfalls anzupassen und wiederum im qualitativen Erklärungsmodell zu berücksichtigen. Somit ist eine aktuelle Planungsgrundlage zur Auswahl der Zwischenproduktmerkmale für die prozessübergreifende Analyse gegeben. Hierfür werden drei Auswahlkriterien zur weiteren Einschränkung der zu untersuchenden Zwischenproduktmerkmale vorgeschlagen:

1. **Wissensbedarfe:** Für die prozessübergreifende, empirische Analyse kommen nur Zwischenproduktmerkmale in Frage, deren ein- oder ausgehende Ursache-Wirkungs-Beziehungen auf keine naturgesetzlichen Zusammenhänge zurückgeführt werden können oder die Erschließung dieser Zusammenhänge für die Anwendung der Analyse im Kontext des Produktionsanlaufs einer Prozesskette nicht umsetzbar ist (siehe Tabelle 11). Auf dieser Basis wird über die Aufnahme eines Zwischenproduktmerkmals als Faktor, als Zielgröße oder beides im Rahmen der prozessübergreifenden Analyse entschieden.
2. **Bedeutung:**
  - a) potentielle Faktoren: Merkmale, welche die Zielgrößen der geplanten empirischen Analyse stärker beeinflussen, sind höher zu priorisieren als Merkmale mit geringeren Bedeutungswerten in den MDM der direkten Bedeutungen  $\underline{M}_B$  und indirekten Bedeutungen  $\underline{M}_B^{ind}$ .
  - b) potentielle Zielgrößen: Merkmale, welche von den Einflussgrößen der geplanten Untersuchung stärker beeinflusst werden (bspw. höhere Passivsumme), sind als Zielgrößen höher zu priorisieren.
3. **Übergeordnete Interessen:** Die nach dem Auswahlkriterium 1 verbleibenden und nach dem Kriterium 2 priorisierten Zwischenproduktmerkmale können zur finalen Festlegung der Faktoren und Zielgrößen der prozessübergreifenden Untersuchung bzgl. übergeordneter Interessen zur Diskussion gestellt werden. Der zu berücksichtigende Personenkreis ist vom Projektleiter zu definieren. Neben dem Projektteam sind unter Umständen weitere Experten, bspw. aus dem Bereich der Produktentwicklung, den zukünftigen Anlagenbetreibern und aus dem Mitgliederkreis weiterer Projekte einzubeziehen. In dieser Runde sind die zu untersuchenden Zwischenproduktmerkmale auf Basis der Priorisierung aus Schritt 2 und eventuell übergeordneter Interessen zu beschließen.



Ergebnis dieses dreistufigen Auswahlvorgehens ist eine Liste von Zwischenproduktmerkmalen in Prozessreihenfolge, welche als Faktoren oder Zielgrößen in der empirischen Analyse zu untersuchen sind.

**Identifikation von Störeinflüssen:** Im Weiteren gilt es, die prozessübergreifende empirische Analyse der festgelegten Zwischenproduktmerkmale bzgl. der Einhaltung des Ceteris-Paribus-Prinzips abzusichern. Diesbezüglich sind mögliche Störeinflüsse zu identifizieren und Kontrollmaßnahmen zu planen. Unter Störeinflüssen werden alle Verstöße gegen die Konstanz der Versuchsbedingungen mit potentielltem Einfluss auf die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den zu untersuchenden Faktoren und den Zielgrößen verstanden. Mit Hilfe der MDM der Bedeutungen  $\underline{M}_B$  können die Ursache-Wirkungs-Ketten zwischen den Faktoren und den Zielgrößen der geplanten Analyse systematisch auf Störeinflüsse untersucht werden. Hierzu wird eine kombinierte vorwärts- und rückwärtsgerichtete Analyse der Ursache-Wirkungs-Ketten angewandt. In Abhängigkeit des Startpunktes können zwei Analyseverfahren unterschieden werden:

- **bottom-up:** Ausgehend von den gewünschten Faktoren der zu planenden Untersuchung werden die Ursache-Wirkungs-Ketten zu den potentiellen Zielgrößen betrachtet. Dieser Ansatz dient vorwiegend der Quantifizierung der von Faktoren ausgehenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Beispiele sind die Quantifizierung der Auswirkungen von Prozessschwankungen und die Definition von Toleranzen.
- **top-down:** Beginnend bei den gewünschten Zielgrößen werden alle eingehenden Ursache-Wirkungs-Ketten aufgezeigt. Dieses Vorgehen ist insbesondere für Untersuchungen mit dem Ziel der Quantifizierung der auf die Zielgrößen einwirkenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge anzuwenden. Als Beispiel kann die Quantifizierung der Stellhebel für die Produktqualität angeführt werden.

Im Falle des bottom-up-Vorgehens sind in einem ersten Schritt die Ursache-Wirkungs-Ketten ausgehend von den zu betrachtenden Faktoren in Vorwärtsrichtung zu ermitteln. Anschließend werden in einer Rückwärtsbetrachtung die Einflüsse auf die Elemente zwischen dem Faktor und der Zielgröße ermittelt. Durch die Aufdeckung der Einflussgrößen kann überprüft werden, ob diese Elemente hauptsächlich vom geplanten Faktor oder auch von anderen Größen beeinflusst werden. Die Beurteilung der Einhaltung des Ceteris-Paribus-Prinzips in der geplanten Analyse und die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen zu dessen Einhaltung obliegen wiederum den im Projekt involvierten Prozessexperten. Hierzu wird eine interdisziplinäre Diskussion

in einem zweiten Versuchsplanungs-Workshop vorgeschlagen. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 24 exemplarisch für eine Analyse der Ursache-Wirkungs-Kette zwischen dem Zwischenproduktmerkmal 3 und den Qualitätsmerkmalen (QM) 1, 2 und 3 dargestellt. Die Tiefe der Rückwärtsbetrachtung ist so zu wählen, dass den Experten eine eindeutige Beurteilung ermöglicht wird. Im Beispiel aus Abbildung 24 wird das Zwischenproduktmerkmal 4 vom geplanten Faktor, von Prozessparameter 3 und Eingangsproduktmerkmal 2 beeinflusst. Somit ist die Rückwärtsbetrachtung in der ersten Ebene ausreichend, um die Einhaltung des Ceteris-Paribus-Prinzips zu beurteilen. Demgegenüber sind im Falle des Zwischenproduktmerkmals 7 zwei Ebenen in der Rückwärtsbetrachtung zu berücksichtigen. Die Darstellung der Ursache-Wirkungs-Ketten kann graphen- und tabellenbasiert erfolgen. Das top-down-Vorgehen ist analog in umgekehrter Analyserichtung durchzuführen. Die systematische Prüfung der zu untersuchenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen auf Störeinflüsse ist für jeden Faktor erforderlich. Werden Verstöße gegen das Ceteris-Paribus-Prinzip identifiziert, sind bei der Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung Maßnahmen zur Kontrolle oder zur expliziten Berücksichtigung zu ergreifen (siehe Abschnitte 4.4.3, 4.4.5 und 4.4.6).

**Verknüpfungsanalyse:** Neben der Prüfung auf Störeinflüsse kann mit dem beschriebenen Vorgehen die Verknüpfung der einzelnen Ursache-Wirkungs-Ketten (UWK) analysiert werden. Kommen Elemente in mehreren Ketten vor, so sind diese verknüpft. In diesem Fall sind zur Identifikation der Wechselwirkungen die entsprechenden Faktoren in einem Versuchsplan abzubilden. Sind die Ketten unabhängig voneinander, besteht die Möglichkeit, die Faktoren in separaten Untersuchungen abzubilden.

### **Zusammenfassung zur Definition der Untersuchungsziele**

Zusammenfassend erfolgt die Festlegung der Untersuchungsziele mit Hilfe phasenspezifischer Ausschnitte der im qualitativen Erklärungsmodell abgebildeten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, welche durch Graphen oder Tabellen übersichtlich dargestellt werden. Diese können aus der MDM der Bedeutungen abgeleitet werden. Ergebnis dieses Planungsschritts sind die Faktoren und Zielgrößen der empirischen Untersuchung sowie eventuelle Störeinflüsse und Verknüpfungen, welche im Weiteren zu beachten sind.

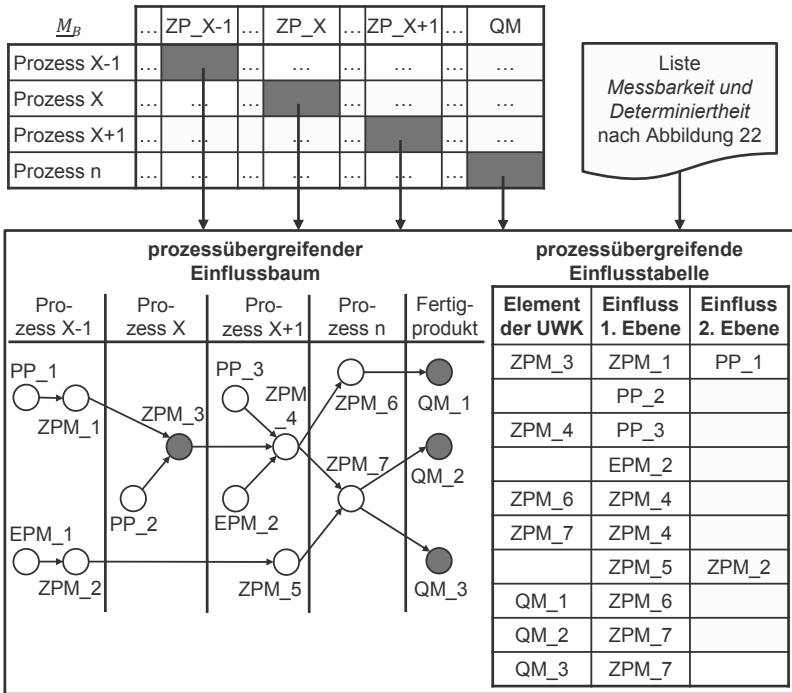


Abbildung 24: Prozessübergreifender Einflussbaum und prozessübergreifende Einflusstabelle

#### 4.4.3 Versuchsstrategie

Im Anschluss an die Festlegung der Untersuchungsziele der einzelnen Analysephasen gilt es, im Rahmen der Versuchsstrategie die konkreten Versuchspläne auszuarbeiten, dabei den Umgang mit Störeinflüssen zu planen und die Erreichung der Analyseziele der einzelnen Phasen sicherzustellen.

Zur Auswahl geeigneter Versuchspläne existieren in der einschlägigen Literatur entsprechend Abschnitt 2.3.2 fundierte Fallunterscheidungen und Entscheidungshilfen, sodass dieser Aspekt nicht vertieft wird. Die wichtigsten Kriterien für die Auswahl der Versuchsmethode sind nach WENGLER (1996) insbesondere die Anzahl und der Skalentyp der Faktoren, die Anzahl der Faktorstufen und die erwarteten Wechselwirkungen. Im Kontext dieser Arbeit sind bei der Auswahl der Versuchspläne unabhängig von der Analysephase folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- **Anzahl der Faktoren und Faktorstufen:** Die ausführliche, qualitative Prozesskettenanalyse, welche die Planungsgrundlage der empirischen Analyse darstellt, ermöglicht den Verzicht auf Screening-Experimente, die im Wesentlichen der experimentellen Reduktion der Einflussfaktoren dienen. Dementsprechend können direkt empirische Untersuchung mit der Zielstellung der detaillierten Modellierung des tatsächlichen Systemverhaltens geplant werden. Hierzu sind Versuchspläne auszuwählen, welche in der Lage sind, quadratische Zusammenhänge und Zusammenhänge höherer Ordnungen aufzulösen. Die erwartete Ordnung der zu untersuchenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und die daraus resultierende Anzahl der Faktorstufen erfolgt in Abstimmung mit den Prozessexperten. In diesem Zusammenhang lassen sich auch die konkreten Werte der Faktorstufen festlegen.
- **Wechselwirkungen:** Die in der Versuchsplanung zu berücksichtigenden, erwarteten Wechselwirkungen stehen nach der qualitativen Prozesskettenanalyse zur Verfügung. Für Phase 1 sind diese in der MDM der Wechselwirkungen  $\underline{M}^{int}$  enthalten. In Phase 2 sind zusätzlich die Ergebnisse der in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen Verknüpfungsanalyse der prozessübergreifenden Ursache-Wirkungs-Ketten zu beachten.
- **Kontrolle von Störeinflüssen:** Für den Umgang mit den identifizierten Störeinflüssen auf die zu untersuchenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge existieren nach PETERSEN (1991) prinzipiell die in Tabelle 12 dargestellten Möglichkeiten. Im Rahmen der Versuchsplanung kann der Einfluss von Störgrößen durch eine gezielte *Randomisierung* der Versuchsreihenfolge statistisch minimiert werden. Können die Störgrößen messtechnisch erfasst werden, kann in der Versuchsplanung darüber hinaus eine *Blockbildung* durch eine Gruppierung der Zwischenprodukte mit vergleichbaren Werten der Störgrößen erfolgen. Die weiteren Maßnahmen können im Rahmen der Versuchsdurchführung und -auswertung getroffen werden.
- **Praktische Umsetzbarkeit:** Die Versuchsplanung wird nach der Freigabe der ausgearbeiteten Versuchspläne mittels einer Machbarkeitsprüfung durch die betroffenen Prozessexperten finalisiert.

Tabelle 12: Umgang mit Störgrößen in den einzelnen Phasen nach PETERSEN (1991)

Störgröße	Kontrolle	
	experimentell	statistisch
ausschalten	konstanthalten	Randomisierung
miterfassen	Blockbildung	Kovarianzanalyse

Die Erreichung der phasenspezifischen Analyseziele wird folgendermaßen definiert:

- Die prozessbezogenen Untersuchungen können abgeschlossen werden, wenn alle in den prozessweisen Einflussmatrizen als Ausgangsgrößen vorkommenden und für die prozessübergreifende Analyse als Faktor in Betracht kommenden Zwischenproduktmerkmale reproduzierbar auf definierte Werte eingestellt werden können.
- Die Untersuchungsziele der prozessübergreifenden Analysephase sind erreicht, wenn alle Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den in Abschnitt 4.4.2 identifizierten Einflussgrößen und den Qualitätsmerkmalen des Fertigproduktes quantifiziert wurden. Vor der Analyse von Zusammenhängen zwischen Zwischenproduktmerkmalen und Qualitätsmerkmalen können prozessübergreifende Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den Zwischenproduktmerkmalen in vorgelagerten, empirischen Analysen innerhalb von Phase 2 aufgeklärt werden.
- Die zeitliche Überlappung und gezielte Parallelisierung der beiden Analysephasen ist prinzipiell möglich, insbesondere wenn Prozesskettenabschnitte unabhängig voneinander untersucht werden können. Dies wird bspw. durch eine externe Beschaffung von Zwischenprodukten mit spezifizierten Merkmalswerten ermöglicht.

Mit der Festlegung der Versuchsstrategie sind die Untersuchungsumfänge der beiden Analysephasen mit den ausgewählten und konkretisierten Versuchsplänen definiert.

#### **4.4.4 Vorbereitung der empirischen Analyse**

Vor der Versuchsdurchführung kann mit Hilfe des qualitativen Erklärungsmodells die Prüfung und die Dokumentation messtechnisch zu erfassender Größen vorbereitet werden. Die festgelegten Versuchspläne stellen die Grundlage für eine Produktionsplanung der empirischen Analyse dar.

##### **Prüfplanung**

Nach REINHART (1996) versteht man unter *Prüfplanung* den Vorgang zur Planung der Qualitätsprüfung. Die zu erstellenden *Prüfpläne* umfassen die *Prüfspezifikationen*, die *Prüfanweisungen* und *Prüfablaufpläne* (REINHART 1996). Diese Methodik soll die Prüfspezifikation durch die Identifikation der *Prüfmerkmale* für die gesamte Prozesskette unterstützen. In Verbindung mit den im Unternehmen beherrschten *Prüfverfahren* und den zur Verfügung stehenden *Prüfmitteln* ergibt sich die in der Definition der Untersuchungsumfänge (Abschnitt 4.4.2) verwendete Information zur

Messbarkeit der einzelnen Größen. Die im qualitativen Erklärungsmodell der Bedeutungen enthaltenen Produktmerkmale sowie die Stell- und Störgrößen repräsentieren die Menge der theoretisch im Produktionsablauf zu bestimmenden Prüfmerkmale. Diese Größen sind auf Grundlage des Expertenwissens relevant für die Qualität des Fertigproduktes. Die messtechnische Erfassung dieser Größen ist zum einen essentiell für die Aufklärung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen und zum anderen die Basis, um im Falle einer gewollten Nicht-Variation die Einhaltung des Ceteris-Paribus-Prinzips zu beurteilen. Tabelle 13 zeigt einen Vorschlag zur Akquise der Informationen der Messbarkeit anhand einer Auflistung der aus dem qualitativen Erklärungsmodell abgeleiteten, relevanten Größen. Entsprechend der Gliederung der Prozesskette in fertigungstechnische Prozesse und Zwischenprodukte wird im Rahmen dieser Arbeit zwischen *Prüfplänen für Fertigungsprozesse* und für *Prüfprozesse* unterschieden. Dabei fassen Prüfpläne für Fertigungsprozesse die prozessbezogenen Prüfmerkmale Stell- und Störgrößen (SG) zusammen, während die Pläne für Prüfprozesse Prüfmerkmale der Eingangs-, Zwischen- oder Fertigprodukte betreffen.

*Tabelle 13: Beispielhafte Liste zur Ermittlung der Messbarkeit der Prüfmerkmale*

Prüfmerkmal	Prüfverfahren	Prüfmittel	Messbarkeit
PP_5	Verfahren A	Sensor X	zerstörungsfrei
ZPM_121	Verfahren B	Lehre Y	zerstörend
EPM_11	Verfahren C	nicht vorhanden	nicht messbar
SG_8	Verfahren D	Sensor Z	zerstörungsfrei

### **Dokumentationswerkzeug und Identifikationskonzept**

Neben der messtechnischen Erfassung der Größen sind die Dokumentation der Messwerte und deren eindeutige Zuordnung zu den Produkten und Prozessen sicherzustellen. Für komplexe Prozessketten mit einer Vielzahl an Systemelementen und folglich einer großen Menge zu dokumentierender Messdaten ist ein rechnerunterstütztes Dokumentationskonzept unumgänglich. Zur dauerhaften, effizienten Dokumentation großer Datenmengen stellen Datenbanken das am weitesten verbreitete Dokumentationswerkzeug dar. Der Aufbau des Datenbankmodells wird durch das Wissen im qualitativen Erklärungsmodell unterstützt. Die darin enthaltenen, qualitätsrelevanten Elemente sind im Datenbankmodell zu berücksichtigen. Ein großzügiger und flexibler Datenbankentwurf ist hilfreich, um auf Anforderungen zukünftiger Analysephasen reagieren zu können. Darüber hinaus liefert die aus Prozessen und Produkten bestehende Prozesskettenbeschreibung die grundlegende Struktur des Datenbankmodells. Die Datenbankrelationen der wesentlichen Produktkomponenten lassen sich

bspw. aus der Produktstruktur ableiten. Die relationale Berücksichtigung der Zwischenprodukte kann bspw. unter Verwendung des Montagevorranggraphen erfolgen. Die eindeutige Zuordnung der realen Messwerte zu deren softwaretechnischen Repräsentationen im Dokumentationswerkzeug ist durch einen Abgleich der operativen Abläufe in der Produktrealisierung, dem relationalen Aufbau des Datenbankmodells sowie durch eine eindeutige Identifikation der einzelnen Instanzen<sup>5</sup> sicherzustellen. Herausforderungen treten insbesondere in Abschnitten der Prozesskette ohne diskretem Werkstückfluss auf, bspw. in Prozessen welche quasi kontinuierliche Zwischenprodukte diskretisieren oder quasi kontinuierliche Zwischenprodukte mit einer großen Anzahl diskreter Zwischenprodukte kombinieren. Im Allgemeinen sind alle Prozesse und Produkte eindeutig zu kennzeichnen. Im Falle der beschriebenen Herausforderungen sind praktikable Lösungen für den individuellen Anwendungsfall zu finden. Die am Beispiel der Batterieproduktion erarbeiteten Lösungen werden in Kapitel 5 vorgestellt. Der Zusammenhang zwischen dem Dokumentationswerkzeug und dem Erklärungsmodell ist in Abbildung 25 dargestellt. Während in der Datenbank die Dokumentation der Informationen aus den Experimenten zu einzelnen Instanzen sowie deren korrekte Zuordnung untereinander erfolgen, werden im Erklärungsmodell die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den Systemelementen der Prozesskette abgebildet. Das Wissen im Erklärungsmodell entsteht durch eine Interpretation und Auswertung der Informationen in der Datenbank.

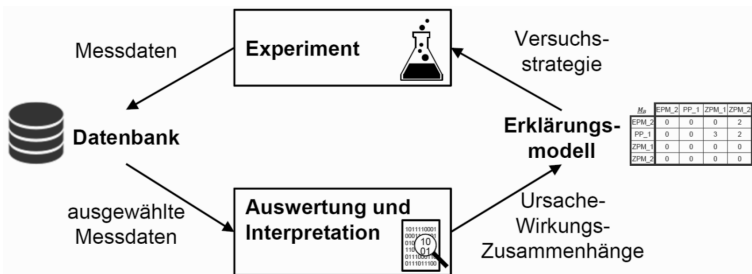


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen der Datenbank und dem Erklärungsmodell

### Produktionsplanung für die empirische Prozesskettenanalyse

Im Falle komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten kann eine systematische Produktionsplanung zur Umsetzung umfangreicher empirischer Analysen notwendig sein. Nach SCHNEIDER-WINDEN (1992) umfasst die Produktionsplanung die Teilgebiete der *Produktionsprogrammplanung*, der *Mengenplanung* sowie die *Termin- und*

<sup>5</sup> konkrete Realisierung eines Prozesses oder Produktes

*Kapazitätsplanung.* Insbesondere die beiden letztgenannten Teilgebiete sind für die Anwendung der Methodik von Bedeutung und für die spezifischen Anforderungen der empirischen Prozesskettenanalysen zu modifizieren:

1. Die prozessübergreifenden und prozessbezogenen Versuchspläne definieren für die einzelnen Prozesse oder für die gesamte Prozesskette den Mindestbedarf an Versuchsträgern.
2. Die im Anlauf der Prozesskette und in der ersten Analysephase oft hohe, prozessspezifische relative Ausschussrate ist abzuschätzen und zu berücksichtigen.
3. Der prozessspezifische absolute Verlust von Versuchsträgern für zerstörende Messungen von Zwischenproduktmerkmalen ist einzuberechnen.

Die Verrechnung des prozessbezogenen Produktionsbedarfs mit den Verlusten durch Ausschuss und Messung ermöglicht die Materialbedarfs- und Kapazitätsplanung. Die Umsetzung für den Anwendungsfall der Batterieproduktion wird in Kapitel 5 gezeigt.

### **4.4.5 Versuchsdurchführung**

Sind alle vorbereitenden Maßnahmen ergriffen und die Versuchspläne freigegeben, kann die operative Versuchsdurchführung erfolgen. Dabei ist die Einhaltung aller geplanten Maßnahmen sicherzustellen. Dies betrifft insbesondere die Versuchsstrategie mit der definierten Reihenfolge und den festgelegten Faktorstufen, die Kennzeichnung der Produkte und die Einhaltung der Arbeits- und Prüfpläne. Durch die Bereitstellung von entsprechenden Utensilien und Eingabegeräten, bspw. mit Schnittstelle zur Datenbank, sind die Messergebnisse zu dokumentieren. Die eingesetzten Geräte müssen für die speziellen Produktionsumgebungen geeignet und unter Einhaltung der herrschenden Arbeitsschutzrichtlinien verwendbar sein. Die in den prozessbezogenen und prozessübergreifenden Untersuchungen auftretenden Störgrößen, welchen nicht durch statistische Maßnahmen in der Versuchsplanung und -auswertung begegnet wird, sind in der Versuchsdurchführung möglichst konstant zu halten oder auszuschließen. In Tabelle 14 sind allgemeine Maßnahmen zur Kontrolle von Störgrößen zusammengefasst. Für die im Speziellen auftretenden Störgrößen können darüber hinaus spezifische Maßnahmen getroffen werden.



*Tabelle 14: Beispielhafte Maßnahmen zur Kontrolle von Störgrößen während der Versuchsdurchführung in Anlehnung an WENGLER (1996)*

Störgrößen	Maßnahmen
Mensch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mitarbeiter unterweisen</li> <li>• Arbeitsanweisungen erstellen</li> </ul>
Material	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialien aus einer Charge verwenden</li> <li>• Materialverunreinigungen vermeiden</li> <li>• zeitliche Einflüsse, wie bspw. Alterung, reduzieren</li> </ul>
Umwelt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• konstante Umgebungsbedingungen sicherstellen</li> </ul>
Maschine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• identische Betriebsmittel verwenden</li> <li>• örtliche Einflüsse reduzieren</li> </ul>
Prozess	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stabile Prozessbedingungen sicherstellen</li> <li>• Stellgrößen nicht verändern</li> </ul>
Messung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fähige Messmittel verwenden</li> </ul>
unkontrollierbar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maßnahmen zur statistischen Kontrolle in der Versuchsplanung und -auswertung</li> </ul>

#### 4.4.6 Versuchsauswertung

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt unter Anwendung etablierter statistischer Methoden. Im Mittelpunkt steht hierbei die Regressionsanalyse (siehe Abschnitt 2.3.3). Die Anforderung *Erkenntnisgewinn durch quantitative Systemanalyse* erfordert eine quantitative Modellierung, welche für den Zweck der mathematischen Prozesskettenoptimierung eingesetzt werden kann. Dementsprechend sind zwischen den Faktoren und den Zielgrößen der empirischen Analyse funktionale Zusammenhänge zu ermitteln. Die Regressionsanalyse ermittelt mathematische Modelle auf Basis der in der Versuchsdurchführung erfassten Daten (GUNDLACH 2004). Dabei ist die Regressionsanalyse an die in der Versuchsstrategie gewählte Modellart anzupassen. Grundlegende Voraussetzungen zur Anwendung der Regressionsanalyse sind in GUNDLACH (2004) aufgeführt. Prinzipiell stellt das Auswertungsvorgehen keinen wissenschaftlichen Schwerpunkt der Arbeit dar, sodass dieses im Weiteren unter Verweis auf die entsprechende Literatur nur knapp vorgestellt wird. Die wesentlichen Schritte der Auswertung beruhen auf der Vorgehensweise nach GUNDLACH (2004). Für die Anwendung im Zusammenhang mit empirischen Analysen fertigungstechnischer Prozessketten und insbesondere für die Rückführung der Erkenntnisse in das qualitative und quantitative Erklärungsmodell wird die Vorgehensweise spezifiziert.

Zur Durchführung der statistischen Analysen wird die Verwendung geeigneter Softwarewerkzeuge empfohlen, um den Auswerteaufwand zu minimieren.

### **Datenüberprüfung und -aufbereitung**

Vor der eigentlichen Auswertung der Daten sind diese auf Konsistenz zu prüfen. Hierzu sind durch eine Sichtung der Daten insbesondere die korrekte Umsetzung der Versuchseinstellungen sowie die grundlegende Korrektheit der Zahlenwerte bzgl. ihrer Größenordnung und weiterer Auffälligkeiten zu kontrollieren und bspw. nach Rücksprache mit den entsprechenden Prozessexperten zu korrigieren.

### **Modellsicherheit und Fehlersignifikanz**

In Abhängigkeit von der Anwendung und den Konsequenzen der Entscheidungen, welche auf Basis der Analyseergebnisse zu treffen sind, gilt es, die Modellsicherheit und Fehlersignifikanz zu wählen. In der einschlägigen Literatur wird für die Irrtumswahrscheinlichkeit häufig  $\alpha = 5\%$  verwendet und damit ein Vertrauensniveau von 95 % angenommen (PETERSEN 1991 und GUNDLACH 2004). Bestehen höhere Anforderungen an die Modellsicherheit, bspw. im Falle fertigungstechnischer Prozessketten für Produkte der Medizintechnik und der Luft- und Raumfahrt, können kleinere Irrtumswahrscheinlichkeiten erforderlich werden.

### **Überprüfung der Auswertevoraussetzungen und Modellanpassung**

**Test auf Normalverteilung und Ausreißer:** Eine entscheidende Voraussetzung zur Anwendung der Regressionsanalyse ist die Normalverteilung der Residuen (siehe Abschnitt 2.3.3), welche im Rahmen einer Residuenanalyse überprüft werden kann. Eine Möglichkeit hierzu ist die Darstellung der Residuen in einem Histogramm. Dabei sollte sich annähernd eine Glockenkurve ergeben (GUNDLACH 2004). Eine präzisere graphische Überprüfung der Normalverteilung stellt der Normalverteilungsplot der Residuen dar. Die Normalverteilung der Residuen gilt als erfüllt, wenn diese annähernd auf der Ausgleichsgeraden des Plots liegen. Kurvenförmige Abweichungen sprechen für eine Verletzung der Linearität des Modells, während trichterförmige Verteilungen der Residuen auf Heteroskedastizität (auch als *Varianzheterogenität* bezeichnet) hindeuten (GROSS 2003). Darüber hinaus kann diese Darstellung zur einfachen Identifikation von potentiellen Ausreißern herangezogen werden. Für den Test auf Normalverteilung und Ausreißer existieren eine Reihe weiterer Möglichkeiten, welche bspw. in GUNDLACH (2004) nachgeschlagen werden können. Die Durchführung des Tests auf Normalverteilung setzt die Kenntnis der Residuen und damit eine durchgeführte Regressionsanalyse voraus.

**Zentrierung und Skalierung:** Unter *Zentrierung* wird die Verlegung des Zentrums des Untersuchungsintervalls eines Faktors auf den Ursprung verstanden. Durch die *Skalierung* wird das Untersuchungsintervall auf den Bereich von  $-1$  bis  $1$  normiert. Diese Transformationen ermöglichen für verschiedene Modelle die Berechnung von vergleichbaren Effekten und Regressionskoeffizienten. (GUNDLACH 2004)

**Effektanalyse und Signifikanz:** Die Veränderung der Zielgröße in Abhängigkeit der Faktoren wird als *Effekt* bezeichnet. Die Effekte der einzelnen Faktoren werden im Allgemeinen *Haupteffekte* oder *Hauptwirkungen* genannt (PETERSEN 1991). Demgegenüber beschreiben *Wechselwirkungseffekte* die abhängige Wirkung mehrerer Faktoren auf die Zielgröße (GUNDLACH 2004). Zur Berechnung der Effekte wird auf GUNDLACH (2004) verwiesen. Die Darstellung der Ergebnisse der Effektanalyse erfolgt im Effektplot. Im hierzu häufig verwendeten Balkendiagramm werden die Faktoren und Wechselwirkungen entsprechend ihrer Effektgröße geordnet dargestellt. Mit Hilfe der Signifikanzschwelle (siehe Abschnitt 2.3.3) können nun Modellanpassungen durch den Ausschluss von Faktoren oder Wechselwirkungen mit nicht signifikanten Effekten vorgenommen werden.

**Auswertung bei Blockbildung:** Wurde die Blockbildung als Maßnahme in der Versuchsplanung zur Berücksichtigung von Störgrößen gewählt, so sind die Blöcke als zusätzlicher Faktor in der Auswertung zu berücksichtigen (SIEBERTZ ET AL. 2010). Wenn sich der Faktor *Block* in der weiteren Auswertung als signifikant herausstellt, dann kann dieser zur Beschreibung des Einflusses der die Blockbildung motivierenden Störgrößen verwendet werden, falls diese bekannt sind. Bei Nicht-Signifikanz kann dieser Faktor aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden.

### Regressionsanalyse

Die Anwendung der Regressionsanalyse entsprechend Abschnitt 2.3.3, die Überprüfung der Auswertevoraussetzungen sowie die Anpassung des Modells erfolgt iterativ bis Ausreißer ausgeschlossen und das Modell auf die Faktoren und Wechselwirkungen mit signifikanten Effekten reduziert wurde (in Anlehnung an die *stepwise regression* nach GROSS 2003). Die Modellgüte wird mit Hilfe des korrigierten Bestimmtheitsmaßes (siehe Abschnitt 2.3.3) ermittelt. In Abbildung 26 ist der Ablauf des gesamten Vorgehens zur Auswertung der Versuchsdaten dargestellt. Die quantitativen Ergebnisse der Auswertung sind die Koeffizienten des Regressionsmodells für die einzelnen Faktoren und Wechselwirkungen sowie die dazugehörigen Signifikanzwerte und die Modellgüte.

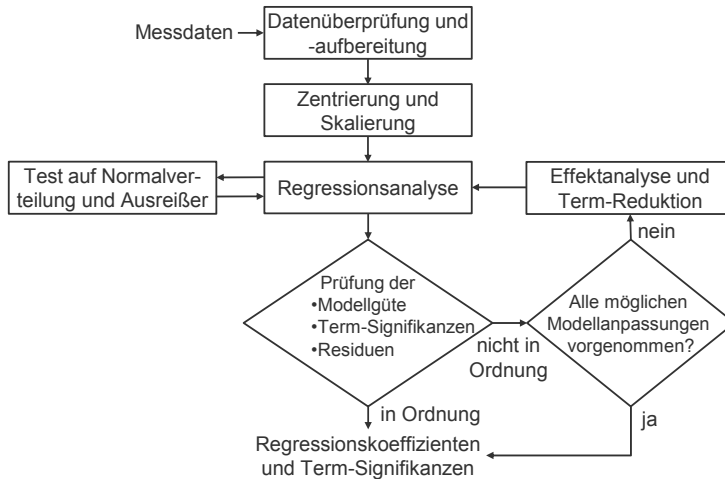


Abbildung 26: Vorgehen zur Auswertung der Versuchsdaten

### 4.4.7 Interpretation und Validierung

Die mathematisch-statistischen Ergebnisse aus der Versuchsdatenauswertung sind im nächsten Schritt an die beteiligten Projektmitarbeiter zu kommunizieren und zu interpretieren. Grundsätzlich ist eine statistisch signifikante Korrelation keine hinreichende Bedingung für einen kausalen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang (siehe Abschnitt 2.2.3). Aus diesem Grund ist nach WENGLER (1996) zusätzlich die praktische Relevanz des Zusammenhangs zu prüfen. Im Rahmen der vorliegenden Methodik ist eine umfängliche Eingrenzung der zu untersuchenden Größen und Zusammenhänge anhand bestehender Wissensbedarfe und der Qualitätsrelevanz erfolgt, sodass an dieser Stelle eine expertenbasierte Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse verbleibt. Dabei sind der Kontext der durchgeführten Experimente und die getroffenen Annahmen, insbesondere bzgl. der Kontrolle von Störgrößen, zu berücksichtigen. Auf Basis dieser logischen Überprüfungen der Ergebnisse sind Maßnahmen zum weiteren Vorgehen abzuleiten:

- Weitere Analyseiterationen:** Es besteht die Möglichkeit, dass neue Problemstellungen mit den Ergebnissen aufgedeckt werden, deren Ergründung weitere Iterationen des Analysevorgehens bedarf. Weitere Analyseiterationen können ebenso erforderlich werden, wenn die Ergebnisqualität zur Umsetzung von Maßnahmen der Prozesskettenführung nicht ausreichend hoch ist, bspw. aufgrund einer niedrigen Modellgüte.

- **Optimierung und Bestätigungsversuche:** Mit Hilfe dieser Methodik identifizierte, statistisch abgesicherte und plausible Modelle können zur Optimierung der Prozesskettenführung verwendet werden. Verfahren der analytischen und experimentellen Optimierung stellen hierfür geeignete Werkzeuge zur Verfügung, welche insbesondere bei der Lösung von Optimierungsaufgaben mit mehreren Zielgrößen Anwendung finden. Zur mehrkriteriellen Optimierung wird auf die einschlägigen Literaturquellen verwiesen: u. a. JARRE & STOER 2004, MYERS ET AL. (2009), SIEBERTZ ET AL. (2010) und KLEPPMANN (2011). Im Falle einzelner Zielgrößen lassen sich die optimalen Prozesseinstellungen auf einfache Weise graphisch oder rechnerbasiert aus dem Modell ermitteln. Die identifizierten, optimalen Einstellungen für die untersuchten Einzelprozesse und prozessübergreifenden Zusammenhänge sind in Bestätigungsversuchen zu überprüfen. Hierzu sind die Einstellungen an einer ausreichenden Anzahl von Versuchsträgern umzusetzen. Die relevanten Zielgrößen sollten dabei den Prognosewerten des zu bestätigenden Modells unter Berücksichtigung des Vertrauensbereiches entsprechen. Wurde bspw. eine Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 5\%$  gewählt, müssen 95 % der Zielwerte der Versuchsträger aus den Bestätigungsversuchen im Vertrauensbereich des Modells liegen. Kommt es zu Abweichungen, so ist das Analyseverfahren zu hinterfragen. In diesem Fall wird empfohlen, an erster Stelle die Versuchsauswertungen, die Versuchsbedingungen und die Maßnahmen zur Kontrolle von Störgrößen zu überprüfen.

#### 4.4.8 Verknüpfung mit den Erklärungsmodellen

Die Verknüpfung der empirischen Analyse mit den Erklärungsmodellen stellt ein Kernelement der Methodik dar. Eine Rückführung der empirisch ermittelten Erkenntnisse in das qualitative Erklärungsmodell ermöglicht die Erfüllung der Forderung nach einer Unterstützung der quantitativen Systemanalyse. Das qualitative Prozesskettenmodell liefert die Planungsgrundlage der quantitativen Systemanalyse. Somit stellt eine Aktualisierung des Modells eine zielgerichtete empirische Analyse mit idealerweise reduziertem Aufwand sicher. Der Aufbau des quantitativen Erklärungsmodells dient im Wesentlichen der Dokumentation der Analyseergebnisse. Insbesondere die für komplexe Prozessketten symptomatischen nichtlinearen, wechselwirkenden und prozessübergreifenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen erfordern im Hinblick auf eine Optimierung der gesamten Prozesskette ein geeignetes, umfassendes Dokumentationskonzept. Der große Analyseumfang im Falle komplexer Prozessketten und

dessen Abarbeitung in mehreren Iterationen machen darüber hinaus ein analyseübergreifendes Dokumentationskonzept notwendig. Dementsprechend erfüllt dieser Schritt mehrere an die Methodik gestellte Anforderungen. Ergebnis der Versuchsdatenauswertung sind lineare Regressionsmodelle, welche Konstanten, lineare und nichtlineare Terme enthalten können. Zusätzlich liegt zu jedem Term ein Signifikanzwert vor. Die Verknüpfung dieser Informationen mit den beiden Erklärungsmodellen wird im Folgenden spezifiziert.

### **Rückführung in das qualitative Erklärungsmodell**

Im Zusammenhang mit der Rückführung der Erkenntnisse der empirischen Analyse in ein qualitatives HoQ zur Produkt- und Prozessentwicklung stellt WENGLER (1996) fest, dass mehrdimensionale Wechselwirkungen nicht in ein lineares, zweidimensionales Erklärungsmodell zurückgeführt werden können. Um den Einfluss der Wechselwirkungen dennoch zu berücksichtigen, wird von WENGLER (1996) eine anteilmäßige Berücksichtigung der Wechselwirkungen in der Kennzahl zur Bewertung des Einflusses des betrachteten Systemelementes vorgeschlagen. Es erfolgt jedoch keine mathematische Detaillierung. Dieser Vorschlag wird hier zur Rückführung in die qualitative MDM  $\underline{M}_B$  aufgegriffen und um die Berücksichtigung der nichtlinearen Anteile erweitert. Auf Basis des allgemeinen, linearen Regressionsmodells aus Gleichung (3.14) werden die neuen, qualitativen Bedeutungswerte  $B_{x_i \rightarrow y}^{neu}$  entsprechend Gleichung (4.6) berechnet und nach Gleichung (4.7) auf die Bewertungsskala des qualitativen Erklärungsmodells normiert.

$$B_{x_i \rightarrow y}^{neu} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{|\hat{b}_j|}{o_j}} \quad \forall b \in y(x_i) \quad (4.6)$$

$$B_{x_i \rightarrow y}^{neu, norm} = \frac{B_{x_i \rightarrow y}^{neu} B_{max}}{\max(B_{x_1 \rightarrow y}^{neu}, B_{x_2 \rightarrow y}^{neu}, \dots, B_{x_m \rightarrow y}^{neu})} \quad (4.7)$$

Mit

$B_{x_i \rightarrow y}^{neu, norm}$	neuer, qualitativer und normierter Bedeutungswert
$B_{max}$	maximaler Bewertungswert der Bedeutung entsprechend des qualitativen Erklärungsmodells
$n$	Anzahl der Koeffizienten $\hat{b}_j$ im Regressionsmodell zur Zielgröße $y$ mit Bezug zum betrachteten Faktor $x_i$
$m$	Anzahl der Faktoren im Regressionsmodell

- $o$       Ordnung der Wechselwirkung (Term ohne Wechselwirkung linearer, quadratischer und höherer Ordnung:  $o = 1$ , Zweifach-Wechselwirkung:  $o = 2$ , Dreifach-Wechselwirkung:  $o = 3, \dots$ )

Zur Aufrechterhaltung der mehrdimensionalen Informationen über die an Wechselwirkungen beteiligten Systemelemente ist zusätzlich eine zielgrößenunabhängige Dokumentation der Wechselwirkungen sinnvoll. Hierzu kann ein Eintrag in der entsprechenden Zeile und Spalte der wechselwirkenden Systemelemente in der MDM  $\underline{M}^{int}$  erfolgen. Um die Einträge von den expertenbasierten Vermutungen zu den Wechselwirkungen unterscheidbar zu gestalten, können hierfür andere Zahlen oder Symbole verwendet werden. Werden vermutete Wechselwirkungszusammenhänge explizit widerlegt, so können die Einträge aus  $\underline{M}^{int}$  entfernt werden.

Die statistische Signifikanz kann als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden, mit der die Nullhypothese (bspw. *der untersuchte Faktor hat keinen Einfluss*) fälschlicherweise abgelehnt wird. Somit liegt es nahe, die Signifikanzwerte aus der Versuchsauswertung in die Sicherheit der Bewertung der Bedeutung des qualitativen Erklärungsmodells zu transformieren. Für die Transformation der zwischen 0 und 1 kontinuierlichen Signifikanzwerte zu den diskreten Werten der Sicherheit ist eine für den spezifischen Anwendungsfall geeignete Vorschrift zu erarbeiten. Ein Vorschlag für eine an die in der Statistik üblichen Signifikanzniveaus (PETERSEN 1991 und GUNDLACH 2004) angelehnte Transformationsvorschrift ist in Tabelle 15 dargestellt.

*Tabelle 15: Transformationsvorschrift zwischen den Signifikanzwerten und der Sicherheit der Bewertung der Bedeutung*

Signifikanzwert $p$	resultierende, neue Sicherheit $S_{B,x_i}^{neu}$
$\geq 0,1$	0
$0,05 \leq p < 0,1$	1
$0,01 \leq p < 0,05$	2
$< 0,01$	3

Für die verbleibenden Bewertungsdimensionen des qualitativen Erklärungsmodells, die Auftretenswahrscheinlichkeit und die dazugehörige Sicherheit, wird vorgeschlagen, diese für in Experimenten beobachtete Zusammenhänge auf die jeweiligen Maximalwerte zu setzen. Dadurch wird dem höheren Stellenwert der empirischen Analyse gegenüber der Expertenbefragung Rechnung getragen.

### **Aufbau des quantitativen Erklärungsmodells**

Die Struktur des quantitativen Erklärungsmodells stellt die direkte Verknüpfung mit den Ergebnissen der Versuchsauswertung sicher (siehe Abschnitt 3.5.3). Gleichung (3.15) zeigt am Beispiel eines allgemeinen, linearen Regressionsmodells wie die Ergebnisse der Versuchsauswertung in das quantitative Erklärungsmodell zu übertragen sind. Zu einer Zielgröße, also zu einem Zwischenprodukt- oder einem Qualitätsmerkmal, können beliebig viele Modelle mit unterschiedlichen und nicht wechselwirkenden Faktoren im quantitativen Erklärungsmodell abgelegt werden. Sind Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Modellen zu einer Zielgröße zu erwarten, bestehen folgende Handlungsoptionen:

1. Berücksichtigung aller Einflussgrößen auf die betrachteten Zielgrößen in einem Analyseschritt
2. Identifikation voneinander unabhängiger, nicht wechselwirkender Ursache-Wirkungs-Ketten bzgl. der betrachteten Zielgrößen entsprechend Abschnitt 4.4.2. Falls die Einzelmodelle miteinander verknüpft sind, müssen die Regressionsmodelle in mehrere Ebenen des quantitativen Erklärungsmodells übertragen werden.

### **4.5 Zusammenfassung**

Aufbauend auf der Konzeption der Methodik wurden deren Teilmethoden sowie Schnittstellen vorgestellt und detailliert. Durch die Umsetzung der Teilmethoden wird das Beschreibungsmodell konkretisiert, das qualitative Erklärungsmodell erarbeitet und das zur Erreichung der Zielsetzung angestrebte, quantitative Erklärungsmodell geschaffen. Der entscheidende Mehrwert der Methodik zur Analyse komplexer Prozessketten gegenüber bestehenden Ansätzen basiert auf umfassenden Interpretationen des qualitativen Erklärungsmodells. Diese Interpretationen werden in Iterationsschleifen sowohl zur effizienten Durchführung der Methode zur Wissensakquisition und Vervollständigung des qualitativen Erklärungsmodells selbst eingesetzt, als auch zur zielgerichteten Planung der empirischen Untersuchungen verwendet. Die Erarbeitung eines Konzeptes zur Rückführung quantitativer Erkenntnisse schließt den Informationsfluss in das qualitative Erklärungsmodell ab. Folglich steht für die qualitätsorientierte Analyse komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten eine durchgängige Methodik zur Verfügung.



## 5 Anwendung am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen

### 5.1 Allgemeines

Im Anschluss an die Konzeption und Detaillierung erfolgt die Anwendung der Methodik am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen. Hierfür wurde der Produktionsanlauf einer komplexen, industrienahen Prozesskette methodisch begleitet. Diese Prozesskette ist im *iwb*-Forschungs- und Demonstrationszentrum für Batteriezellen abgebildet und wird im folgenden Abschnitt beschrieben. An diesem Fallbeispiel werden die drei Teilmethoden validiert. Die Planung und Durchführung der empirischen Analyse wird jeweils an einem prozessbezogenen und einem prozessübergreifenden Beispiel aus dem Produktionsanlauf der Prozesskette angewendet. Abgeschlossen wird dieses Kapitel durch eine technologische Bewertung und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Gesamtmethodik. Da der Aufbau und die grundsätzliche Funktionsweise der zu fertigenden Lithium-Ionen-Zellen für das Verständnis der Prozesskettenstruktur und der zu untersuchenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen essentiell sind, werden diese im Folgenden kurz erläutert.

### 5.2 Ausgangssituation

#### 5.2.1 Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Zellen

Die Hauptkomponenten von Lithium-Ionen-Zellen sind die positive und negative Elektrode, der Elektrolyt, der Separator (siehe Abbildung 27) und das Gehäuse bzw. die Verpackung. Die gebräuchliche Verwendung der Begriffe *Anode* für die negative Elektrode und *Kathode* für die positive Elektrode im Zusammenhang mit Lithium-Ionen-Zellen bezieht sich abweichend von der strengen elektrochemischen Definition auf die Rolle der beiden Elektroden im Entladefall (VUORILEHTO 2013). Beim Entladevorgang kommt es zur Einlagerung, der sog. Interkalation, von Lithium-Ionen in die Kathode und zu deren Deinterkalation aus der Anode sowie zu einem Ionenstrom durch den Elektrolyt und die Poren des Separators. Gleichzeitig fließen Elektronen über einen äußeren Leiterkreis von der Anode zur Kathode (LEUTHNER 2013). Beim Laden laufen diese Vorgänge umgekehrt ab. Das in kommerziellen Zellen gebräuchlichste und auch in den hier betrachteten Zellen verwendete Aktivmaterial für die negative Elektrode ist Graphit (VUORILEHTO 2013). Zur elektrischen Kontaktierung wird der Graphit auf eine 10 µm dünne Kupferfolie aufgetragen. Für die Kathode

kommt in den untersuchten Zellen Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid mit der Strukturformel  $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$ , auch als NMC-111 bezeichnet (VUORILEHTO 2013), zum Einsatz, welches sich auf einer 15  $\mu\text{m}$  dünnen Aluminiumfolie befindet.

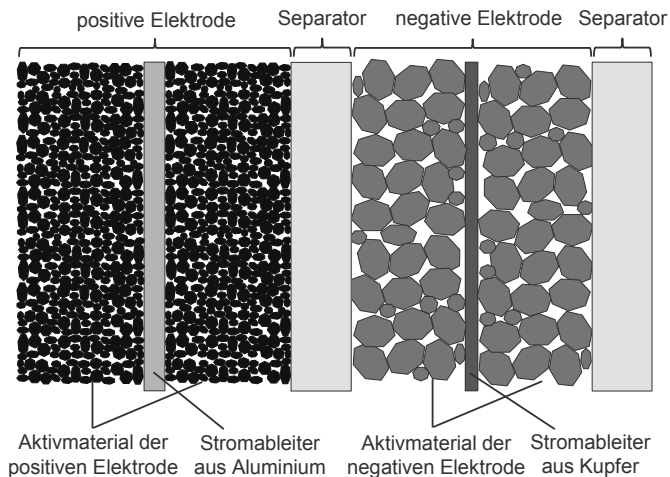


Abbildung 27: Elementarer Aufbau des Zellstapels von Lithium-Ionen-Zellen in Anlehnung an VUORILEHTO (2013)

Zur elektrischen Isolation der positiven und negativen Elektroden werden mikroporöse und ionenpermeable Separatoren eingesetzt. Die Dicke der handelsüblichen Separatoren für Lithium-Ionen-Zellen bewegt sich zwischen 15 und 30  $\mu\text{m}$ . Aufgrund der chemischen Stabilität und der geringen Kosten werden am häufigsten Separatoren aus Polyethen und Polypropen verwendet (VUORILEHTO 2013). In den Versuchszellen am *iwb* können Separatoren aus unterschiedlichen Materialien und mit verschiedenen Eigenschaften verarbeitet werden. Die Poren der Elektroden und des Separators sowie eventuell vorhandene Leerräume zwischen diesen Komponenten werden mit Elektrolyt befüllt. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem Lithiumsalz gelöst in organischen Lösungsmitteln (JOSSEN & WEYDANZ 2006). Entsprechend dem Industriestandard wird für die Versuchszellen Elektrolyt auf Basis des Lithiumsalzes Lithium-Hexafluorophosphat ( $LiPF_6$ ) verwendet.

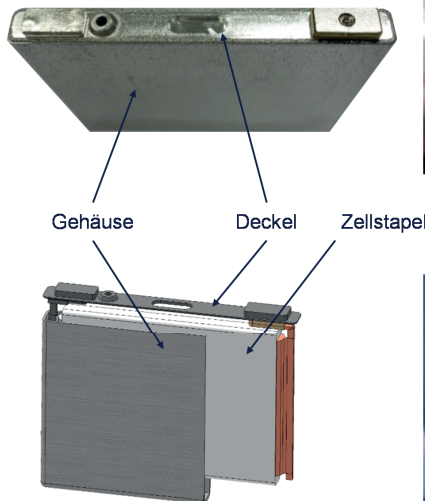
Lithium-Ionen-Zellen sind nach VUORILEHTO (2013) hermetisch gegenüber der Umwelt abzudichten. Dies ist zum einen aufgrund der Empfindlichkeit der verwendeten Chemikalien gegenüber Umwelteinflüssen, insbesondere Feuchtigkeit, und zum anderen wegen der von diesen Chemikalien ausgehenden Gefahr für Mensch und Umwelt erforderlich. Zur Gewährleistung einer hohen Diffusionsdichtigkeit gegenüber

Wasser werden Gehäuse bzw. Verpackungen aus Metallen verwendet (VUORILEHTO 2013). In Abhängigkeit der Gehäuseform und -gestalt können Lithium-Ionen-Zellen in drei grundsätzliche Bauformen unterteilt werden: zylindrische Zellen mit Metallgehäuse (sog. zylindrische Hardcase-Zellen), prismatische i. d. R. quaderförmige Zellen mit Metallgehäuse (sog. prismatische Hardcase-Zellen) und flache Zellen mit formlabiler Verpackung (sog. Pouch-Zellen) (WÖHRLE 2013). Im Forschungs- und Demonstrationszentrum des *iwb* können sowohl prismatische Hardcase-Zellen als auch Pouch-Zellen hergestellt werden. Das Gehäuse der am *iwb* betrachteten Hardcase-Zellen besteht aus Reinaluminium und besitzt eine Wandstärke von ca. 1 mm. Das Verpackungsmaterial der betrachteten Pouch-Zellen ist ein mehrlagiges Laminat aus Aluminium und isolierenden Kunststoffschichten mit einer Gesamtdicke von ungefähr 0,1 mm. Die beiden als Versuchsträger zur Verfügung stehenden Zelltypen sind in Abbildung 28 (oben) dargestellt. Innerhalb des Gehäuses bzw. der Verpackung befinden sich die beschriebenen Hauptkomponenten der Zelle. Bei den betrachteten Zellen werden die Elektroden und Separatorschichten in Form eines mehrlagigen Stapels in die Gehäuse eingebracht (siehe Abbildung 28, unten). Die Herstellung der beiden Zellvarianten, die auf dem Weg zu funktionsfähigen Zellen zu erzeugenden Zwischenprodukte und die dafür erforderliche Prozesskette werden im folgenden Abschnitt erläutert.

### 5.2.2 Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen

Ausgehend von den chemischen Rohstoffen gliedert sich die Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen in die Abschnitte *Elektrodenherstellung*, *Zellmontage* sowie *Formierung und Test* (REINHART ET AL. 2014). In Abhängigkeit der spezifischen Produktgestaltung und der anlagentechnischen Realisierung beinhaltet jeder dieser Abschnitte mehrere Hauptprozesse. Da die Prozesskette am *iwb* die drei Abschnitte der Zellherstellung vollständig abdeckt, die Hauptprozesse in automatisierten und industrienahen Anlagen realisiert wurden und die Prozesse sowie deren Abfolge dem Stand der Technik in der industriellen Zellproduktion entsprechen, liegt ein realistischer Anwendungsfall für die Methodik vor.

(1.1) Hardcase-Zelle

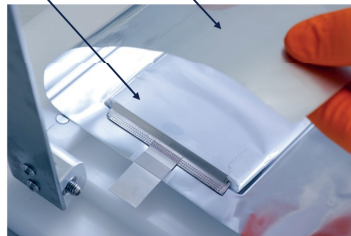


(1.2) Hardcase-Zelle im Schnitt (CAD-Modell)

(2.1) Pouch-Zelle



Pouch-Verpackung



(2.2) Pouch-Zelle offen

Abbildung 28: Am iw b hergestellte Lithium-Ionen-Zellen (Bildquelle 2.1 und 2.2: TUM, Heddergott)

Die im iw b-Forschungs- und Demonstrationszentrum realisierten Hauptprozesse und die jeweils resultierenden Zwischenprodukte sind in Abbildung 29 zusammen mit der im Weiteren verwendeten Prozess- und Zwischenprodukt Nummerierung dargestellt. Im Rahmen der Kooperation in diversen Forschungsprojekten wird der Prozess *Mischen* mit Unterstützung des Lehrstuhls für Technische Elektrochemie (TEC) der TUM durchgeführt. Die Beschichtungstinten werden in geschlossenen Behältern ans iw b geliefert. Der *Zelltest* findet in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES) der TUM statt.

Im Prozesskettenabschnitt der Elektrodenherstellung werden die Hauptprozesse chargenweise jeweils für die Anodenmaterialien und die Kathodenmaterialien durchgeführt. Eine *Charge* ist bei den Prozessen *1\_Mischen* und *2\_Speichern* durch einen Behälter mit Beschichtungstinte bestimmt und umfasst ein maximales Chargenvolumen von fünf Litern. Die nachfolgenden Prozesse arbeiten mit der Charge *Elektrodenrolle*. In Abhängigkeit der zu beschichtenden Länge werden eine oder mehrere

Chargen Beschichtungstinte zu einer Elektrodenrolle verarbeitet. Dabei sind die Prozesse 3\_Vorbehandlung der Substratfolien, 4\_Beschichten und 5\_Infrarottrocknung prozessbedingt materialflusstechnisch gekoppelt und in einer Anlage realisiert. Darüber hinaus sind diese Prozesse für die Herstellung doppelseitig beschichteter Elektroden zweimal zu durchlaufen, da jeweils nur eine Seite beschichtet und getrocknet werden kann.

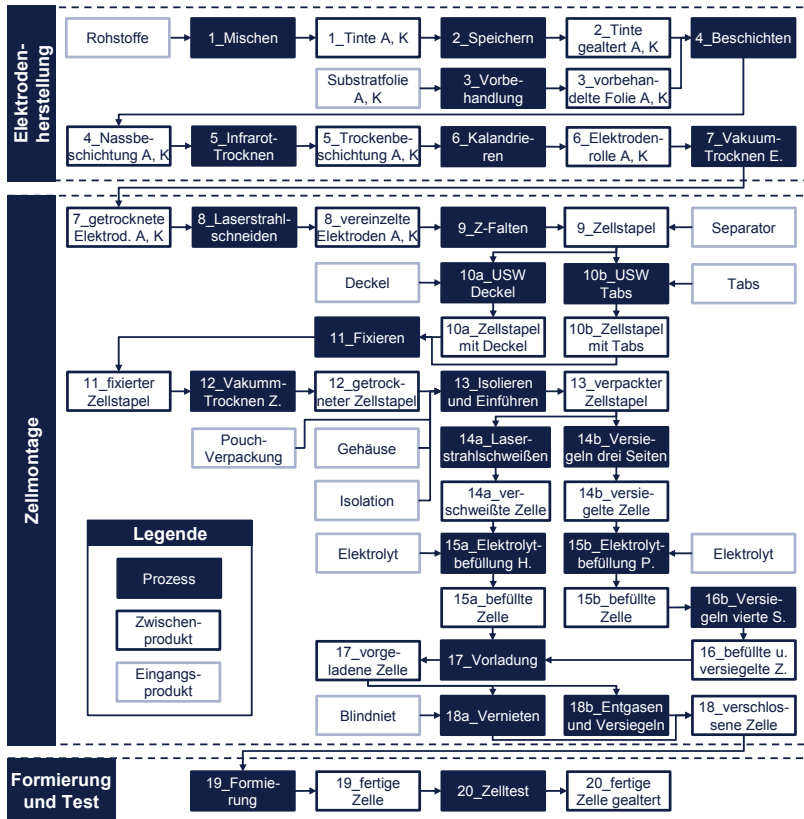


Abbildung 29: Gozintograph für die Herstellung der Produktvarianten  
(a) Hardcase- und (b) Pouch-Zelle (A: Anode, K: Kathode, USW: Ultraschallschweißen)

Der Fertigungsprozess 8\_Laserstrahlschneiden vereinzelt die Elektrodenrollen zu Elektrodenblättern, welche in speziellen Magazinen dem Folgeprozess zur Verfügung gestellt oder gelagert werden können. Im Stapelprozess werden die einzelnen

Anoden- und Kathodenblätter zusammen mit dem Separator zu Zellstapeln verarbeitet. Dabei ist eine Charge *Separatorrolle* zur Herstellung einer Vielzahl von Zellstapeln ausreichend. Ab dem Stapelprozess liegt bis zum letzten Prozessschritt ein stückweiser Materialfluss vor. Der Zellstapel durchläuft die Folgeprozesse bis einschließlich Prozess 11 in speziellen Werkstückträgern mit Spannfunktion. Nach dem Fixieren des Zellstapels werden Kunststoffbehälter zur Umsetzung des Materialflusses eingesetzt. Durch die Montage mit diskreten Eingangsprodukten, deren Herstellung hier nicht betrachtet wird, werden aus Zellstapeln Lithium-Ionen-Zellen aufgebaut und mit Elektrolyt befüllt. In den Prozessen 17 *Vorladung* und 19 *Formierung* werden mit den Zellen erste elektrische Lade- und Entladevorgänge durchgeführt. Da es während der Vorladung zur verstärkten Gasbildung kommt, werden die Zellen erst danach endgültig verschlossen. Mit Prozess 19 *Formierung* ist die Zellherstellung abgeschlossen. Prozess 20 *Zelltest* bestimmt mit Hilfe unterschiedlicher, teils sehr zeitintensiver Prüfvorgänge die Qualitätsmerkmale der Lithium-Ionen-Zellen. Eine Unterscheidung in Prozesse zur Montage von Hardcase-Zellen (mit *a* gekennzeichnet) und Prozesse zur Montage von Pouch-Zellen (mit *b* gekennzeichnet) findet statt, wenn eine unterschiedliche Prozessführung zu erwarten ist (bspw. Prozesse 10 und 15) oder gar verschiedene Prozesse und Anlagen vorliegen (Prozesse 14 und 18).

Der Aufbau der Lithium-Ionen-Zellen und die chemischen Eigenschaften der verwendeten Materialien führen im Gegensatz zu konventionellen Fertigungs- und Montagesystemen zu zwei Besonderheiten bzgl. der erforderlichen Umgebungsbedingungen. Kontaminationen des Zellinneren und insbesondere der Elektroden durch leitfähige Partikel können im Betrieb der Zellen ein Sicherheitsrisiko darstellen. Solche Partikel können bei mechanischen Beanspruchungen der Beschichtungen und der dünnen Separatoren durch ladezustands- und temperaturabhängige Volumenänderungen interne Kurzschlüsse verursachen (WEBER & ROTH 2013). Um diesem Risiko entgegenzuwirken, wird die Elektrodenherstellung im Allgemeinen in Reinräumen durchgeführt. SIMON (2013) empfiehlt für das Beschichten, das Kalandrieren und die Zellmontage eine Umgebungsbedingung entsprechend der ISO-Klassifizierungszahl 7 nach DIN EN ISO 14644-1. Neben der Vermeidung von Partikelkontamination ist der Wassergehalt in der Zelle zu reduzieren. Wasser führt mit den üblicherweise verwendeten Elektrolyten zu Nebenreaktionen und Gasbildung. Darüber hinaus lagert sich Wasser in Graphitanoden ein und reduziert dadurch die Kapazität der Zelle (SIMON 2013). Folglich sind insbesondere in der Zellmontage und bei der Elektrolytbefüllung Maßnahmen zur Vermeidung von Wassereintrag in die Zellmaterialien zu treffen. Eine mögliche Maßnahme ist die Durchführung dieser Prozesse in trockener Umgebung, bspw. in Trockenräumen. SIMON (2013) schlägt

Umgebungsbedingungen mit einem Taupunkt von  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  und JOSSEN & WEYDANZ (2006) mit einem Taupunkt von  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  vor. Im Forschungs- und Demonstrationszentrum am *iwb* wurden diese Forderungen an die Umgebungsbedingungen durch die Integration der Elektrodenherstellung in einen Reinraum mit einer ISO-Klassifizierungszahl 6 nach DIN EN ISO 14644-1 und der Zellmontage und Formierung in einen Trockenraum mit einem Taupunkt von  $-60^{\circ}\text{C}$  erfüllt (siehe Abbildung 30). Durch die Einführung und Durchsetzung strenger Regeln der technischen Sauberkeit werden in der Zellmontage im Trockenraum Umgebungsbedingungen erreicht, die der Forderung eines Reinraums mit einer ISO-Klassifizierungszahl 7 nach DIN EN ISO 14644-1 entsprechen.



*Abbildung 30: iwb-Labor zur Elektrodenherstellung im Reinraum (links) und zur Zellmontage im Trockenraum (rechts)*

## 5.3 Akquisition von Expertenwissen

### 5.3.1 Prozesskettenbeschreibung

Als Ausgangspunkt für die weitere Methodik ist nach Abschnitt 4.2.1 an erster Stelle eine grundlegende Prozesskettenbeschreibung zu erarbeiten bzw. aus vorhandenen Dokumenten und Informationen zusammenzufassen. Aus dem Gozintographen in Abbildung 29 lässt sich die sequentielle Reihenfolge der Prozesse zur Zellherstellung ableiten. Parallel verlaufende Prozesse treten ausschließlich in der Elektrodenherstellung auf. Die Prozessalternativen in der Zellmontage dienen der Herstellung der beiden Zellvarianten. Als Detaillierungstiefe für die qualitätsorientierte Analyse wird die Prozesskettenstruktur auf der Ebene der Hauptprozesse entsprechend Tabelle 16 gewählt. Folglich handelt es sich um eine strukturorientierte Modellierung der Prozesskette, bei der die Hauptprozesse wirkungsorientiert betrachtet werden. Eine detaillierte Analyse der wichtigsten Hauptprozesse erfolgt in eigenständigen Forschungsarbeiten (KURFER ET AL. 2012 und REINHART & ZAH 2014).

*Tabelle 16: Prozessfolge der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen am iwB:  
(a) spezifisch für Hardcase-Zellen, (b) spezifisch für Pouch-Zellen*

Nr.	Hauptprozess	Zwischenprodukt	Abschnitt
1	Mischen	Beschichtungstinten A und K	Elektroden-herstellung
2	Speichern	Beschichtungstinten gealtert A und K	
3	Vorbehandlung	vorbehandelte Folie A und K	
4	Beschichten	Nassbeschichtung A und K	
5	Infrarot-Trocknen	Trockenbeschichtung A und K	
6	Kalandrieren	Elektrodenrolle A und K	
7	Vakuum-Trocknen Elektroden	getrocknete Elektrodenrollen A und K	
8	Laserstrahlschneiden	vereinzelte Elektroden A und K	Zell-montage
9	Z-Falten mit Einzelelektroden	Zellstapel	
10a	Ultraschallschweißen Deckel	Zellstapel mit Deckel	
10b	Ultraschallschweißen Tabs	Zellstapel mit Tabs	
11	Fixieren des Zellstapels	fixierter Zellstapel	
12	Vakuum-Trocknen Zellstapel	getrockneter Zellstapel	
13	Isolieren und Einführen	verpackter Zellstapel	
14a	Laserstrahlschweißen	verschweißte Zelle	
14b	Versiegeln drei Seiten	versiegelte Zelle	
15a	Elektrolytbefüllung Hardcase	befüllte Hardcase-Zelle	
15b	Elektrolytbefüllung Pouch	befüllte Pouch-Zelle	
16b	Versiegeln vierte Seite	befüllte und versiegelte Zelle	
17	Vorladung	vorgeladene Zelle	
18a	Vernieten	verschlossene Zelle	
18b	Entgasen und Versiegeln	verschlossene Zelle	
19	Formierung	fertige Zelle	Formierung und Test
20	Zelltest	fertige Zelle gealtert	

Die für die einzelnen Maschinen und Anlagen sowie für die damit realisierten Prozesse relevanten Maschinen- und Prozessparameter wurden in der Phase der Anlagenkonzeption in Zusammenarbeit mit den Lieferanten definiert. Insgesamt wurden für die 20 Prozesse 252 Stellgrößen gesammelt. Die Störgrößen zu jedem der Hauptprozesse wurden anhand der Dimensionen *Mensch, Material, Umwelt, Maschine, Prozess und Messung* systematisch erarbeitet. Besonderheiten ergaben sich bzgl. störender Umwelteinflüsse. Wie beschrieben befindet sich die komplette Prozesskette in einer kontrollierten Umgebung bzgl. technischer Sauberkeit, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit. Störungen der Systemtechnik und Verstöße gegen Verhaltensregeln, welche die klimatischen Bedingungen beeinflussen, sind jedoch nicht auszuschließen und aufgrund der potentiell erheblichen Auswirkungen auf die Prozesskette zu berücksichtigen. Weitere im Zusammenhang mit der Prozesskette zur Herstellung



von Lithium-Ionen-Zellen identifizierte Störgrößen sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Auszug der für die Zellherstellung identifizierten Störgrößen

Ursachenkategorie für Störungen	Beispiele für Störgrößen
Mensch	Fehlbedienung (bspw. Verwendung falscher Parametersätze), Kontamination durch Berührung und Atmung,...
Material	Verunreinigungen, Abweichungen von den Spezifikationen,...
Umwelt	Abweichungen von den klimatischen Sollbedingungen, schwankende Größen der Gebäudeinfrastruktur (bspw. Abluftvolumenströme, Kühlwassertemperaturen, Reinheit von Inertgasen,...),...
Maschine	Verschleiß, Kontamination der Produkte (bspw. mit Schmierstoffen, durch Querkontamination,...),...
Prozess	unbekannte Zustandsgrößen, unregelte Prozessparameter (bspw. Temperaturen in Abkühlphasen),...
Messung	Verschleiß von Messmitteln, mangelnde Kalibrierung, unfähige Messmethode,...

Im Anschluss an die Betrachtung der Stell- und Störgrößen sind die in der Prozesskette auftretenden Produktmerkmale zu ermitteln. Die Qualitätsmerkmale wurden durch die BMW AG im Rahmen der gemeinsamen Forschungsprojekte festgelegt. Unabhängig vom Zelltyp wurden die in Tabelle 18 aufgeführten 18 Qualitätsmerkmale definiert und mit einer nummerierten Kurzbezeichnung (*QM\_1*, *QM\_2*, ..., *QM\_18*) versehen. Die Qualitätsmerkmale gliedern sich in fünf Kategorien: Geometrie, Masse, Sicherheit, Funktion und Lebensdauer. Unter *Geometrie* werden die äußeren Gehäuseabmessungen verstanden, welche für die Integration der Batteriezellen in das übergeordnete Batteriesystem relevant sind. Die Sicherheitsmerkmale beschreiben die Stabilität der Aktivmaterialien, die Zuverlässigkeit der Sicherheitseinrichtungen, wie bspw. der Überdruck-Berstmembran, und die Gefährdungsstufe der Zelle im Falle einer Fehlfunktion. Letztere wird mit Hilfe des EUCAR-Hazard-Level (engl. European Council for Automotive Research & Development, SANDIA NATIONAL LABORATORIES 2006) quantifiziert. Die Kategorie *Funktion* umfasst die aus den primären Funktionen der Lithium-Ionen-Zellen abgeleiteten Merkmale. Dabei sind die bezogenen Größen *Energiedichte* und *spezifische Energie* sowie *Leistungsdichte* und *spezifische Leistung* über die zellspezifische Masse und das zellspezifische Volumen voneinander abhängig. Dementsprechend ist die Ermittlung jeweils einer Energie- und Leistungsgröße oder die Messung der nicht bezogenen Größen *Energieinhalt* und *Leistung* ausreichend, um anschließend die abhängigen Qualitätsmerkmale berechnen zu können. Die *Leistungsfähigkeit* bezeichnet das Verhältnis von

Leistung zu Energie und damit die aus der Zelle abrufbare Energiemenge in Abhängigkeit der geforderten Leistung (WESTERMEIER ET AL. 2013). Die Merkmale der Kategorie *Lebensdauer* beschreiben die Kapazität der Zelle über der Zeit oder der Anzahl der Vollzyklen. Unter einem Vollzyklus wird eine vollständige Entladung, also vom Ladezustand 100 % bis zum Ladezustand 0 %, in Verbindung mit einer vollständigen Ladung der Zelle, also vom Ladezustand 0 % bis zum Ladezustand 100 %, verstanden (JOSSEN & WEYDANZ 2006).

*Tabelle 18: Betrachtete Qualitätsmerkmale nach WESTERMEIER ET AL. (2013)*

Kategorie	Qualitätsmerkmal	Kürzel	Einheit	Produktionsrelevanz
Geometrie	äußere Gehäusegeometrie	QM_1	mm	ja
Masse	Masse	QM_2	g	ja
Sicherheit	Stabilität der Aktivmaterialien	QM_3	-	nein
	Zuverlässigkeit der Sicherheitseinrichtungen	QM_4	-	ja
	Gefährdungsstufe bei Fehlfunktion	QM_5	Hazard-Level	ja
Lebensdauer	Zykluslebensdauer	QM_6	Zyklen	ja
	kalendarische Lebensdauer	QM_7	d	ja
Funktion (engl. performance)	Kapazität	QM_8	Ah	ja
	Selbstentladung	QM_9	mV/d	ja
	Innenwiderstand	QM_10	mΩ	ja
	Betriebsspannung	QM_11	V	nein
	maximaler Ladestrom	QM_12	A	nein
	maximaler Entladestrom	QM_13	A	nein
	Leistungsfähigkeit	QM_14	1/s	ja
	spezifische Energie	QM_15	Wh/kg	ja
	spezifische Leistung	QM_16	W/kg	nein
	Energiedichte	QM_17	Wh/l	ja
	Leistungsdichte	QM_18	W/l	nein

Einige der genannten Qualitätsmerkmale werden als nicht produktionsrelevant eingestuft und deshalb in der weiteren Anwendung der Methodik nicht berücksichtigt. Dies betrifft zum einen die Merkmale *Stabilität der eingesetzten Aktivmaterialien* und *Betriebsspannung*, welche ausschließlich durch die eingesetzten Materialien bestimmt werden. Zum anderen sind die Merkmale *Leistungsdichte*, *spezifische Leistung*, *maximaler Entladestrom* und *maximaler Ladestrom* vorwiegend von der Auslegung der Zelle abhängig, bspw. von Größen wie der Beschichtungsdicke und den Leiterquerschnitten der stromführenden Komponenten. Darüber hinaus sind zu

deren Ermittlung zusätzliche Randbedingungen zu definieren, wie eine maximal zulässige Zelltemperatur und einer mindestens zu erreichenden Lebensdauer, welche für die betrachteten Zellen nicht vorliegen.

Die Eingangsproduktmerkmale lassen sich aus den Spezifikationen und Anforderungen an die einzelnen Eingangsprodukte ableiten. Im Falle der Herstellung von Batteriezellen zählen hierzu Dokumentationen wie technische Zeichnungen zur geometrischen Beschreibung des Zellgehäuses und Datenblätter zur Spezifikation der chemischen Rohstoffe. In Tabelle 19 sind alle Eingangsprodukte der Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen am *iwb* sowie Beispiele für deren Merkmale aufgeführt.

*Tabelle 19: Eingangsprodukte der Zellproduktion und deren beispielhafte Merkmale*

<b>Eingangsprodukte</b>	<b>Beispiele für Eingangsproduktmerkmale</b>
NMC, Graphit, Leitadditiv, Binder und Lösemittel	Partikelgrößenverteilung, Partikelform, Reinheit, Feuchtegehalt, Schüttdichte,...
Substratfolie für A und K	Breite, Dicke, Grathöhe an den Schnittkanten, Material, Verunreinigung der Oberfläche,...
Separator	Breite, Dicke, Porosität, Tortuosität, Flächengewicht, Material, kritischer Biegeradius,...
Klebefolien zur Fixierung und Isolation des Zellstapels	Breite, Dicke der Trägerfolie, Gesamtdicke, Material, Bruchkraft, Klebekraft, Elektrolytbeständigkeit,...
Hardcase-Gehäuse mit Deckelbaugruppe	geometrische Abmessungen, Material, Wandstärke, Oberflächenrauigkeit, Verunreinigungen der Oberflächen, Dichtigkeit der Pole, Grathöhen, Spaltmaß zwischen Deckel und Gehäuse,...
Pouch-Verpackung	geometrische Abmessungen, Dicke, Verunreinigungen der Oberflächen, Isolationsfehler der Oberflächen,...
Tabs	geometrische Abmessungen, Oberflächenrauigkeit, Grundmaterial, Beschichtungsmaterial, geometrische Abmessungen des Siegelbändchens, Position des Siegelbändchens, Material des Siegelbändchens,...
Elektrolyt	Viskosität, Feuchtegehalt, Oberflächenspannung, Gassättigung, Zusammensetzung,...
Blindniet	geometrische Abmessungen, Material, Soll-Nietkraft,...

Die in der Prozesskette auftretenden Zwischenprodukte sind im Gozintographen in Abbildung 29 dargestellt. Die dazugehörigen Zwischenproduktmerkmale wurden mit Hilfe der in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Dekomposition der Zwischenprodukte und einer anschließenden Anwendung allgemeiner Merkmalslisten erarbeitet. Darüber hinaus erfolgte eine gedankliche Prüfung der Auswirkungen der nützlichen und schädlichen Funktionen des Prozesses, welcher das Zwischenprodukt erzeugt hat, um so ein möglichst vollständiges Bild der beeinflussten Zwischenproduktmerkmale zu

erhalten. In Abbildung 31 wird die Beschreibung der Prozesskette am Beispiel des Prozesses 9\_Z-Falten konkretisiert. Der Prozess verarbeitet die Zwischenprodukte *Einzelblätter Anoden* und *Einzelblätter Kathoden* sowie das Eingangsprodukt *Separator*. Unter Einwirkung der ausschnittsweise aufgezeigten Prozess- und Maschinenparameter sowie einer Reihe von Störgrößen wird das Zwischenprodukt *Zellstapel* erzeugt. Die Ein- und Ausgangsgrößen wurden zu jedem der 20 Hauptprozesse für die Herstellung von Hardcase- und Pouch-Zellen gesammelt, sodass ein im Sinne der Methodik ausreichender Beschreibungsstand der Prozesskette vorlag.

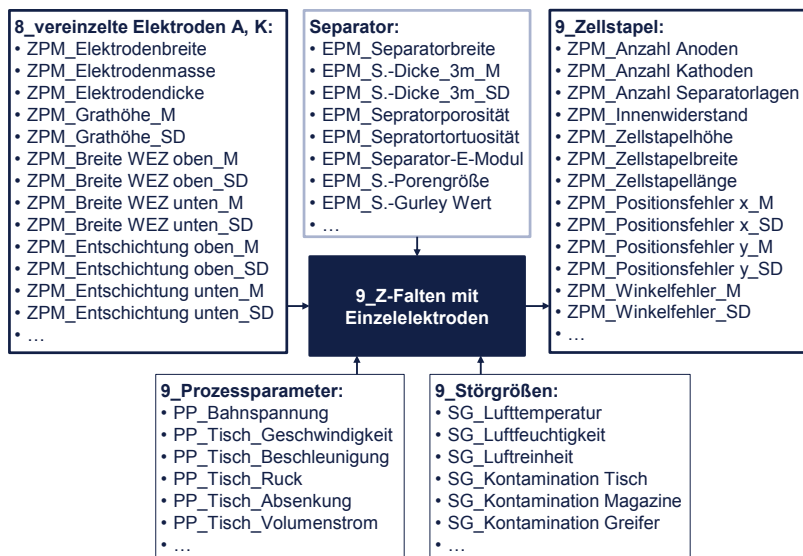


Abbildung 31: Prozessbeschreibung am Beispiel von Prozess 9\_Z-Falten

### 5.3.2 Durchführung und Ergebnisse der Expertenbefragung

Die Befragung der Experten im Bereich der Auslegung und Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen erfolgte unter Anwendung des in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen, rechnerbasierten Akquise-Werkzeuges. Dieses wurde auf Basis der im Vorhinein erarbeiteten Prozesskettenbeschreibung spezifiziert, sodass den Experten umfangreiche Listen zu den Ursache- und Wirkungskategorien zur Verfügung standen. Dabei wurden die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge für beide Produktvarianten abgefragt. Das Projektteam umfasste zwölf Experten aus den an den Forschungsprojekten

ProLIZ<sup>6</sup> und ExZellTUM<sup>7</sup> beteiligten Unternehmen und Forschungseinrichtungen. Die Befragung wurde in zwei Schritten durchgeführt (siehe Abschnitt 4.2.3). Im ersten Schritt wurden die Experten unabhängig voneinander befragt. Die Informations-eingabe fand durch eine selbstständige Anwendung des Akquise-Werkzeuges durch die Experten im Anschluss an eine kurze Einführung statt. Mit Freitexteingaben wurde entsprechend der Fallunterscheidung in Tabelle 9 verfahren. Der erste Befragungsschritt wurde abgeschlossen, als die in Tabelle 32 im Anhang dargestellten Leitfragen und Kennzahlen sowie die ausgesprochenen Empfehlungen erreicht wurden. Der zweite Akquiseschritt wurde durch den parallelen Aufbau und die Interpretation des qualitativen Erklärungsmodells begleitet. Dabei kamen die Kennzahlen zur Identifikation von Wissensbedarfen aus Abschnitt 4.3.3 zum Einsatz. Die konkrete Durchführung erfolgte in zwei zeitlich nacheinander stattfindenden, aufeinander aufbauenden Befragungssitzungen im „Workshop-Charakter“ wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben. Dabei wurde die Prozesskette zweimal in Vorwärtsrichtung prozessweise durchgearbeitet, sodass die beteiligten Experten den Großteil der nach dem ersten Befragungsschritt vorhandenen losen Enden, inaktiven Elemente und rein aktiven Zwischenproduktmerkmale ausräumen konnten.

Unter Berücksichtigung aller Ergänzungen bestand die Prozesskettenbeschreibung nach der Expertenbefragung aus 626 Elementen. Davon gehörten 401 Elemente der Kategorie der Produktmerkmale an, wovon wiederum 302 auf Zwischenproduktmerkmale und 99 auf Eingangsproduktmerkmale entfielen, sowie 225 Elemente der Kategorie der Prozess- und Maschinenparameter zuzuordnen waren. Im Rahmen der Expertenbefragung wurden diese Elemente mit 2.165 Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen verknüpft. Von diesen Bewertungen wiesen ca. 75 % eine hohe Sicherheit der Bewertung der Bedeutung auf ( $S_B \in \{2, 3\}$ ) und 24,5 % wurden von mehr als einem Experten angegeben.

---

<sup>6</sup> Produktionstechnik für Lithium-Ionen-Zellen (ProLIZ), Förderkennzeichen 02PJ2314, gefördert vom BMBF

<sup>7</sup> Exzellenz-Zentrum für Batterie-Zellen an der TUM (ExZellTUM), Förderkennzeichen 03X4633A, gefördert vom BMBF

## 5.4 Aufbau und Interpretation des qualitativen Erklärungsmodells

Die im Zuge der Expertenbefragung konkretisierte Prozesskettenbeschreibung ist die Grundlage für den Aufbau des deduktiv-qualitativen Erklärungsmodells nach Abschnitt 3.5.1 dar. Die Verwendung dieser Prozesskettenbeschreibung im Akquise-Werkzeug stellt die Kompatibilität der Informationen sicher. Zum Aufbau des qualitativen Erklärungsmodells sind die im Akquise-Werkzeug abgelegten Informationen in die MDM des Erklärungsmodells zu übertragen. Dabei ist bzgl. der Verarbeitung von Mehrfachmeinungen, der Berechnung indirekter Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und der Berücksichtigung von Wechselwirkungen entsprechend Abschnitt 3.5.2 vorzugehen. In Verbindung mit den vier Beschreibungsdimensionen für Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge *Bedeutung*, *Sicherheit der Bewertung der Bedeutung*, *Auftretenswahrscheinlichkeit* und *Sicherheit der Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit* wurde auf diese Weise ein aus sechs Schichten bestehendes MDM-basiertes, qualitatives Erklärungsmodell der gesamten Prozesskette aufgebaut.

Während der Expertenbefragung wurden bereits vorläufige Erklärungsmodelle aus Zwischenständen der Befragung erstellt. Diese ermöglichten mit Hilfe der in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Methoden zur Identifikation von Wissensbedarfen eine gezielte Vervollständigung des Erklärungsmodells durch eine Rückkopplung dieser Informationen in den zweiten Schritt der Expertenbefragung.

Nach der Vervollständigung des qualitativen Erklärungsmodells wurde dieses für die Vorbereitung empirischer Analysen der Prozesskette weiter interpretiert und auf die wesentlichen Informationen reduziert. Die Reduktion basierte zum einen auf dem Ausschluss von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen aufgrund eines geringen Pareto-Risikos und zum anderen auf dem Ausschluss von Elementen aufgrund fehlender Ursache-Wirkungs-Ketten zu den Qualitätsmerkmalen des Fertigproduktes. Das Pareto-Risiko wurde mit Hilfe von Gleichung (4.5) berechnet. Dabei wurden in der Pareto-Analyse nur Zusammenhänge mit hohen Sicherheitswerten berücksichtigt ( $S_A, S_B > 2,5$ ). Das resultierende Pareto-Diagramm der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und die zu Grunde liegende Einteilung in Risikoklassen mit deren Grenzen sowie die Kategorisierung der Zusammenhänge ist in Anhang 9.2 zu finden. Es wurden alle Zusammenhänge der Kategorie C ausgeschlossen, wobei diese Kategorie die Klassen mit dem geringsten Risiko und einem kumulierten Anteil am Gesamtrisiko von weniger als 5 % umfasste. Dies entsprach einem Ausschluss von ca. 24 % der in der Pareto-Analyse berücksichtigten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge. Somit konnte ein nennenswerter Beitrag zur Reduktion der Systemkomplexität mit einer

hohen Wahrscheinlichkeit des Ausschlusses nicht relevanter Zusammenhänge erreicht werden. Im Anschluss an die Pareto-Analyse wurden 56 Prozesskettenelemente aus dem Erklärungsmodell entfernt, welche weder direkt noch indirekt auf die Qualitätsmerkmale wirkten (siehe Abschnitt 4.3.4). Dies erfolgte anhand der Kennzahl *Qualitätsrelevanz* entsprechend Gleichung (4.4). Somit verblieb für die weitere Interpretation das qualitative Erklärungsmodell auf Basis mehrerer MDM mit jeweils 580 Prozesskettenelementen. Aus den in Abschnitt 4.3.3 vorgestellten Kennzahlen werden im Folgenden zur Vorbereitung der empirischen Analysen die Aktivität der Prozesse, die Qualitätsrelevanz der Prozesskettenelemente und die Passivsumme der Qualitätsmerkmale am Beispiel der Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen dargestellt.

In Abbildung 32 wird die Aktivität der Prozesse nach Gleichung (4.3) als Beispiel einer prozessbezogenen Auswertung des qualitativen Erklärungsmodells gezeigt. Prozesse mit hoher Aktivität ( $> 50\%$ ) sind 8\_Laserstrahlschneiden, 9\_Z-Falten und 10\_Ultraschall-Schweißen. Diese Prozesse werden überwiegend von den eigenen Stellgrößen beeinflusst und nicht von den anderen Einflussgrößen dominiert. Prozesse mit geringer Aktivität ( $< 35\%$ ) sind 11\_Fixieren des Zellstapels und 16b\_Versiegeln der Pouch-Verpackung nach der Elektrolytbefüllung. Dementsprechend werden deren Prozessergebnisse vorwiegend von den eingehenden Zwischenproduktmerkmalen, Eingangsproduktmerkmalen und Störgrößen beeinflusst. Für die prozessbezogene empirische Analyse dieser Prozesse wurde abgeleitet, dass besonderes Augenmerk auf die Berücksichtigung bzw. das Konstanthalten dieser Größen zu legen ist. Demgegenüber wurde der Analyseschwerpunkt bei den Prozessen mit großer Aktivität auf das Prozessverständnis bzgl. der Stellgrößen gelegt.

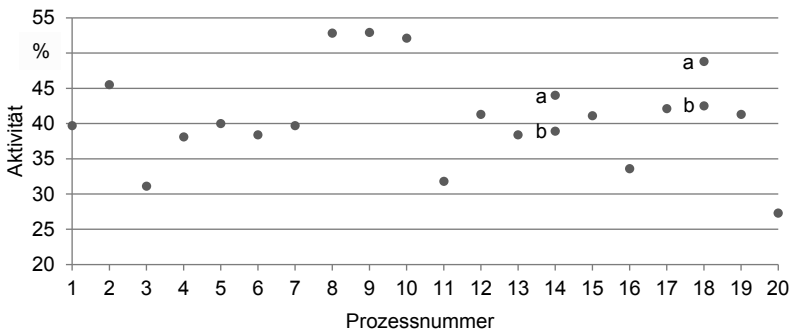


Abbildung 32: Aktivität der Prozesse (Prozessnummerierung siehe Tabelle 16)

Aus dem Bereich der prozessübergreifenden Interpretationen des qualitativen Erklärungsmodells wird die normierte Qualitätsrelevanz, also der kumulierte Einfluss der Prozesskettenelemente auf die Qualitätsmerkmale der Batteriezellen, in Abbildung 33 veranschaulicht. Alle im Erklärungsmodell enthaltenen Elemente weisen erwartungsgemäß einen Zusammenhang mit den Qualitätsmerkmalen auf. Der theoretische Maximalwert von 3 wird nicht erreicht, aber einige Elemente sind diesem Wert sehr nahe. Diese Elemente sind insbesondere dem Prozesskettenabschnitt der Elektrodenherstellung zuzuordnen, wodurch die hohe Bedeutung der Prozessparameter der Elektrodenherstellung (bspw. der Volumenstrom der Schlitzdüse) und der Elektrodenmerkmale (bspw. die Schichthaftung) für die Zellqualität deutlich wird. Im Abschnitt der Zellmontage zeigt sich demgegenüber eine breitere Streuung der Aktivsummen. Dementsprechend existieren sowohl Elemente mit großem Qualitätseinfluss (bspw. die Geschwindigkeit des Stapeltisches) als auch welche mit sehr geringem Einfluss (bspw. die Materialwahl der Greifer im Stapelprozess). Zu beachten ist, dass sich nach Gleichung (4.4) der Betrag der Qualitätsrelevanz durch die Anzahl der beeinflussten Qualitätsmerkmale sowie durch den Bedeutungswert der einzelnen Einflüsse ergibt. Aus diesen Ergebnissen wurde zum einen gefolgert, dass der Aufwand für die empirische Analyse der Prozesskette durch eine gezielte Hinterfragung einiger Elemente der Zellmontage weiter reduziert werden kann. Zum anderen ist das Verständnis der Prozesse der Elektrodenherstellung zur Analyse prozessübergreifender Zusammenhänge unerlässlich. Nur wenn Elektroden mit konstanten Merkmalswerten bzw. mit gezielt einstellbaren Merkmalswerten hergestellt werden können, sind die Auswirkungen der nachfolgenden Prozesskettenabschnitte auf die Zellqualität analysierbar.

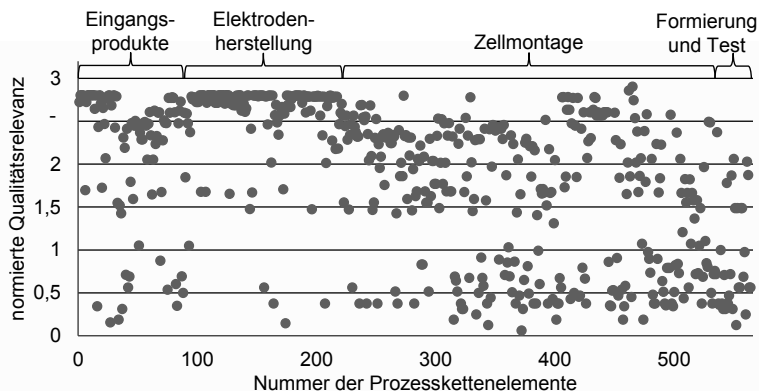


Abbildung 33: Normierte Qualitätsrelevanz der Prozesskettenelemente in Anlehnung an WESTERMEIER ET AL. (2014)



Die Berechnung der Passivsumme der Qualitätsmerkmale stellt eine weitere, prozess-übergreifende Interpretationsmöglichkeit dar (siehe Abschnitt 4.3.3). Die Passivsummen der Qualitätsmerkmale der betrachteten Lithium-Ionen-Zellen sind in Abbildung 34 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Qualitätsmerkmale Gehäusegeometrie (QM\_1) und Masse (QM\_2) dem geringsten Einfluss durch die Prozesskette unterliegen. Dieses Ergebnis ist plausibel, da es sich bei den Gehäusebauteilen um Zukaufteile handelt und ein Großteil der die Masse beeinflussenden Größen durch die Produktgestaltung definiert ist. Darüber hinaus bestätigt sich die anfängliche Annahme des geringen Produktionseinflusses auf die materialabhängigen Größen Betriebsspannung (QM\_11) und Stabilität der Aktivmaterialien (QM\_3) sowie auf die Qualitätsmerkmale maximaler Lade- und Entladestrom (QM\_12 und 13). Die hohe Passivsumme der spezifischen Leistung (QM\_16) lässt sich durch eine genauere Betrachtung der Bewertungen erklären. Die von den Experten zur spezifischen Energie (QM\_15) und Leistung angegebenen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge sind größtenteils identisch. Dies ist nachvollziehbar, da die zur Unterscheidung der beiden Merkmale beitragenden Größen vorwiegend der Produktgestaltung zuzuschreiben sind und dementsprechend nicht Gegenstand der Bewertung waren. Folglich ist die spezifische Energie zur Analyse der produktionsinduzierten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ausreichend, sodass die spezifische Leistung zusammen mit den genannten Qualitätsmerkmalen mit geringer Passivsumme im Weiteren nicht betrachtet wird. Neben der spezifischen Energie weisen die Qualitätsmerkmale Innenwiderstand (QM\_10), Kapazität (QM\_8), Leistungsfähigkeit (QM\_14), Selbstentladung (QM\_9), Zuverlässigkeit der Sicherheitsfunktionen (QM\_4), kalendarische Lebensdauer (QM\_7) und Zyklenlebensdauer (QM\_6) einen hohen Produktionseinfluss auf und sind daher in den Fokus der Betrachtungen zu setzen.

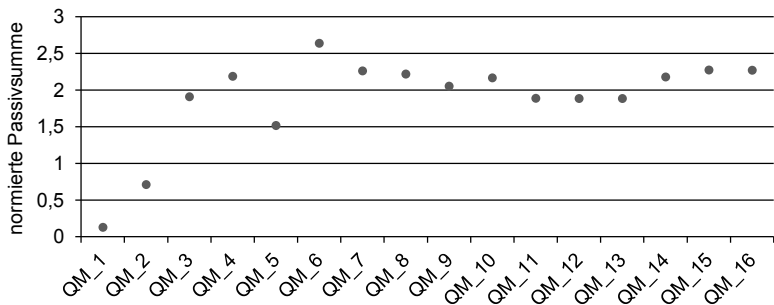


Abbildung 34: Normierte Passivsummen der Qualitätsmerkmale (Nummerierung siehe Tabelle 18, QM\_17 und QM\_18 aufgrund der Analogie zu QM\_15 und QM\_16 nicht betrachtet)

## 5.5 Empirische Prozesskettenanalyse

Die empirische Prozesskettenanalyse gliedert sich in eine prozessbezogene und eine prozessübergreifende Phase. Beide Phasen werden in diesem Abschnitt anhand von Beispielen aus der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen durchgeführt. Zunächst werden die empirische Analyse unterstützende und phasenunabhängige Vorbereitungsmaßnahmen für das spezifische Anwendungsszenario behandelt.

### 5.5.1 Vorbereitung der empirischen Analyse

Die besonderen Vorbereitungsmaßnahmen der empirischen Analyse komplexer Prozessketten umfassen die Prüfplanung, den Aufbau einer Datenbank zur Dokumentation der Produkt- und Prozessgrößen, das damit verknüpfte Zuordnungs- und Identifikationskonzept sowie die versuchsorientierte Produktionsplanung.

#### Prüfplanung

Mit Hilfe des fokussierten, qualitativen Erklärungsmodells wurde zu jedem Prozess die Prüfplanung nach Abschnitt 4.4.4 durchgeführt. Hierfür wurden die relevanten Größen aus dem Erklärungsmodell abgeleitet und als Prüfmerkmale in prozessweise Listen entsprechend Tabelle 13 eingetragen. Durch eine Vervollständigung der Einträge zu den Prüfverfahren und Prüfmitteln wurden die Informationen zur Messbarkeit der einzelnen Prüfmerkmale zusammen mit den Prozessexperten erarbeitet. Bei Bedarf wurde die Beschaffung von Prüfmitteln initiiert. In Tabelle 20 sind die Ergebnisse am Beispiel des aus dem Ultraschall-Schweißprozess ausgehenden Zwischenproduktes dargestellt. Aus diesen Listen ließen sich wichtige Informationen für die weitere Anwendung der Methodik gewinnen. Die Angaben in der Spalte Messbarkeit gingen in die phasenspezifische Definition der Untersuchungsziele ein. Darüber hinaus flossen die Prüfverfahren und die dafür einzusetzenden Prüfmittel in die Prüfpläne zu den Eingangsprodukten, Prozessen und Zwischenprodukten ein. Für die messtechnische Erfassung der als produktionsrelevant identifizierten Qualitätsmerkmale wurden Messprotokolle in Zusammenarbeit mit der BMW AG, dem TEC und dem EES erarbeitet. Diese beschreiben insbesondere den Prüfablauf, die verwendeten Strom- und Spannungsprofile sowie die klimatischen Bedingungen.

#### Dokumentationswerkzeug und Identifikationskonzept

Die Dokumentation der Prozess- und Produktdaten im *iwb*-Forschungs- und Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen erfolgt mit Hilfe einer Datenbank. Die in der Datenbank zu berücksichtigenden Größen wurden direkt aus dem fokussierten, qualitativen Erklärungsmodell der Prozesskette abgeleitet. Ein erster Entwurf

der Datenbankstruktur konnte mit der zur Verfügung stehenden Prozesskettenbeschreibung erarbeitet werden. Zur Sicherstellung einer eindeutigen Zuordnung der zu sammelnden Daten zu den Produkten wurde ein für die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen spezifisches Zuordnungskonzept entwickelt. Dieses Konzept, welches direkt mit der detaillierten Datenbankstruktur korrespondiert, ist in Abbildung 35 dargestellt.

Tabelle 20: Prüf- und Messmittelbedarfsplanung für das Zwischenprodukt 10\_verschweißter Zellstapel

Prüfmerkmal	Prüfverfahren	Prüfmittel	Messbarkeit
ZPM_10_1_Abstand_Stapel_Deckel	Längenmessung	Messschieber oder Prüfflehre	zerstörungsfrei
ZPM_10_2_Festigkeit_Fügeverbindung	Kraftmessung	Zugprüfmaschine	zerstörend
ZPM_10_3_Qualität_Fügeverbindung	subjektive Sichtprüfung	-	zerstörungsfrei
ZPM_10_4_Übergangswiderstand	Widerstandsmessung	Vier-Leiter-Widerstandsprüfstand	zerstörungsfrei
ZPM_10_5_Elektroden_Schichthftung	Adhäsionsmessung	Adhäsionsprüfgerät	zerstörend
ZPM_10_6_Elektroden_Partikelkontamination	optische Partikelprüfung	optisches Partikelprüfgerät	zerstörend
ZPM_10_7_Innenwiderstand_Zellstapel	Widerstandsmessung	Isolationsprüfgerät	zerstörungsfrei

In der Elektrodenherstellung werden die in den Fertigungs- (*fertig*) und Prüfprozessen (*pruef*) anfallenden Daten vor dem Beschichtungsprozess den Klassen *Slurry\_A* bzw. *Slurry\_K* und im Falle der Vorbehandlung der Substratfolien den Klassen *Coil\_Cu* bzw. *Coil\_Al* zugeordnet. Diese werden im Beschichtungsprozess zu den Klassen *Coil\_A* bzw. *Coil\_K* verarbeitet, welchen alle weiteren Prozesse der Elektrodenherstellung zugeordnet werden. Sind die Prozesse aus technologischen Gründen nicht unmittelbar zeitlich nacheinander auszuführen, wie Prozess 1 und 2 bei der Verarbeitung der Beschichtungstinten sowie 6\_Kalandrieren und 7\_Vakuum-Trocknen der Elektroden, so wurden an diesen Stellen jeweils zwei Prüfprozesse vorgesehen. Der erste Prüfprozess des ausgehenden Zwischenproduktes ist nach Abschluss des davorliegenden Fertigungsprozesses durchzuführen (bspw. als *pruef 6\_out* bezeichnet). Der zweite Prüfprozess (bspw. als *pruef 6\_in* bezeichnet) ist vor der Durchführung des nachfolgenden Fertigungsprozesses abzuarbeiten, falls die Zeitspanne zwischen den Durchführungszeitpunkten der beiden Fertigungsprozesse eine festzulegende Dauer überschreitet. Auf diese Weise kann der Zeitvariabilität bestimmter Zwischenproduktmerkmale Rechnung getragen werden. *Coil\_A* und *Coil\_K* sind das

Erzeugnis der Elektrodenherstellung und Eingangsprodukt der Zellmontage. Im Fertigungsprozess 8\_Laserstrahl schneiden werden die als Rollenware vorliegenden Elektroden zu einzelnen Elektrodenblättern vereinzelt. Dabei existiert jedes einzelne Elektrodenblatt als Instanz in der Datenbank, um eine korrekte Zuordnung von elektroden-spezifischen Prüfprozessen, wie der optischen Partikeldetektion, zu ermöglichen. Im Produktionsbetrieb werden die einzelnen Elektroden in nummerierten Elektrodenmagazinen abgelegt. Über die Kenntnis der Reihenfolge der Elektroden in den Magazinen bleibt die Zuordnung über Prüfprozess 8 bis zum nachfolgenden Stapelprozess erhalten. Im Stapelprozess werden die Elektroden zusammen mit dem Separator zum Zellstapel verarbeitet. Jedem Zellstapel wird eindeutig eine Instanz *Zelle* zugeordnet. In der verbleibenden Prozesskette der Zellmontage und der Formierung werden alle Prozesse und Eingangsprodukte den einzelnen Zellen zugeordnet. Am Ende der Prozesskette wird die Zelle dem Prüfprozess 20\_Zelltest (*pruef 20*) zugewiesen, welcher im Gegensatz zu den anderen Prozessen für jede Zelle mehrmals durchgeführt werden kann.

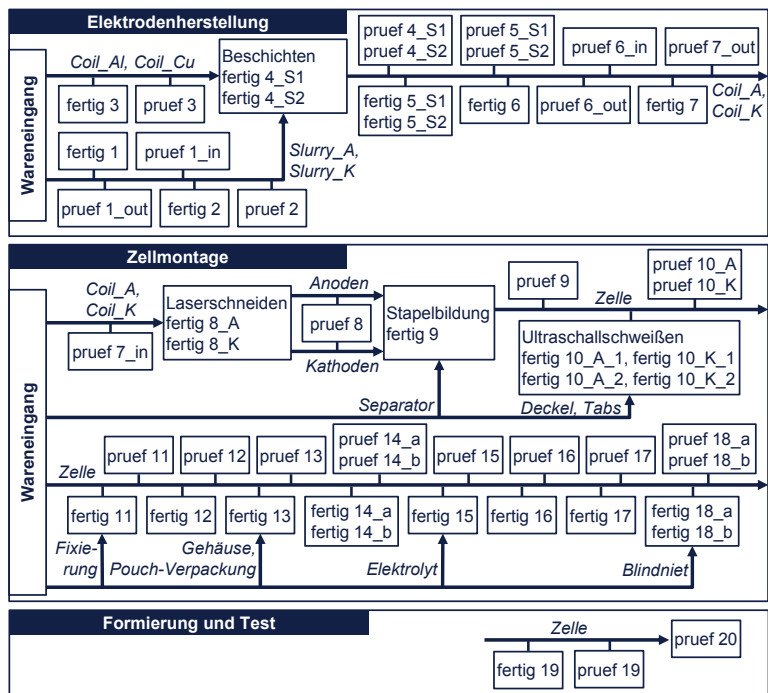


Abbildung 35: Zuordnungskonzept für Prozess- und Produktdaten in der Zellherstellung

Die Identifikation aller Fertigungs- und Prüfprozesse erfolgt anhand der festgelegten Prozessnummern, die auf den Anlagen, Prüfgeräten und Prüfplätzen in Form von Barcodes angebracht sind. Die Instanzen *Slurry\_A*, *Slurry\_K*, *Coil\_A*, *Coil\_K* und *Zelle* werden durch fortlaufende Nummern und damit korrespondierenden Barcodes auf den entsprechenden Zwischenprodukten bzw. den vorgesehenen Behältern und Transportverpackungen gekennzeichnet. Ebenso werden die Eingangsprodukte *Coil\_Cu*, *Coil\_Al*, *Separator*, *Gehäuse* und *Elektrolyt* im Zuge der Wareneingangsprüfung mit Barcodes markiert.

Die Datenbank wurde mit MySQL (Version 5.5.41) realisiert und auf einem Server des *iwb* installiert. Mit einer am *iwb* programmierten Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 36) können über eine Netzwerkverbindung Datenbankeingaben und -abfragen auf unterschiedlichen Clients getätigt werden. Datenbankeingaben aus dem Produktionsbetrieb erfolgen sowohl automatisiert als auch manuell. Ein Großteil der eingesetzten Anlagen stellt der Datenbank die Messwerte zu den Fertigungsprozessen über definierte Protokolle zur Verfügung. Demgegenüber sind die Ergebnisse der meisten Prüfprozesse manuell in die Benutzeroberfläche einzutragen. Hierzu stehen für die speziellen Produktionsumgebungen im Rein- und Trockenraum geeignete Tablet-PCs zur Verfügung. Die Produkt-Prozess-Zuordnungen entsprechend dem dargestellten Konzept werden mit Hilfe kabelloser Barcode-Lesegeräte hergestellt, welche die erfassten Produkt- und Prozess-Barcodes über die Tablet-PCs an die Datenbankanwendung melden. Kategorisch fehlerhafte Zuordnungen werden von der Benutzeroberfläche der Datenbank erkannt und nicht zugelassen.

The screenshot shows the 'Datenbank EzZeitUM' application window. It has a menu bar with 'Datei', 'Manuelle Eingabe', 'Extras', and 'Hilfe'. The main area is divided into two panes. The left pane is titled 'zelle' and contains the following fields: id () (404), erfasser () (15), erfasst () (09.02.2015 00:00:00), gueltig () (checked), gehaeuse () (404), seperator (), elektro (), niet (), fertig9 () (280), fertig10\_an () (675), fertig10\_kat () (673), fertig10\_tab\_an () (676), fertig10\_tab\_kat () (674), and fertig11 (). The right pane is titled 'fertig14b' and contains: id () (116), erfasser () (14), erfasst () (10.03.2015 12:04:38), gueltig () (checked), f\_fix (N) (empty), druck (bar) (3,5), temp\_siegel (°C) (195), t\_siegel (ms) (3000), t\_vorweil (ms) (1000), anlage () (empty), extra\_i () (empty), extra\_d () (empty), and extra\_l () (empty). At the bottom right is a 'Speichern' button. The status bar at the bottom shows 'Benutzer: wim (Markus Westemeier)' and 'Barcode "FERTIG14B" gescannt.'

Abbildung 36: Benutzeroberfläche der Datenbankanwendung

### **Versuchorientierte Produktionsplanung**

Zum Zweck der versuchsorientierten Produktionsplanung wurde mit Hilfe von Microsoft Excel® ein Planungswerkzeug abgestimmt auf die Anforderungen aus Abschnitt 4.4.4 umgesetzt. Unter Kenntnis der Produktstruktur beider Zellvarianten werden die zur Umsetzung der geplanten Versuche notwendigen Produktionsprogramme und die Materialbedarfe berechnet. Dabei werden die prozessspezifischen, geschätzten Ausschussraten in der Anlaufphase sowie der Aufwand zur Durchführung zerstörender Messungen berücksichtigt. Die Planungsergebnisse, welche auf Basis des Werkzeugs errechnet wurden, werden in den folgenden Abschnitten anhand von konkreten Beispielen für beide Analysephasen vorgestellt.

### **5.5.2 Prozessbezogene empirische Analyse**

Ziel der ersten Analysephase ist der Aufbau von Prozessverständnis bzgl. der Stellgrößen und den erzeugten Zwischenproduktmerkmalen. Dieses Prozessverständnis ist zur reproduzierbaren Einstellung von Zwischenproduktmerkmalswerten zu nutzen. Aufgrund des Neuheitsgrads der Prozesskette lag zu den meisten Prozessen keine oder nur geringe praktische Erfahrung und kein Detailwissen zur Prozessführung vor. Somit waren mit wenigen Ausnahmen (11\_Fixieren, 13\_Isolieren und Einführen, 17\_Vorladung, 18a\_Vernieten und 19\_Formierung) alle Prozesse in der ersten Analysephase zu betrachten. Entsprechend der Methode zur empirischen Analyse von Prozessketten nach Abschnitt 4.4 sind in einem ersten Schritt die phasenspezifischen Untersuchungsumfänge zu definieren. Die Untersuchungsumfänge sind mit Expertenwissen zur Messbarkeit, Variation und Determiniertheit der Größen zu reduzieren und zu spezifizieren. Hierzu wurden zu jedem Prozess die relevanten Ein- und Ausgangsgrößen aus dem fokussierten, qualitativen Erklärungsmodell ausgeleitet und in prozessbezogenen Listen analog zu Abbildung 22 den Experten zur Bewertung vorgelegt. Die Informationen zur Messbarkeit konnten direkt aus der vorbereitend durchgeführten Prüfplanung übernommen werden. Das beispielhafte Bewertungsergebnis zu Prozess 14b\_Versiegeln drei Seiten ist in Tabelle 21 zusammengefasst. Mit den Angaben zur Messbarkeit, Variation und Determiniertheit wurde eine neue Version der MDM der Bedeutungswerte berechnet. Durch den Ausschluss der nicht variablen und determinierten Größen und der dadurch potentiell entstandenen neuen, inaktiven Elemente, losen Enden und rein aktiven Zwischenproduktmerkmale konnten die in der empirischen Analyse zu berücksichtigenden Größen weiter reduziert werden. Aus der neuen, phasenspezifischen MDM wurden prozessbezogene Einflussmatrizen erstellt. In Abbildung 37 ist das Ergebnis für Prozess 14b dargestellt.

Tabelle 21: Bewertung<sup>8</sup> der Messbarkeit, Variation und Determiniertheit zu Prozess 14b\_Versiegeln drei Seiten

relevante Prozesskettenelemente	Messbarkeit	Variation oder Determiniertheit
EPM_Tabdicke	zerstörungsfrei	nicht variabel
EPM_Tabmaterial	nein	nicht variabel
ZPM_5_14_Flächenbelastungsabweichung	zerstörend	nicht determiniert
ZPM_11_7_Zellstapel_Feuchtegehalt	zerstörend	nicht determiniert
PP_14_1_Siegelbalkenbeschichtung	nein	nicht variabel
PP_14_2_Siegeldauer	ja	variabel
PP_14_3_Siegeldruck	ja	variabel
PP_14_4_Siegeltemperatur	ja	variabel
PP_14_5_Siegelverfahren	-	nicht variabel
PP_14_6_Siegelverweildauer	ja	variabel
SG_14_1_Planarität_Siegelbalken	ja	variabel
SG_14_2_Temperaturverteilung_Siegelbalken	nein	variabel
SG_14_3_Verunreinigung_Siegelbalken	nein	variabel
ZPM_14_1_Festigkeit_Siegelnah	zerstörend	nicht determiniert
ZPM_14_2_Qualitätsbewertung_Siegelnah	zerstörungsfrei	nicht determiniert
ZPM_14_3_Zelle versiegelt_Masse	zerstörungsfrei	nicht determiniert

Mess- barkeit	Messbarkeit			
	Ausgangsgrößen	zerstörend	zerstörungsfrei	zerstörungsfrei
Eingangsgrößen		ZPM_14_1_Festigkeit_Siegelnah	ZPM_14_2_Qualitätsbewertung_Siegelnah	ZPM_14_3_Zelle versiegelt_Masse
zerstörend	ZPM_5_14_Flächenbelastungsabweichung	0	0	3
zerstörend	ZPM_11_7_Zellstapel_Feuchtegehalt	0	0	3
ja	PP_14_2_Siegeldauer	2	3	0
ja	PP_14_3_Siegeldruck	2	3	0
ja	PP_14_4_Siegeltemperatur	2	3	0
ja	PP_14_6_Siegelverweildauer	2	3	0
ja	SG_14_1_Planarität_Siegelbalken	2	0	0
nein	SG_14_2_Temperaturverteilung_Siegelb.	2	0	0
nein	SG_14_3_Verunreinigung_Siegelb.	2	0	0

Abbildung 37: Einflussmatrix für die prozessbezogene Analyse von Prozess 14b

In Absprache mit den Prozessexperten wurde die empirische Analyse des Versiegelungsprozesses weiter fokussiert. Anhand der Entscheidungshilfe in Tabelle 10 kann die nur zerstörend messbare Größe *ZPM\_14\_1\_Festigkeit\_Siegelnah* als Zielgröße

<sup>8</sup> Zur anschaulicheren Darstellung wurden einige der für das Untersuchungsziel nicht relevanten Größen nicht in die Tabelle aufgenommen.

der empirischen Analyse eingesetzt werden. Die eingehenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu den Größen *ZPM\_14\_1* und *ZPM\_14\_2* waren unbekannt und stellten folglich nach Tabelle 11 ein Analyseziel der Methodik dar. Demgegenüber lässt sich die Zellmasse nach dem Versiegelungsprozess *ZPM\_14\_3\_Zelle versiegelt\_Masse* mit bekannten naturgesetzlichen Zusammenhängen bestimmen. Aus diesem Grund wurde die Größe nicht als Untersuchungsziel der Analyse verwendet. Darüber hinaus wird *ZPM\_14\_3* laut dem qualitativen Erklärungsmodell nicht vom Versiegelungsprozess beeinflusst. Somit verblieben für die empirische Analyse von Prozess 14b zwei Zielgrößen sowie vier Prozessparameter und drei Störgrößen.

Auf Basis des definierten Untersuchungsumfangs kann im nächsten Schritt die Versuchsstrategie geplant werden. Nach Abschnitt 4.4.3 sind hierzu die Faktoren und deren Faktorstufen sowie die erwarteten Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Außerdem ist der Umgang mit Störgrößen zu planen und die praktische Umsetzbarkeit des Analysevorhabens abzusichern. Im Beispiel zum Versiegelungsprozess wurden die vier Prozessparameter als Faktoren ausgewählt. In Abstimmung mit dem Prozessexperten wurden diese Faktoren auf drei Faktorstufen variiert, um auch quadratische Zusammenhänge erfassen zu können. Zugleich wurden die Wertbereiche der Faktorstufen festgelegt. Aus der MDM der Wechselwirkungen  $\underline{M}^{int}$  ging hervor, dass zwischen den in der Einflussmatrix aufgeführten Einflussgrößen Wechselwirkungen zu erwarten sind. Folglich wurden alle Zweifach-Wechselwirkungen der Faktoren ins Systemmodell aufgenommen. Der nicht messbaren Störgröße *SG\_14\_2\_Temperaturverteilung\_Siegelbalken* wurde in der Versuchsplanung durch Randomisierung begegnet. Für alle drei Störgrößen wurde darüber hinaus angestrebt, diese im Experiment konstant zu halten.

Auf Basis dieser Informationen konnten zu jedem Prozess unterschiedliche Versuchspläne erarbeitet, verglichen und zusammen mit den Prozessexperten Entscheidungen zur Auswahl der Versuchspläne getroffen werden (siehe Tabelle 34 des Anhangs). Aus dem daraus resultierenden Versuchsprogramm für Phase 1 ergab sich ein Bedarf von 746 Experimenten ohne Wiederholungen zur Analyse der wichtigsten Einzelprozesse für beide Produktvarianten. Mit Hilfe des versuchsorientierten Produktions- und Materialbedarfsplanungswerkzeugs konnte der detaillierte Materialbedarf zur Durchführung dieser Experimente berechnet werden. Am Beispiel des Versiegelungsprozesses ergab sich der in Tabelle 22 gezeigte, D-optimale und randomisierte Versuchsplan mit 20 Einzelversuchen ohne Wiederholungen. Bei der Umsetzung des Versuchsplans wurden Maßnahmen ergriffen, um die identifizierten Störgrößen konstant zu halten. Hierzu wurden die Siegelbalken regelmäßig gereinigt und die Siegelung erfolgte immer an der gleichen Stelle der Siegelbalken. Die zu den Versuchs-



einstellungen dokumentierten Messwerte der Festigkeit der Siegelnaht wurden mit der Software Cornerstone der camLine GmbH unter Anwendung des Vorgehens nach Abschnitt 4.4.6 ausgewertet. Ein im ersten Schritt erstelltes Regressionsmodell auf Basis des vollständigen, angenommenen Prozessmodells wurde um die nicht signifikanten Terme reduziert. Das resultierende quadratische Modell mit Wechselwirkung der beiden Faktoren Siegeldauer und Siegeltemperatur weist ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von 0,977 auf und ist in Abbildung 38 dargestellt.

*Tabelle 22: Versuchsplan für Prozess 14b\_Versiegeln drei Seiten (D-optimal, randomisiert, erstellt mit der Software Cornerstone)*

Nr.	PP_14_2_Siegel- dauer in ms	PP_14_3_Siegel- druck in bar	PP_14_4_Siegel- temperatur in °C	PP_14_6_Siegelver- weildauer in ms
1	3000	3,50	215,00	4000
2	3000	2,50	195,00	4000
3	2000	4,50	175,00	5000
4	2000	2,50	215,00	5000
5	2000	3,50	195,00	5000
6	2000	3,50	175,00	3000
7	3000	2,50	175,00	5000
8	2000	4,50	195,00	3000
9	4000	2,50	215,00	5000
10	2000	2,50	215,00	3000
11	4000	3,50	175,00	5000
12	4000	4,50	175,00	4000
13	2000	4,50	215,00	4000
14	4000	4,50	195,00	5000
15	4000	2,50	215,00	3000
16	3000	4,50	215,00	5000
17	4000	4,50	215,00	3000
18	4000	2,50	175,00	3000
19	2000	2,50	175,00	4000
20	3000	4,50	175,00	3000

Im Rahmen einer abschließenden Diskussion des identifizierten empirischen Modells mit dem Prozessexperten wurde dieses als plausibel eingestuft und zur Optimierung des Prozesses, zur Rückkopplung ins qualitative Erklärungsmodell und zur Aufnahme ins quantitative Erklärungsmodell freigegeben. Die Koeffizienten des Regressionsmodells sowie die unter Anwendung von Abschnitt 4.4.8 für die Rückführung transformierten Werte sind in Tabelle 23 zusammengefasst. Mit den modellbasiert ermittelten Optimaleinstellungen des Prozesses 14b\_Versiegeln drei Seiten bzgl. der

Festigkeit der Siegelnaht der Pouch-Verpackung konnte diese in der Zugprüfung von 115 N auf 129 N um 12 % gesteigert werden.

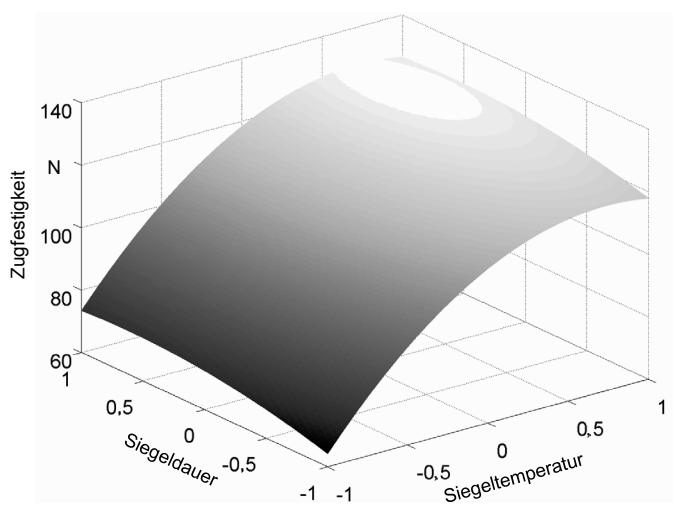


Abbildung 38: Graphische Darstellung des quadratischen Regressionsmodells der Zugfestigkeit der Siegelnaht

Tabelle 23: Zentrierte und skalierte Koeffizienten des Regressionsmodells und dazugehörige transformierte, qualitative Werte für die Rückführung

Faktor	Regressionsmodell		transformierte Werte		Werte aus der Expertenbefragung	
	Koeffizient	Signifikanzwert	Bedeutung	Sicherheit	Bedeutung	Sicherheit
$x_i$	$\hat{b}_i$	$p_i$	$B_{x_i \rightarrow y}^{neu, norm}$	$S_{B, x_i}^{neu}$	$B_i$	$S_{B, x_i}$
PP_14_2_Siegeldauer	4,31	0,002	1	3	3	2
PP_14_3_Siegeldruck	-1,37	0,138	1	0	3	2
PP_14_4_Siegeltemperatur	26,44	0	3	3	3	2
PP_14_6_Siegelverweildauer	1,97	0,057	1	1	3	0

Im Zuge der Inbetriebnahme der einzelnen Prozesse und der Durchführung der prozessbezogenen Untersuchungen sind eine Reihe von Erkenntnissen entstanden, welche in das qualitative Erklärungsmodell zurückgeführt wurden. Insgesamt wurden 60 Prozesskettenelemente ergänzt, 6 Elemente umbenannt und 36 Elemente entfernt. Die

Analyse der Einzelprozesse und die Rückführung der Erkenntnisse in das qualitative Erklärungsmodell wurden für den gesamten Prozesskettenabschnitt der Zellmontage abgeschlossen. Dementsprechend sind diese Prozesse in der Lage, reproduzierbar die gewünschten Werte der Zwischenproduktmerkmale zu liefern. Somit sind die Voraussetzungen zum Übergang dieses Prozesskettenabschnitts in die zweite, prozessübergreifende Analysephase gegeben. Von diesem Fazit sind zwei Prozesse innerhalb der Montage der Hardcase-Zellen auszunehmen (9\_Z-Falten und 14a\_Laserstrahlschweißen). Bei diesen Prozessen konnte aufgrund mangelnder Eingangsproduktqualität noch kein Nachweis zur Prozessbeherrschung erbracht werden. Die isolierte Betrachtung der Prozesse des Abschnitts *Zellmontage* wurde durch die Verarbeitung von extern beschafften Elektrodenmaterialien mit ausreichend konstanten Merkmalswerten ermöglicht. Der Prozesskettenabschnitt *Formierung und Test* wird zwar am *iwb* betrieben, steht aber nicht im Forschungsfokus und ist somit auch nicht Gegenstand der hier beschriebenen Prozesskettenanalyse.

### 5.5.3 Prozessübergreifende empirische Analyse

Untersuchungsgegenstand der zweiten Analysephase sind die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Merkmalen verschiedener Zwischenprodukte bzw. von Zwischenproduktmerkmalen und Qualitätsmerkmalen. Die hierfür relevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge werden aufgrund häufig nicht messbarer Zwischenproduktmerkmale mit Hilfe prozessübergreifender Versuchspläne identifiziert. Dies erfolgt unter Anwendung der Ergebnisse aus der ersten Analysephase. Das Analyseziel im Allgemeinen und am Anwendungsbeispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen im Speziellen ist die Quantifizierung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den betrachteten Qualitätsmerkmalen und den bedeutendsten Einflussgrößen. Die zu erzielenden, funktionalen Zusammenhänge sollen der Vorgabe von Zielwerten und Toleranzen für die einzelnen Prozesse sowie der Prognose der Fertigproduktqualität und der Optimierung der gesamten Prozesskette dienen.

Die Analyseschritte stimmen mit der prozessbezogenen Analyse überein und können in mehreren Iterationen durchlaufen werden. An erster Stelle gilt es, den Untersuchungsumfang zu definieren. Hierfür stehen die in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen top-down- und bottom-up-Ansätze zur Verfügung. Die vorbereitend durchgeführte Bewertung der Messbarkeit der Prüfmerkmale war auch Grundlage für die Planung der prozessübergreifenden Analyse. Mit diesen Informationen, der MDM der Bedeutungen und den prozessbezogenen Einflussmatrizen wurden die beiden im Analysefokus stehenden Prozesskettenabschnitte *Elektrodenherstellung* und *Zellmontage* bzgl. der Relevanz prozessübergreifender Untersuchungen näher betrachtet. Hinsichtlich der

in Tabelle 24 genannten Kriterien unterscheiden sich die beiden Prozesskettenabschnitte erheblich. In der Elektrodenherstellung sind die für die einzelnen Prozesse relevanten Zwischenproduktmerkmale die Ausgangsgrößen des unmittelbaren Vorprozesses. Diese Größen sind zudem in der Produktion fast ausnahmslos messtechnisch erfassbar. Darüber hinaus sind die für die weitere Zellherstellung relevanten Größen am Zwischenprodukt *Elektrodenrolle* messbar. Aus diesen Beobachtungen wurde gefolgert, dass im Abschnitt der Elektrodenherstellung prozessübergreifende Ursache-Wirkungs-Analysen nicht erforderlich sind. Stattdessen wird zur Erfassung der Wechselwirkungen eine explizite Berücksichtigung der eingehenden Produktmerkmale bereits in der ersten, prozessbezogenen Analysephase empfohlen. Im Abschnitt der Zellmontage zeigt sich ein anderes Bild. In den Prozessen 10\_Ultraschallschweißen bis 18\_Vernieten/Versiegeln stammen 23-90 % der eingehenden Zwischenproduktmerkmale nicht aus dem unmittelbar davor stattfindenden Prozess. Des Weiteren nimmt mit zunehmendem Montagefortschritt die zerstörungsfreie Messbarkeit der erzeugten Zwischenproduktmerkmale ab. Die für die nachfolgenden Prozesse und für die Qualität relevanten Größen sind im Rahmen der Zellmontage mehrheitlich nicht zerstörungsfrei erfassbar. Von 72 direkten Einflussgrößen auf die Zellqualität stammen 54 aus dem Abschnitt der Zellmontage, 32 davon sind mit den Prüfmitteln des *iwb*-Forschungs- und Demonstrationszentrums nur zerstörend messbar. Dementsprechend sind im Abschnitt der Zellmontage prozessübergreifende Analysen von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen unverzichtbar. Im Sinne der Übertragbarkeit der nach dem Laborprinzip erzielten Analyseergebnisse ist mit Hilfe einer sorgfältigen Untersuchungsplanung auf eine Berücksichtigung der Wechselwirkungen und auf einen anwendungsnahen Umgang mit Störgrößen zu achten.

In der ersten prozessübergreifenden Analyse der Zellmontage galt es, vorbereitend für weitere Analyseiterationen, offene Fragestellungen der Produktgestaltung und eine damit zusammenhängende Prozessfrage zu untersuchen:

1. Was ist die bzgl. der Zellqualität optimale Elektrolytmenge?
2. Kann die Hypothese, die Elektrolyt-Benetzung des Zellstapels sei ca. 30 min nach dem Befüllvorgang weitgehend abgeschlossen und eine weitere Wartezeit führe zu keinen Verbesserungen der Zellqualität, bestätigt werden?
3. Welcher Separator führt zur besten Zellqualität?

Tabelle 24: Vergleich der Prozesskettenabschnitte Elektrodenherstellung und Zellmontage bzgl. der Relevanz prozessübergreifender Untersuchungen

Kriterium	Elektrodenherstellung	Zellmontage
Ursprung der eingehenden ZPM	stammen jeweils vollständig aus dem Vorprozess	zu erheblichem Anteil nicht im Vorprozess definiert
Messbarkeit der eingehenden ZPM	fast vollständig messbar	Messbarkeit in den einzelnen Prozessen durchschnittlich ca. 50 %
Messbarkeit der für den nachfolgenden Prozesskettenabschnitt relevanten ZPM	am Zwischenprodukt Elektrodenrolle vollständig messbar	nur einzelne ZPM zerstörungsfrei messbar
Messbarkeit der qualitätsrelevanten ZPM	am Zwischenprodukt Elektrodenrolle vollständig messbar	die Qualität direkt beeinflussende ZPM mehrheitlich nur zerstörend messbar
Anteil der UWZ mit Wechselwirkungen in den einzelnen Prozessen	hoch, Wechselwirkungen zwischen den meisten Einflussgrößen vermutet	mittel, Wechselwirkungen zwischen vielen Einflussgrößen vermutet

Aufgrund der abgeschlossenen, prozessbezogenen Untersuchungen der Montageprozesse der Pouch-Zelle wurde dieser Zelltyp zur Umsetzung der prozessübergreifenden Analyseaufgabe gewählt. Die formulierten Fragestellungen führen zu den drei Faktoren der zu planenden prozessübergreifenden Analyse: *Elektrolytmenge*, *Benetzungszeit* und *Separatortyp*. Als Zielgrößen der Untersuchung wurden die bereits in Abschnitt 5.4 vorgestellten Qualitätsmerkmale gewählt. Die Störgrößenanalyse erfolgte mit Hilfe des bottom-up-Ansatzes ausgehend von den drei Faktoren in einer kombinierten Vorwärts- und Rückwärtsanalyse der Ursache-Wirkungs-Ketten zu den Qualitätsmerkmalen. Vorab waren die Bewertungen zur Variation der Stellgrößen und der Determiniertheit der Zwischenproduktmerkmale zu überarbeiten. Zur Einstellung der ausgewählten Faktoren waren die Prozesse der Stapelbildung und der Elektrolytbefüllung involviert. Die Stellgrößen aller anderen Prozesse konnten als *nicht variabel* betrachtet werden. Die Eingangsproduktmerkmale wurden als konstant und damit als *determiniert* angenommen. Zur Absicherung dieser Annahme wurden die Merkmale der verwendeten, extern beschafften Elektroden während der Versuchsdurchführung erfasst. Ebenso wurden alle die Produktgestaltung betreffenden Merkmale, mit Ausnahme der Faktoren Separator und Elektrolytmenge, als determiniert betrachtet. Mit diesen Randbedingungen bestätigte die Vorwärts- und Rückwärtsanalyse der Ursache-Wirkungs-Ketten die Qualitätsrelevanz der zu untersuchenden Faktoren. Darüber hinaus wurde für die Ursache-Wirkungs-Ketten ein hoher Verknüpfungsgrad konstatiert und die neben den Faktoren wirkenden Einflussgrößen offengelegt. Die Verknüpfung der Ursache-Wirkungs-Ketten stimmt mit den

erwarteten Wechselwirkungen der drei Faktoren überein, führt zur Abbildung der Wechselwirkungen im Versuchsplan und rechtfertigt die Analyse der Faktoren in einer Untersuchung. Ein Auszug der tabellenbasierten Darstellung der Ergebnisse der Vorwärts- und Rückwärtsanalyse am Beispiel des Faktors Benetzungszeit ist in Tabelle 25 dargestellt.

*Tabelle 25: Auszug der Ergebnisse der Vorwärts- und Rückwärtsanalyse am Beispiel des Faktors Benetzungszeit (1 entspricht „ja“, 0 entspricht „nein“)*

Elemente der Ursache-Wirkungs-Kette	Messbarkeit	Variat./ Nicht-Det.	Einflussgrößen (1. Ebene)	Messbarkeit	Variat./ Nicht-Det.	Einflussgrößen (2. Ebene)	Messbarkeit	Variat./ Nicht-Det.
PP_15_Benetzungszeit	1	1						
ZPM_15_Zellstapel_Benetzungsgrad	0	1	EPM_Elektrolyt_Viskosität	1	0			
			EPM_Elektrode_Porosität	1	0			
			ZPM_14_Gehäuse_Dichtigkeit	0	1	EPM_Tabdicke	1	0
						SG_14_1_Planarität_Siegelbalken	1	1
			PP_15_Soll-Elektrolytmenge	1	1			
ZPM_15_Substratfolie_Korrosion	0	1	EPM_Substratfolie_Material	1	0			
			PP_15_Benetzungszeit	1	1			
ZPM_15_freie Elektrolytmenge	0	1	PP_15_Soll-Elektrolytmenge	1	1			
			PP_15_Benetzungszeit	1	1			
			EPM_Separator_Porosität	1	0			
ZPM_17_Grenzfläche_Beschaffenheit	0	1	ZPM_16_Zellstapel_Benetzungsgrad	0	1	ZPM_15_Zellstapel_Benetzungsgrad	0	1
						PP_16_Unterdruck_Versiegelung	1	0
			ZPM_12_Elektrode_Feuchtegehalt	0	1	PP_12_Wartezeit bis Weiterverarbeitung	1	0
						ZPM_6_Elektrode_Feuchtegehalt	1	1
						SG_12_Luftdruck	1	1

Aus dieser Betrachtung wurde zum einen ersichtlich, dass keines der unmittelbar von der Benetzungszeit beeinflussten Zwischenproduktmerkmale zerstörungsfrei messbar ist. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der prozessübergreifenden Betrachtung. Zum anderen konnten mit der rückwärtsgerichteten Betrachtung alle vorhandenen Störeinflüsse der zu analysierenden Ursache-Wirkungs-Ketten identifiziert werden. Entweder in der ersten oder spätestens in der zweiten Ebene wurden die potentiellen Störeinflüsse in Form von Störgrößen, Stellgrößen und Zwischenproduktmerkmalen aufgedeckt. Mit Hilfe der Kenntnis der potentiellen Störeinflüsse konnten gezielt Maßnahmen definiert werden, um diese konstant zu halten oder deren Einflüsse auf die Ursache-Wirkungs-Kette zu vermeiden. Diese Maßnahmen waren insbesondere die Prüfung und Dokumentation der konstant angenommenen Eingangs- und Zwischenproduktmerkmale sowie der Umgebungsbedingungen, die konsequente Umsetzung der Randomisierung bzgl. der Faktoren Elektrolytmenge und Benetzungszeit, regelmäßige Reinigungen der Anlagen und Werkstückträger sowie Arbeitsanweisungen zur Durchführung des Versuchsplans. Durch die Definition der Faktoren, der Zielgrößen, der erwarteten Wechselwirkungen sowie der potentiellen Störgrößen war der Untersuchungsumfang der prozessübergreifenden Analyse abgesteckt.

Im nächsten Schritt galt es, auf Basis dieser Informationen die Versuchsstrategie auszuwählen. In einem Experten-Workshop wurden die Faktorstufen des mit Tabelle 26 gegebenen D-optimalen Versuchsplans ausgewählt. Hierbei wurde der Separatortyp als qualitativer Faktor mit vier Ausprägungen, die Elektrolytmenge zur Abbildung nichtlinearer Zusammenhänge mit drei Stufen und die Benetzungszeit zur Bestätigung oder Widerlegung der Hypothese mit zwei Stufen berücksichtigt. Zur Erhöhung der statistischen Aussagekraft war vorgesehen, den Versuchsplan zweimal zu wiederholen, sodass insgesamt 48 Lithium-Ionen-Zellen als Versuchsträger benötigt wurden.

Nach Abschluss der Zellherstellung wurden die Werte der Qualitätsmerkmale der Versuchsträger ermittelt. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit der Software Cornerstone unter Anwendung des Vorgehens nach Abschnitt 4.4.6. Bei der Sichtung der Daten fielen mehrere Abweichungen vom Ceteris-Paribus-Prinzip auf:

1. Abweichungen zwischen der Soll- und der Ist-Elektrolytmenge
2. Schwankungen der Flächenbeladung der Kathoden
3. Variationen bei der Durchführung des Trocknungsprozesses und der Lagerdauer bis zur anschließenden Elektrolytbefüllung
4. Verwendung verschiedener Zelltestsysteme zur Prüfung der Zyklenlebensdauer

5. Unterschiedliches kalendarisches Alter der Zellen zu Beginn der Prüfung der Zyklenlebensdauer

*Tabelle 26: Versuchsplan der prozessübergreifenden Analyse (D-optimal, randomisiert bzgl. der Faktoren Elektrolytmenge und Benetzungszeit, erstellt mit der Software Cornerstone)*

Nr.	Separator typ	Soll-Elektrolytmenge in ml	Benetzungszeit in h
1	Separator 1	12	1
2	Separator 1	12	4
3	Separator 1	14	1
4	Separator 1	16	4
5	Separator 2	12	4
6	Separator 2	14	1
7	Separator 2	16	4
8	Separator 2	16	1
9	Separator 3	12	1
10	Separator 3	12	4
11	Separator 3	16	1
12	Separator 3	16	4
13	Separator 4	12	1
14	Separator 4	12	4
15	Separator 4	16	4
16	Separator 4	16	1

Es zeigten sich größere Unterschiede zwischen den Faktorstufen der Soll-Elektrolytmenge und der tatsächlichen Elektrolytmenge in den Zellen (siehe Tabelle 27). Als Konsequenz wurde die Auswertung mit den Istwerten durchgeführt. Des Weiteren schwankte die Flächenbeladung der Kathoden um  $\pm 8\%$ . Daraus resultierten Schwankungen der Zellmassen vor der Elektrolytbefüllung, welche bis zu  $\pm 2\text{ g}$  betrugen. Zellen mit deutlicher Massenabweichung vom Mittelwert der Zellmassen waren Kandidaten für einen späteren Ausschluss aus der Auswertung.

*Tabelle 27: Abweichung der Soll- und Ist-Elektrolytmenge in den Versuchsträgern*

<b>Mittelwert der Abweichung</b>	-0.003 ml
<b>Standardabweichung</b>	0.572 ml
<b>maximale Überdosierung</b>	2.271 ml



Aufgrund zellinterner Kurzschlüsse waren sechs Zellen nicht funktionsfähig. Die Hälfte dieser Zellen entfiel auf einen Separatortyp. Insgesamt fanden nach dem Ausschluss von Ausreißern aufgrund der genannten Gründe 39 von den 48 geplanten Zellen in der Auswertung Berücksichtigung. Dabei sind zwei Drittel der ausgeschlossenen Zellen dem auffälligen Separatortyp zuzuweisen. Aufgrund der dreifachen Durchführung des Versuchsplans standen trotzdem zu jeder Faktorstufenkombination mindestens zwei Versuchsträger zur Verfügung. Die erzielten Regressionsmodelle sind in Abbildung 39 für das Qualitätsmerkmal Innenwiderstand dargestellt. Die Modelle weisen sehr hohe korrigierte Bestimmtheitsmaße ( $> 0,985$ ) auf und erklären dementsprechend die Veränderungen der Werte der Qualitätsmerkmale fast vollständig. Die Vertrauensintervalle bewegen sich bei der Kapazität, der spezifischen Energie und dem Innenwiderstand  $< \pm 3 \%$  um den Vorhersagewert. Im Falle der Selbstentladung zeigt sich ein größerer Vertrauensbereich von bis zu  $\pm 15 \%$ . Da dies absolut einem Wert von lediglich  $\pm 0,8 \text{ mV/d}$  entspricht, ist dieses Ergebnis dennoch zufriedenstellend. Die Ausnahme stellen die Ergebnisse zur Zyklenlebensdauer der Zellen dar. Hier wurde nur ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von 0,6 erreicht. Zudem ist keiner der Modellterme signifikant. Dies kann durch die oben genannten Abweichungen vom Ceteris-Paribus-Prinzip erklärt werden. Insbesondere aufgrund von Punkt 3 sind starke Auswirkungen auf die Lebensdauer der Zellen zu erwarten. Es wurde zwar eine Mindesttrocknungsdauer eingehalten, aber zeitliche Abweichungen nach oben wurden zugelassen. Zudem zeigte sich die auf Karl-Fischer-Titration basierende Messmethode zur Prüfung des entscheidenden Zwischenproduktmerkmals des Feuchtegehalts in den Zellmaterialien nach dem Trocknungsprozess als noch nicht fähig. Die Punkte 4 und 5 betreffen ausschließlich die Ermittlung der Zyklenlebensdauer und plausibilisieren dadurch die unterschiedlichen Güten der Regressionsmodelle zur Lebensdauer im Vergleich zu den anderen Qualitätsmerkmalen. Unabhängig von der statistischen Aussagekraft wurden die von der Auswertung aufgezeigten Einflüsse der Faktoren auf die Lebensdauer als grundsätzlich nachvollziehbar eingestuft. Mit Hilfe der Analyseergebnisse, einem Gewichtungsszenario der Qualitätsmerkmale und der Auswahl des Separators 1 konnten optimierte Faktoreinstellungen (14 ml Elektrolytmenge, 2 h Benetzungszeit) abgeleitet und anhand von sieben Zellen zur Validierung umgesetzt werden. Die Ergebnisse der Validierungsversuche bestätigten die Vorhersagewerte der Regressionsmodelle unter Einhaltung der Vertrauensbereiche. Folglich wurden die erarbeiteten Regressionsmodelle in das qualitative und quantitative Erklärungsmodell transformiert bzw. integriert.

Mit diesen Ergebnissen sind die ersten beiden der speziellen Aufgaben dieser prozessübergreifenden Analyse erfüllt. Die Auswirkungen der Elektrolytmenge und der Benetzungszeit auf die Qualitätsmerkmale der betrachteten Lithium-Ionen-Zelle

wurden quantifiziert. Zur Ermittlung des bzgl. der Qualitätsmerkmale optimalen Separators wurde anhand von Tabelle 28 eine zusammenfassende Bewertung erstellt. In Abhängigkeit der Gewichtung der einzelnen Qualitätsmerkmale kann hieraus ein Separator ausgewählt werden.

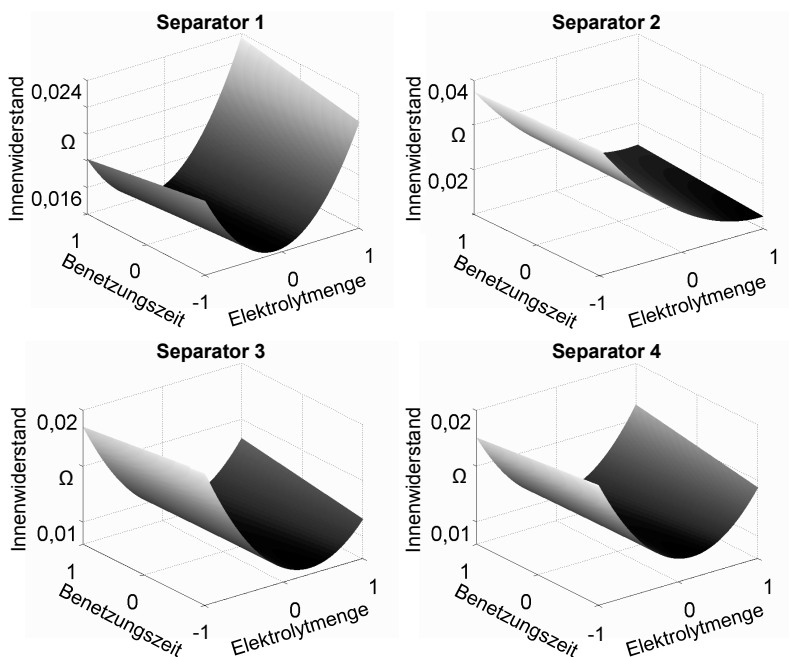


Abbildung 39: Graphische Darstellung der Regressionsmodelle der vier Separator-typen für das Qualitätsmerkmal Innenwiderstand

Die Ergebnisse dieser ersten prozessübergreifenden Prozesskettenanalyse am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen belegen die Anwendbarkeit der Methodik und deren Nutzen im Falle komplexer Prozessketten. Insbesondere die korrekte Planung von empirischen Analysen unter Berücksichtigung der relevanten Störeinflüsse auf Basis des qualitativen Erklärungsmodells der Prozesskette konnte gezeigt werden. Zur Klärung der zahlreichen, noch offenen Fragen im Zusammenhang mit der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen sind weitere Iterationen der prozessübergreifenden Analyse durchzuführen. Dabei ist sicherzustellen, dass die Um-

setzung der Experimente den Planungsvorgaben entspricht oder im Falle unvermeidbarer Abweichungen eine messtechnische Erfassung der betroffenen Größen möglich ist.

*Tabelle 28: Zusammenfassende Rangfolgebewertung der Separatoren bzgl. der Qualitätsmerkmale*

Separator	spezifische Energie	Kapazität	Innenwiderstand	Selbstentladung	Lebensdauer
Separator 1	3.	4.	3.	4.	4.
Separator 2	4.	2.	4.	3.	2.
Separator 3	1.	1.	1.	1.	3.
Separator 4	2.	3.	2.	2.	1.

## 5.6 Beurteilung der Anforderungserfüllung

In diesem Abschnitt erfolgt eine technologische Bewertung der Methodik durch die Beurteilung des Erfüllungsgrads der in Abschnitt 3.2 formulierten Anforderungen. Die Beurteilungsergebnisse sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

Im Bereich der allgemeinen Anforderungen ist die *Anwendbarkeit* der Methodik durch einen systematischen Ablauf, welcher sich in der Ablaufstruktur (Abschnitt 3.5.4) und der Phasengliederung (Abschnitt 4.1) widerspiegelt, sowie durch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei gleichen Expertenbewertungen gegeben. Eine erfolgreiche Anwendung setzt das Verständnis der Gesamtmethodik sowie Kenntnisse im Bereich der statistischen Versuchsplanung und -auswertung voraus. Die *Praxistauglichkeit* wird durch eine problemorientierte Strukturierung und Detaillierung des Systems Prozesskette erreicht. Das Analyseverfahren kann durch Softwarewerkzeuge unterstützt werden, bspw. mit Hilfe des rechnerbasierten Akquise-Werkzeuges aus Abschnitt 4.2.2. Darüber hinaus bietet die Methodik Unterstützung bei der praktischen Umsetzung der empirischen Analyse (siehe Abschnitt 4.4.4 und 4.4.5). Aufgrund der allgemeingültigen und skalierbaren Modellierung und Analyse fertigungstechnischer Prozessketten ist die Methodik als *übertragbar* zu bewerten. Prinzipiell können die MDM-basierten Modelle sehr große Dimensionen annehmen. Mit der strukturorientierten Beschreibung der Prozesskette sowie der wirkungsorientierten Modellierung der einzelnen Prozesse können beliebige fertigungstechnische Prozessketten untersucht werden (siehe Abschnitt 3.5). Demgegenüber sind die konkreten Modelle und Analyseergebnisse produkt- und prozesskettenspezifisch. Der Ablauf der Methode ist transparent gestaltet, allerdings werden die MDM-basierten Modelle

im Falle größerer Dimensionen unübersichtlich. Die *Transparenz* der Modelle kann teilweise durch aufgabenspezifische Auszüge aus den MDM-basierten Gesamtmodellen erreicht werden. Der Modellierungsumfang beschränkt sich auf die für die Analyseaufgabe relevanten Elemente des Originalsystems, sodass von einer *pragmatischen Modellierung* gesprochen werden kann.

Die *Eignung für komplexe Prozessketten*, als spezielle, globale Anforderung, wird von der Gesamtmethodik vollständig erfüllt. Mit Hilfe einer durchgängigen Begleitung der Prozesskettenanalyse, von ersten qualitativen Erkenntnissen bis zum quantifizierten Ursache-Wirkungs-Modell der gesamten Prozesskette, und definierten Schnittstellen zwischen den Methodenschritten und den Modellen (siehe bspw. Abschnitt 4.4.8) wird die *Durchgängigkeit des Erkenntnisprozesses* erreicht. Trotz einer pragmatischen Modellierung schafft die Methodik die geforderte *vollständige Modellierung* aller qualitätsrelevanten Elemente und Beziehungen fertigungstechnischer Prozessketten. Die *Unterstützung der menschlichen Kognition* erfolgt durch eine strukturierte Wissensakquisition einzelner Prozesse (Abschnitte 4.2) und eine Wissensorganisation in den qualitativen und quantitativen Erklärungsmodellen. Außerdem werden aufgabenspezifische Entscheidungsgrundlagen bereitgestellt (siehe insbesondere die Abschnitte 4.3 und 4.4.2).

Neben den speziellen, globalen Anforderungen sind noch weitere Anforderungen in Bezug auf die drei Forschungsfragen zu beurteilen. Hilfestellungen bei der Prozesskettenmodellierung (Abschnitt 4.2.1) und eine lückenlose, systematische Akquisition der Ursache-Wirkungs-Beziehungen (Abschnitt 4.2.3) in Verbindung mit der Interpretation des qualitativen Erklärungsmodells (Abschnitt 4.3.3) stellen die *Eignung der Methodik für eine kleine und unsichere Wissensbasis* sicher. Zum *Umgang mit prozessübergreifenden und indirekten Ursache-Wirkungs-Beziehungen* gehören die in Abschnitt 3.5.2 beschriebene Modellierung und Berechnung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen ebenso wie deren matrizenbasierte Darstellung in der MDM der indirekten Bedeutungen und deren graphische Darstellung in Einflussbäumen (Abschnitt 4.4.2). Darüber hinaus wird die Analyse prozessübergreifender und indirekter Beziehungen im Akquise-Werkzeug und in der Planung der empirischen Analyse ermöglicht. Die *kombinierte Betrachtung unterschiedlichen Wissens* wird durch die Co-Existenz des qualitativen und quantitativen Erklärungsmodells erreicht. Der *Erkenntnisgewinn durch quantitative Systemanalysen* wird in Abschnitt 4.4 beschrieben und durch die Interpretation des qualitativen Erklärungsmodells insbesondere in den Abschnitten 4.3.3 und 4.4.2 unterstützt. Die dadurch erzielten Erkenntnisse dienen der Beschreibung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen mit Hilfe *determinierter Modelle*. Um stochastischen Prozessstreuungen entgegenzuwirken, werden Maßnahmen

zur Vermeidung oder Kontrolle von Störeinflüssen geplant. Es sei darauf hingewiesen, dass das Analyseverfahren der Methodik Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge empirisch und nicht durch physikalische oder chemische Gesetzmäßigkeiten erschließt. Der Aufwand für die empirischen Analysen wird durch die Fokussierung des qualitativen Erklärungsmodells in Abschnitt 4.3.4, die Rückführung aller quantitativen Erkenntnisse in das qualitative Erklärungsmodell zur Gewährleistung einer aktuellen Planungsgrundlage, die Reduktion der empirischen Analyse auf qualitätsrelevante und analysierbare Zusammenhänge (Abschnitt 4.4.2) sowie durch aus dem qualitativen Erklärungsmodell abgeleitete Vorbereitungsmaßnahmen (Abschnitt 4.4.4) auf das *Wesentliche reduziert*.

Tabelle 29: Beurteilung des Erfüllungsgrads der Anforderungen

<b>Legende:</b> <b>0 nicht erfüllt</b> <b>1 kaum erfüllt</b> <b>2 teilweise erfüllt</b> <b>3 überwiegend erfüllt</b> <b>4 vollständig erfüllt</b>	<b>Anforderung</b>	<b>vorliegende Arbeit</b>
allgemeine Anforderungen	Anwendbarkeit	3
	Praxistauglichkeit	3
	Übertragbarkeit	4
	Transparenz	3
	pragmatische Modellierung	4
spezielle Anforderungen – global	Eignung für komplexe Prozessketten	4
	Durchgängigkeit des Erkenntnisprozesses	4
	Vollständigkeit der Modellierung	4
	Unterstützung der menschlichen Kognition	4
spezielle Anforderungen – Forschungsfrage 1	Eignung für kleine und unsichere Wissensbasis	4
spezielle Anforderungen – Forschungsfrage 2	Umgang mit prozessübergreifenden und indirekten Ursache-Wirkungs-Beziehungen	4
	kombinierte Betrachtung unterschiedlichen Wissens	4
spezielle Anforderungen – Forschungsfrage 3	Erkenntnisgewinn durch quantitative Systemanalyse	4
	Unterstützung der quantitativen Systemanalyse	4
	deterministische Modellierung	4
	Reduktion auf das Wesentliche	4

### 5.7 Monetäre Bewertung

Die monetäre Bewertung der Methodik erfolgt anhand des Qualitätskostenbegriffs nach DIN 55350-11, welcher die anfallenden Kosten durch den Verbrauch von Gütern und Dienstleistungen zur Planung, Prüfung, Steuerung und Förderung der Qualität zusammenfasst. Die Interpretation der vorliegenden Arbeit als Vorgehensweise zur Analyse von Prozessketten mit dem Ziel der Erfüllung der Qualitätsanforderungen führt zur Einordnung in den Bereich der *Qualitätslenkung* im Rahmen des Qualitätsmanagementsystems von produzierenden Unternehmen. Die Erarbeitung von Vorgaben für Zwischenproduktmerkmale, also von prozessbezogenen Qualitätszielen, erlaubt auch eine Zuordnung zum Bereich der *Qualitätsplanung*. Beide Interpretationen führen zur Einstufung der mit der Anwendung der Methodik verbundenen Kosten als *Fehlerverhütungskosten* (BRAUN 1993), welche Bestandteil der Qualitätskosten sind (REINHART 1996). Die große Bedeutung fähiger Prozesse und geringer Ausschussraten für die Herstellungskosten von Lithium-Ionen-Zellen wird in mehreren Studien und wissenschaftlichen Veröffentlichungen betont (BRODD & HELOU 2013, SAKTI ET AL. 2015 und WOOD ET AL. 2015). Diese auch im Allgemeinen gewünschten Eigenschaften von Produktionssystemen sollen durch die Anwendung der Methodik besonders zeit- und kosteneffizient erreicht werden, insbesondere mit Hilfe der Betrachtung prozessübergreifender Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge. Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit werden im Folgenden die im Zuge der Anwendung der Methodik anfallenden Aufwände und der Nutzen am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen bewertet.

#### Aufwand zur Anwendung der Methodik

Der Aufwand zur Anwendung der Methodik ist am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen in Tabelle 30 erfasst. Dieser setzt sich aus den Personalkosten zur Bearbeitung der einzelnen Methodenschritte und den Herstellkosten der Versuchsträger zusammen. Die Personalkosten wurden mit einem Stundensatz von jeweils 125,00 € für Projektleiter und Prozessexperten sowie von 62,50 € für Projektassistenzen angesetzt. Der mit der Versuchsplanung in Zusammenhang stehende Personalaufwand beruht auf der Durchführung prozessbezogener Analysen zu jedem einzelnen Prozess bei der Herstellung von Pouch- und Hardcase-Zellen mit der beschriebenen Prozesskette und drei umfassenden, prozessübergreifenden Analyseiterationen. Die Stückkosten<sup>9,10,11</sup> belaufen sich im *iwb*-Forschungs- und Demons-

---

<sup>9</sup> Berücksichtigung der Material- und Fertigungskosten für den Standort Deutschland

<sup>10</sup> kalkulatorische Kosten auf Basis der Investitionskosten für das *iwb*-Forschungs- und Demonstrationszentrum

<sup>11</sup> Zellkonfiguration mit 25 Anoden- und 24 Kathodeneinzelblättern

trationszentrum für Pouch-Zellen auf 525,49 € und für Hardcase-Zellen auf 624,73 € bei einer jährlichen Ausbringungsmenge von 1.700 Stück und einer Gesamtausbeute von 75 %. Diese Stückkosten sind auch für die Analyse einer industriellen Pilotlinie im Produktionsanlauf als realistisch anzunehmen. Zur Vereinfachung wurden die Stückkosten im Rahmen prozessbezogener Analysen mit den halben Stückkosten vollständiger Pouch-Zellen gleichgesetzt, was im Mittel über die gesamte Prozesskette eine gute Näherung darstellt. Am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen belaufen sich die durch die Anwendung der Methodik anfallenden Fehlerverhütungskosten auf ca. 1,08 Mio. € (siehe Tabelle 30).

### **Nutzen der Methodik**

Der Nutzen der Methodik wird durch eine Reduzierung des Anwendungsaufwands gegenüber einem Referenzszenario herausgestellt. Als Referenzszenario wird das allgemeine Versuchsplanungsvorgehen nach GUNDLACH (2004) gewählt, da dieses ein idealtypisches und praxisnahes Vorgehen für die labororientierte Analyse von einzelnen Prozessen darstellt. Darüber hinaus ist die grundsätzliche Gliederung des Ansatzes von GUNDLACH (2004) und der vorliegenden Methodik in eine heuristische und eine empirische Systemanalyse vergleichbar. Bezüglich des Anwendungsaufwands<sup>12</sup> tritt der wesentliche Unterschied im Schritt der Definition des Untersuchungsumfanges auf, welcher den größten Anteil der Personalkosten einnimmt (siehe Tabelle 30). GUNDLACH (2004) leitet aus Listen potentieller Einfluss- und Zielgrößen mit Hilfe mehrerer Bewertungsschritte die zu untersuchenden Zielgrößen, Faktoren und Störgrößen ab. Diese Bewertungen sind in eine Grob- und eine Feinbewertung gegliedert. Die Feinbewertung basiert auf symmetrischen Matrizen zur Erfassung der erwarteten Korrelationen und Wechselwirkungen, deren Bewertungsaufwand quadratisch mit der Anzahl der betrachteten Größen anwächst. Demgegenüber nimmt in der hier vorgestellten Methodik der Aufwand zur Definition der Untersuchungsumfänge nach Abschnitt 4.4.2 linear mit der Anzahl der Größen zu, da mit eindimensionalen Bewertungslisten gearbeitet wird. Darüber hinaus erfolgt vor diesem Schritt bereits eine Reduktion der Größen entsprechend deren Qualitätsrelevanz und deren Bedeutung. Auf Basis dieser Abschätzung kann gefolgert werden, dass der Personalaufwand zur Anwendung der vorgestellten Methodik geringer ist als der des Referenzszenarios und vergleichbarer SVM-basierter Vorgehensweisen. Am Beispiel der betrachteten Prozesskette mit 20 Einzelprozessen reduziert sich der Aufwand zur Definition der Untersuchungsumfänge für die prozessbezogene Analysephase um ca. 50

<sup>12</sup> Annahme: Der Aufwand zur Akquise der potentiellen Einfluss- und Zielgrößen ist näherungsweise gleich.

Arbeitsstunden<sup>13</sup>. Dies entspricht bei den genannten Personenstundensätzen für Prozessexperten ca. 6.250 € und damit einer Einsparung von über 10 % der im Analyseprojekt anfallenden Personalkosten (siehe Tabelle 30).

*Tabelle 30: Zusammenfassung der Aufwände zur Anwendung der Methodik am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen*

Arbeitsinhalt	erläutert in Abschnitt	beteiligte Personen	Zeitaufwand	Kostenaufwand
Prozesskettenbeschreibung und Anpassung des Akquise-Werkzeugs	4.2.1 und 4.2.2	Prozessexperten, Projektleiter, Projektassistenz	10 h 10 h 4 h	1.250,00 € 1.250,00 € 250,00 €
Durchführung der Expertenbefragung	4.2.3	Prozessexperten, Projektleiter	30 h 30 h	7.500,00 €
Prüfung der Expertenangaben	4.2.3	Projektleiter, Projektassistenz	1 h 3 h	312,50 €
Prüfung der qualitativen Erklärungsmodelle	4.3.2	Projektleiter, Projektassistenz	1 h 3 h	312,50 €
Interpretation und Reduktion der qualitativen Erklärungsmodelle	4.3.3 und 4.3.4	Projektleiter, Projektassistenz	1 h 3 h	312,50 €
Definition des Untersuchungsumfangs	4.4.2	Prozessexperten, Projektleiter	54 h 54 h	13.500,00 €
Ableitung und Prüfung der Versuchspläne	4.4.3	Prozessexperten, Projektleiter, Projektassistenz	23 h 23 h 46 h	8.625,00 €
Vorbereitung der empirischen Analyse	4.4.4	Prozessexperten, Projektleiter, Projektassistenz	20 h 20 h 20 h	6.250,00 €
Versuchsdurchführung	4.4.5	-	-	909.623,19 € <sup>14</sup>
Versuchsauswertung	4.4.6	Projektleiter, Projektassistenz	23 h 92 h	8.625,00 €
Interpretation der Ergebnisse	4.4.7	Prozessexperten, Projektleiter	23 h 23 h	5.750,00 €
Validierung	4.4.7	-	-	110.352,90 € <sup>15</sup>
Verknüpfung mit den Erklärungsmodellen	4.4.8	Projektleiter, Projektassistenz	8 h 23 h	2.437,50 €
<b>gesamt</b>	-	-	<b>548 h</b>	<b>1.076.351,09 €</b>
<b>davon Personalkosten</b>	-	-	-	<b>56.375,00 €</b>
<b>davon Herstellkosten</b>	-	-	-	<b>1.019.976,09 €</b>

<sup>13</sup> Annahme: Reduktion des Umfangs des qualitativen Erklärungsmodells um 25 % vor der Definition der Untersuchungsumfänge

<sup>14</sup> Herstellkosten, welche aus 746 prozessbezogenen und 204 prozessübergreifenden Versuchen mit jeweils zwei Wiederholungen resultieren.

<sup>15</sup> Herstellkosten, welche aus 210 Validierungsversuchen resultieren.



Neben der Reduktion des personellen Anwendungsaufwands erreicht die Methodik durch die umfängliche, qualitative und prozessübergreifende Prozesskettenanalyse eine Verringerung der Versuchsumfänge. Über die Stückkosten der Versuchsträger wird somit nach Tabelle 31 ein erheblicher Beitrag zur Verringerung des Anwendungsaufwands gegenüber dem Referenzszenario erreicht. Für die prozessbezogenen Analysen wurden die Aufwände übereinstimmend mit der Planung nach Tabelle 34 des Anhangs angesetzt. Der Aufwand der prozessübergreifenden Analyse wurde mit drei Iterationen mit jeweils acht Faktoren abgeschätzt. Dem Referenzszenario wurden aufgrund der fehlenden, qualitativen prozessübergreifenden Systemanalyse jeweils 25 % mehr Faktoren bzw. mindestens ein zusätzlicher Faktor zu Grunde gelegt. Vereinfachend wurden für das Referenzszenario durchwegs D-optimale Versuchspläne verwendet. Im Falle D-optimaler Versuchspläne ergeben sich die Anzahl der Versuche nach PETERSEN (1991) aus dem 1,5-fachen der Anzahl der Koeffizienten der angenommenen, mathematischen Modelle. Eine detaillierte Aufstellung der Anzahl der Versuche für die beiden Untersuchungsphasen wird mit Tabelle 34 und Tabelle 35 des Anhangs bereitgestellt.

*Tabelle 31: Aufwand zur Umsetzung der empirischen Prozesskettenanalyse am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen*

Versuchsaufwand	Referenzszenario	vorliegende Methodik
Anzahl der Versuche zur Analyse der 20 Einzelprozesse	1109	746
Anzahl der Versuche zur Durchführung drei prozessübergreifender Analysen mit zehn bzw. acht Faktoren	297	204
Gesamtanzahl der Versuche	1406	950
Gesamtanzahl für zwei Wiederholungen und Validierungsversuche (sieben Versuchsträger je Untersuchung)	4428	3060
Summe der Herstellkosten <sup>16</sup>	1.452.717,11 €	1.019.976,09 €
relative Einsparung	-	29,79 %

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die Anwendung der vorgestellten Methodik Analyseziele in komplexen, fertigungstechnischen Prozessketten schneller und effizienter als mit bestehenden Methoden erreicht werden können. Zum einen erfolgt eine schnellere deduktiv-qualitative Analyse des Systems, wodurch ein geringerer Personalaufwand entsteht. Zum anderen wird eine geringere Anzahl an

<sup>16</sup> Vereinfachend wurden die Stückkosten prozessübergreifender Analysen mit den gesamten Stückkosten von Pouch-Zellen und die Stückkosten im Rahmen prozessbezogener Analysen mit den halben Stückkosten von Pouch-Zellen gleichgesetzt.

Versuchsträgern benötigt, sodass die Sachkosten erheblich reduziert werden. Am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen ergeben sich um ca. 30 % verringerte Fehlerverhütungskosten.

Auf Basis dieser Argumentationskette steigt der Nutzen der Anwendung der Methodik unabhängig vom konkreten Anwendungsfall mit der Anzahl der Prozesse und der Anzahl der zu untersuchenden Faktoren. Da auch gezeigt wurde, dass der Anwendungsaufwand unabhängig vom Analyseumfang geringer ist als bei vergleichbaren Vorgehensweisen, wurde die Wirtschaftlichkeit der Methodik allgemeingültig bewiesen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung der Arbeit

Wissen über die qualitätsrelevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Führung und Optimierung komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten hinsichtlich der Kosten- und Qualitätsziele in produzierenden Unternehmen. Fortschreitend kürzere Produktlebenszyklen und ein zunehmender Individualisierungsgrad der Produkte resultieren in häufigeren Anlaufphasen fertigungstechnischer Prozessketten. Steigende Qualitätsanforderungen und zunehmende Funktionsintegration bei neuen Produkten führen zu komplexeren Prozessketten. Daraus ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Prozesskettenanalyse bzgl. des Analyseumfangs sowie des damit verbundenen Aufwands. Am Beispiel des Produktes Lithium-Ionen-Zelle zeigen sich diese Herausforderungen konkret:

- Eine aktuell hohe Dynamik in der Entwicklung neuer Zellgenerationen führt zu kurzen Produktlebenszyklen.
- Neue Anwendungsfelder des Produktes, wie der Einsatz im Elektrofahrzeug, bedingen eine zunehmende Funktionsintegration (bspw. Sicherheitsfunktionen) und höhere Qualitätsanforderungen (bspw. Lebensdauer).
- Zur Massenproduktion neuer Zellgenerationen für die neuen Anwendungsfelder existiert wenig Erfahrung.
- Nicht zerstörungsfrei messbare Zwischenprodukteigenschaften in der Zellmontage und ein hoher Aufwand zur Qualitätsprüfung der Fertigprodukte erschweren die Analyse und die Führung der Prozesskette.

Die vorliegende Arbeit zeigt in Kapitel 2, dass bestehende Ansätze des Qualitätsmanagements und insbesondere der Prozesskettenanalyse den erwähnten Anforderungen nicht gewachsen sind. Deduktiv-quantitative Analysemethoden stehen für neue Produkte und Prozesse oft nicht zur Verfügung. Auf Felddaten basierende induktive Methoden erfordern eine laufende Produktion und sind somit nicht für den Anlauf von Prozessketten geeignet. Über alle Ansätze hinweg zeigen sich Defizite in der deduktiv-qualitativen Analyse komplexer Prozessketten, vorwiegend bzgl. der Eignung für viele Einzelprozesse und Systemelemente sowie der Betrachtung von prozessübergreifenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen. Daraus resultiert der Handlungsbedarf für eine Methodik zur qualitätsorientierten Analyse fertigungstechnischer Prozessketten, welche dem Anlauf von komplexen Prozessketten in besonderem Maße gerecht wird. Zur Erreichung dieses Ziels wurden drei Forschungsfragen formuliert, welche im Rahmen der Konzeption (Kapitel 3) zu einer Strukturierung

der Methodik in drei Teilmethoden geführt haben. Diese sind in Kapitel 4 detailliert. Die Methode zur Wissensakquisition generiert mit Hilfe eines rechnerbasierten Akquise-Werkzeuges und des Beschreibungsmodells der betrachteten Prozesskette die qualitative Wissensbasis. Die Methode zur Wissensinterpretation baut das qualitative Erklärungsmodell der Prozesskette auf und interpretiert dieses u. a. bzgl. der Wissensbedarfe und der Qualitätsrelevanz der enthaltenen Elemente. Zur zeit- und kosteneffizienten Erreichung der Analyseziele werden sowohl die qualitative als auch die quantitative Prozesskettenanalyse iterativ mit der Methode der Wissensinterpretation verknüpft. Das vervollständigte und fokussierte qualitative Erklärungsmodell ist die Grundlage für die Quantifizierung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Methode zur empirischen Analyse. Mit Hilfe der für die gesamte Prozesskette zur Verfügung stehenden qualitativen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge konnten neue Ansätze zur Planung der Untersuchungsumfänge der empirischen Prozesskettenanalyse umgesetzt werden. Die Abbildung der Untersuchungsziele in Versuchsplänen und die Auswertung der Versuchsergebnisse basieren auf etablierten Vorgehensweisen der SVM und der Statistik. Um den Rückfluss der Erkenntnisse aus der empirischen Analyse in das qualitative Erklärungsmodell sicherzustellen und eine aktuelle und valide Planungsgrundlage für weitere Analyseiterationen aufrecht zu erhalten, werden die quantitativen Zusammenhänge transformiert und das qualitative Erklärungsmodell angepasst. In Kapitel 5 erfolgte die Anwendung der Methodik am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen. Hierzu wurde die Prozesskette des *iwb*-Forschungs- und Demonstrationszentrums in der Anlaufphase methodisch begleitet. Anhand einer prozessbezogenen und einer prozessübergreifenden Analyseaufgabe konnte die Erfüllung der an die Methodik gestellten Anforderungen belegt werden. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die Anwendung der Methodik sowohl in der qualitativen als auch der quantitativen Analysephase deutlich geringere Kosten verursacht, als dies bei vorhandenen, für komplexe Prozessketten nicht geeigneten Analysemethoden der Fall ist. Dies konnte insbesondere auf die prozessübergreifende Betrachtung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zurückgeführt werden.

### 6.2 Ausblick

Die erfolgreiche Validierung der Methodik und die positive monetäre Bilanz ermöglichen die Anwendung der Methodik in vielfältigen, industriellen Analyseaufgaben komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten. Aus der Methodik ergeben sich Anschlussmöglichkeiten für technische und wissenschaftliche Arbeiten. Zur weiteren Erhöhung der Anwendbarkeit und der Transparenz der Methodik bietet sich die Verknüpfung und Erweiterung der erarbeiteten Software-Bausteine zu einem integrierten

Software-Werkzeug mit Visualisierungsmöglichkeiten an. Darüber hinaus ist auch die Integration der Methodik in bestehende Software-Werkzeuge aus dem Bereich des CAQ (engl. Computer-Aided Quality Assurance) denkbar. Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich einer methodentheoretischen Erweiterung des Betrachtungsumfangs zur Adressierung der Regelung und Optimierung komplexer, fertigungstechnischer Prozessketten. Das quantitative Erklärungsmodell kann zwar unmittelbar für die Anwendung bestehender Optimierungs- und Regelungsstrategien verwendet werden. Eine dedizierte Verwendung des MDM-basierten quantitativen Erklärungsmodells, welches nach Abschluss der Analyse alle qualitätsrelevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge beinhaltet, stellt aber eine verbleibende Forschungsaufgabe dar. Am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen könnte mittel- bis langfristig das Prozesskettenmanagement durch einen umfassenden Einsatz von Simulationswerkzeugen unterstützt werden, wie dies für andere Produkte und Fertigungsprozesse bereits möglich ist. Im Falle von Batteriezellen sind hierfür noch drei Herausforderungen zu lösen. Erstens sind Prozessmodelle insbesondere der Zellmontage in Simulationsmodellen abzubilden. Zweitens müssen Produktmodelle, welche die Werte der Qualitätsmerkmale der Batteriezellen berechnen, um bislang nicht berücksichtigte, produktionsinduzierte Größen erweitert werden. Darüber hinaus ist die Kopplung der mit Zwischenproduktmerkmalen arbeitenden Prozessmodelle mit dem Produktmodell zu lösen, bspw. durch ein *Produktentstehungsmodell*. Wie eine derartige, ganzheitliche Prozesskettensimulation mit Qualitätsprognose gestaltet werden könnte, ist in Abbildung 40 skizziert.

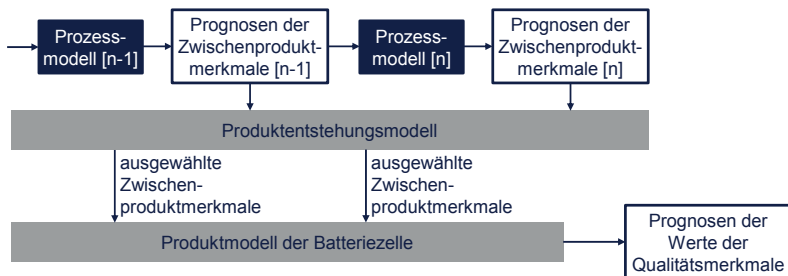


Abbildung 40: Teilmodelle und deren Kopplung zur ganzheitlichen Prozessketten-simulation und Qualitätsprognose



## 7 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-44642-595-8.

AKAO 1992

Akao, Y.: QFD – Quality Function Deployment. Wie die Japaner Kundenwünsche in Qualität umsetzen. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1992.

AREND 2012

Arend, M.: FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. 5. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth 2012. ISBN: 3-41032-333-3.

BARTELS & STÖCKLER 2007

Bartels, A.; Stöckler, M.: Wissenschaftstheorie. Ein Studienbuch. Paderborn: Mentis 2007. ISBN: 978-3-89785-591-5.

BASSE ET AL. 2014

Basse, I.; Sauer, A.; Schmitt, R.: Scalable Ramp-up of Hybrid Manufacturing Systems. Procedia CIRP 20 (2014), S. 1-6.

BETTIN 2004

Bettin, V.: Ansatz zur übergreifenden Qualitätsregelung von Prozessketten in der Fertigung. Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg (2003). Aachen: Shaker 2004. ISBN: 3-83223-323-7. (Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik 9).

BHOTE 1990

Bhote, K. R.: Qualität. Der Weg zur Weltspitze; Die 7 praxisbezogenen Werkzeuge für moderne Versuchsmethodik; Einfacher und kostenwirksamer als SPC. 1. Aufl. Grossbottwar: IQM 1990. ISBN: 3-92526-806-5.

BIEDERMANN & LINDEMANN 2008

Biedermann, W.; Lindemann, U.: Cycles in the Multiple-Domain Matrix. In: Kreimeyer, M. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International DSM Conference. München: Hanser 2008, S. 25-34. ISBN: 978-3-44641-825-7.

BLOHM 1997

Blohm, H.: Produktionswirtschaft. Mit Kontrollfragen sowie Aufgaben und Lösungen. 3. Aufl. Herne, Berlin: Verl. Neue Wirtschafts-Briefe 1997. ISBN: 3-48263-023-2.

BOURDON 1994

Bourdon, R.: Zur Optimierung der Prozeßrobustheit beim Spritzgießen. Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg (1994). Univ. Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Kunststofftechnik 1994. ISBN: 3-98027-406-3.

BRAUN 1993

Braun, J.: Qualitätssicherung für Ingenieure. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993. ISBN: 3-18401-100-3.

BRODD & HELOU 2013

Brodd, R. J.; Helou, C.: Cost comparison of producing high-performance Li-ion batteries in the U.S. and in China. *Journal of Power Sources* 231 (2013), S. 293-300.

BROWNING 2001

Browning, T. R.: Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management* 48 (2001) 3, S. 292-306.

BRUNNER & WAGNER 2010

Brunner, F. J.; Wagner, K. W.: Taschenbuch Qualitätsmanagement. Leitfaden für Studium und Praxis. 5. Aufl. München: Hanser 2010. ISBN: 978-3-446-42670-2.

BÜCHEL & DAENZER 1989

Büchel, A.; Daenzer, W. F.: Systems Engineering. Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben. 6. Aufl. 1988. Zürich: Industrielle Organisation 1989. ISBN: 3-85743-906-8.

BULLINGER 1986

Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Systematische Montageplanung. München, Wien: Hanser 1986. ISBN: 978-3-44614-606-8.

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF) 2014

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Positionspapier der Bundesregierung zur zukünftigen Entwicklung der Mikroelektronik in Deutschland. <[http://www.bmbf.de/pubRD/Anlage\\_BMBF\\_Positionspapier\\_Mikroelektronik.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/Anlage_BMBF_Positionspapier_Mikroelektronik.pdf)> – 25.01.2015.

CHUNG & WEE 2011

Chung, C.-J.; Wee, H.-M.: Short life-cycle deteriorating product remanufacturing in a green supply chain inventory control system. *International Journal of Production Economics* 129 (2011) 1, S. 195-203.

CLARKSON ET AL. 2004

Clarkson, P. J.; Simons, C.; Eckert, C.: Predicting Change Propagation in Complex Design. *Journal of Mechanical Design* 126 (2004) 5, S. 788-797.

COLLEDANI ET AL. 2014

Colledani, M.; Tolio, T.; Fischer, A.; Iung, B.; Lanza, G.; Schmitt, R.; Váncza, J.: Design and management of manufacturing systems for production quality. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) 2, S. 773-796.

COYLE 2000

Coyle, G.: Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: some research questions. *System Dynamics Review* 16 (2000) 3, S. 225-244.

DANILOVIC & BROWNING 2007

Danilovic, M.; Browning, T. R.: Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. *International Journal of Project Management* 25 (2007) 3, S. 300-314.



DE WECK 2007

de Weck, O.: On the Role of DSM in Designing Systems and Products for Changeability. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International DSM Conference. Aachen: Shaker Verlag 2007, S. 311-323. ISBN: 978-3-83226-641-7.

DIN 8580

DIN 8580: Fertigungsverfahren. Berlin: Beuth 2003.

DIN EN ISO 9000

DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2005.

DIN 55350-11

DIN 55350-11: Begriffe zum Qualitätsmanagement – Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005. Berlin: Beuth 2008.

DIN EN ISO 14644-1

DIN EN ISO 14644-1: Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche – Teil 1: Klassifizierung der Luftreinheit anhand der Partikelkonzentration. Berlin: Beuth.

DIN IEC 60050-351

DIN IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik. Berlin: Beuth 2014.

DREWS & HILLEBRAND 2010

Drews, G.; Hillebrand, N.: Lexikon der Projektmanagement-Methoden. 2. Aufl. Freiburg, Berlin, München: Haufe 2010. ISBN: 978-3-448-10224-6.

EICHGRÜN 2003

Eichgrün, K.: Prozesssicherheit in fertigungstechnischen Prozessketten – Systemanalyse, ganzheitliche Gestaltung und Führung. Diss. Univ. Kaiserslautern (2003). ISSN: 0937-9061. (Produktionstechnische Berichte aus dem FBK 46).

ELMARAGHY ET AL. 2012

ElMaraghy, W.; ElMaraghy, H.; Tomiyama, T.; Monostori, L.: Complexity in engineering design and manufacturing. CIRP Annals - Manufacturing Technology 61 (2012) 2, S. 793-814.

EPPINGER & BROWNING 2012

Eppinger, S. D.; Browning, T. R.: Design structure matrix methods and applications. Cambridge: MIT Press 2012. ISBN: 978-0-26201-752-7.

FAHRMEIR 2010

Fahrmeir, L.: Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-01938-8.

FAROOQ ET AL. 2013

Farooq, A.; Araújo, A.; Tavares, S. M.; Nóvoa, H.: Evaluation of a Non-Conformity Matrix Complexity using Components Modularity Metrics. In: Scheurmann, E. et al. (Hrsg.): Reducing risk in innovation. München: Hanser 2013, S. 19-26. ISBN: 978-3-446-43803-3.

FAROOQ ET AL. 2014

Farooq, A.; Tavares, S.; Nóvoa, H.; Araújo, A.: An application of Knowledge Management in Design Structure Matrix for a process improvement phase. In: Marle, F. et al. (Hrsg.): Risk and change management in complex systems. München: Hanser 2014, S. 287-296. ISBN: 978-1-56990-491-6.

FLEISCHER ET AL. 2005

Fleischer, J.; Lanza, G.; Ender, T.: Prozessinnovation durch prozessbasierte Qualitätsprognose im Produktionsanlauf. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 2005, S. 510-516.

GAN ET AL. 2015

Gan, S. S.; Pujawan, I. N.; Suparno; Widodo, B.: Pricing decision model for new and remanufactured short-life cycle products with time-dependent demand. Operations Research Perspectives 2 (2015), S. 1-12.

GÄRTNER ET AL. 2008

Gärtner, T.; Rohleder, N.; Schlick, C.: Simulation of product change effects on the duration of development processes based on the DSM. In: Kreimeyer, M. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International DSM Conference. München: Hanser 2008, S. 199-208. ISBN: 978-3-44641-825-7.

GIENKE & KÄMPF 2007

Gienke, H.; Kämpf, R.: Handbuch Produktion. Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling. München: Hanser 2007. ISBN: 978-3-44641-025-1.

GLÄSER & LAUDEL 2010

Gläser, J.; Laudel, G.: Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen. 4. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwiss. 2010. ISBN: 978-3-53117-238-5.

GROSS 2003

Gross, J.: Linear regression. Berlin, New York: Springer 2003. ISBN: 3-54040-178-4.

GROSS & YELLEN 2006

Gross, J. L.; Yellen, J.: Graph theory and its applications. 2. Aufl. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC 2006. ISBN: 978-1-58488-505-4.

GROßMANN & WIEMER 2010

Großmann, K.; Wiemer, H.: Reproduzierbare Fertigung in innovativen Prozessketten. ZWF 105 (2010) 10, S. 855-859.

GROßMANN & WIEMER 2011

Großmann, K.; Wiemer, H.: Reproduzierbare Fertigung in innovativen Prozessketten. ZWF 106 (2011) 1-2, S. 26-29.

GROßMANN ET AL. 2010

Großmann, K.; Wiemer, H.; Großmann, K. K.; Weller, J.: Reproduzierbare Fertigung in innovativen Prozessketten. ZWF 105 (2010) 11, S. 954-958.

GROßMANN ET AL. 2012A

Großmann, K.; Wiemer, H.; Dietz, G.: Unterstützung der Entwicklung innovativer Technologien. ZWF 107 (2012) 11, S. 808-813.

GROßMANN ET AL. 2012B

Großmann, K.; Wiemer, H.; Helbig, M.: Modellierung und Analyse technologischer Ketten. Industrie Management 28 (2012) 4, S. 38-42.

GROßMANN ET AL. 2013

Großmann, K.; Wiemer, H.; Großmann, K. K.: Methods for modelling and analysing process chains for supporting the development of new technologies. Procedia Material Science 2 (2013), S. 34-42.

GUNDLACH 2004

Gundlach, C.: Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung. Diss. Univ. Kassel (2004). Kassel Univ. Press 2004. ISBN: 3-89958-068-0.

GUO & WHITE 2013

Guo, M.; White, R. E.: A distributed thermal model for a Li-ion electrode plate pair. Journal of Power Sources 221 (2013), S. 334-344.

HABERFELLNER 2012

Haberfellner, R.: Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung. 12. Aufl. Zürich: Orell Füssli 2012. ISBN: 978-3-28004-068-3.

HARTUNG 1994

Hartung, S.: Methoden des Qualitätsmanagements für die Produktplanung und -entwicklung. Diss. RWTH Aachen (1994). Aachen: Shaker 1994. ISBN: 3-86111-946-3. (Berichte aus der Produktionstechnik 94, 9).

HASENER 2004

Hasener, J.: Statistische Methoden der industriellen Prozessmodellierung zur Echtzeitqualitätskontrolle am Beispiel einer kontinuierlichen Produktion von Faserplatten. Diss. Univ. Hamburg (2004). <<http://d-nb.info/974084018/34>> - 31.07.2012.

HEIMES 2014

Heimes, H.: Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen in der Batterieproduktion. Diss. RWTH Aachen (2104). Aachen: Apprimus Verlag 2014. ISBN: 978-3-86359-263-9. (Edition Wissenschaft - Apprimus Bd. 2014, 41).

HELTEN ET AL. 2010

Helten, K.; Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: A procedural model to assess main influences of production on product design. In: Marjanovic, D. et al. (Hrsg.): Design 2010. Zagreb 2010, S. 789-798. ISBN: 978-9-53773-803-7.

HERRMANN 2007

Herrmann, N.: Höhere Mathematik 1. Für Ingenieure, Physiker und Mathematiker. 2. Aufl. München, Wien: Oldenbourg 2007. ISBN: 978-3-48658-447-9.

### HIELSCHER 2008

Hielscher, T.: Qualitätsmanagement in fertigungstechnischen Prozessketten. Vorgehensweise zur fehlerbasierten Optimierung der gefertigten Bauteilqualität. Diss. Technische Universität Kaiserslautern (2008). Technische Universität Kaiserslautern 2008. ISBN: 978-3-939432-74-6. (Produktionstechnische Berichte aus dem FBK 3/2008).

### HOPP & SPEARMAN 2008

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory physics. 3. Aufl. New York, NY: McGraw-Hill/Irwin/Irwin 2008. ISBN: 978-0-07123-246-3.

### HU 2013

Hu, S. J.: Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization. Procedia CIRP 7 (2013), S. 3-8.

### HUB 1994

Hub, H.: Ganzheitliches Denken im Management. Komplexe Aufgaben PC-gestützt lösen. Wiesbaden: Gabler 1994. ISBN: 978-3-40918-751-0.

### JARRE & STOER 2004

Jarre, F.; Stoer, J.: Optimierung. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-54043-575-1.

### JOSSEN & WEYDANZ 2006

Jossen, A.; Weydanz, W.: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. 1. Aufl. Neuß: Ubooks 2006. ISBN: 978-3-93935-911-1.

### JUNG 2000

Jung, D.: Praxis- und prozessnahes Optimierungsmodell (PPO-Modell) zur systematischen, kontinuierlichen Verbesserung komplexer industrieller Prozesse. Diss. Univ. Saarbrücken (2000). Saarbrücken: LFT 2000. ISBN: 3-93042-947-0. (Schriftenreihe Produktionstechnik 18).

### JURAN 1993

Juran, J. M.: Der neue Juran. Qualität von Anfang an. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1993. ISBN: 3-47841-010-X.

### KAMISKE 2013

Kamiske, G. F.: Handbuch QM-Methoden. Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen. 2. Aufl. München: Hanser 2013. ISBN: 978-3-44643-558-2.

### KENNEY ET AL. 2012

Kenney, B.; Darcovich, K.; MacNeil, D. D.; Davidson, I. J.: Modelling the impact of variations in electrode manufacturing on lithium-ion battery modules. Journal of Power Sources 213 (2012), S. 391-401.

### KETTNER 2013

Kettner, B.: Auf Schatzsuche im Web. Technik in Bayern (2013) 6, S. 14-15.

### KIENER 2006

Kiener, S.: Produktions-Management. Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. 8. Aufl. München: Oldenbourg 2006. ISBN: 978-3-48658-059-4.

**KLEIN 2012**

Klein, B.: QFD – Quality Function Deployment. 2. Aufl. Renningen: Expert-Verlag 2012. ISBN: 978-3-81693-088-4.

**KLEPPMANN 2011**

Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. 7. Aufl. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42774-7.

**KÖNIG ET AL. 2008**

König, C.; Kreimeyer, M.; Braun, T.: Multiple-Domain Matrix as a framework for systematic process analysis. In: Kreimeyer, M. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International DSM Conference. München: Hanser 2008, S. 231-244. ISBN: 978-3-44641-825-7.

**KREIMEYER 2010**

Kreimeyer, M. F.: A structural measurement system for engineering design processes. Diss. Technische Universität München (2010). München: Dr. Hut 2010. ISBN: 978-3-86853-399-6.

**KRISHNAMOORTHY & KRISHNAMOORTHY 2011**

Krishnamoorthi, K. S.; Krishnamoorthi, V. R.: A First Course in Quality Engineering: Integrating Statistical and Management Methods of Quality. 2. Aufl. Boca Raton: CRC Press 2011. ISBN: 978-1-43984-034-4.

**KURFER ET AL. 2012**

Kurfer, J.; Westermeier, M.; Reinhart, G.: Cell stacking process of high-energy lithium-ion cells. In: Hu, J. S. (Hrsg.): Technologies and Systems for Assembly Quality, Productivity and Customization. Ann Arbor, 20.-22.05.2012. Ann Arbor: University of Michigan 2012, S. 33-37. ISBN: 978-0-615-64022-8.

**LAMP 2013**

Lamp, P.: Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-64230-652-5.

**LANZA & PETERS 2012**

Lanza, G.; Peters, S.: Integrated capacity planning over highly volatile horizons. CIRP Annals – Manufacturing Technology 61 (2012), S. 395-398.

**LÄUCHLI 1991**

Läuchli, P.: Algorithmische Graphentheorie. Basel, Boston: Birkhäuser 1991. ISBN: 3-76432-663-8.

**LEUTHNER 2013**

Leuthner, S.: Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-64230-652-5.

**LINDE & HILL 1993**

Linde, H.; Hill, B.: Erfolgreich erfinden. Widerspruchsorientierte Innovationsstrategie für Entwickler und Konstrukteure. Darmstadt: Hoppenstedt-Technik-Tab.-Verl. 1993. ISBN: 978-3-87807-174-7.

### LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-64201-423-9.

### LINDEMANN ET AL. 2009

Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural complexity management. An approach for the field of product design. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-54087-888-9.

### LOTTER & WIENDAHL 2012

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-64229-060-2.

### MADU 2006

Madu, C. N.: House of quality (QFD) in a minute. Quality Function Deployment. 2. Aufl. Fairfield, Conn.: Chi Publ. 2006. ISBN: 0-96760-236-X.

### MAISENBACHER ET AL. 2012

Maisenbacher, S.; Yassine, A.; El-Zein, M.; Goyal, R.; Maurer, M.: Welding process analysis using literature-based Design Structure Matrix. In: Onishi, M. et al. (Hrsg.): Gain competitive advantage by managing complexity. Proceedings of the 14th International DSM Conference, Kyoto, Japan, 2012. München: Hanser 2012, S. 31-41. ISBN: 978-3-44643-354-0.

### MAISER ET AL. 2014

Maiser, E.; Michaelis, S.; Müller, D.; Kampker, A.; Deutschens, C.; Heimes, H.; Sarovic, N.; Klusmann, N.; Thielmann, A.; Sauer, A.: VDMA Roadmap „Batterie-Produktionsmittel 2030“. Frankfurt am Main: VMDA Verlag GmbH 2014.

### MARQUES ET AL. 2013

Marques, A. F.; Alves, A. C.; Sousa, J. P.: An Approach for Integrated Design of Flexible Production Systems. Procedia CIRP 7 (2013), S. 586-591.

### MASING ET AL. 2014

Masing, W.; Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Masing Handbuch Qualitätsmanagement. 6. Aufl. München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43992-4.

### MAURER 2007

Maurer, M. S.: Structural awareness in complex product design. Diss. Technische Universität München (2007). München: Dr. Hut 2007. ISBN: 978-3-89963-632-1.

### MAYERS 1997

Mayers, B.: Prozess- und Produktoptimierung mit Hilfe der statistischen Versuchsmethodik. Diss. RWTH Aachen (1997). Aachen: Shaker 1997. ISBN: 3-82652-497-7. (Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 9/97).

### MELING 2012

Meling, F. J.: Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik. Diss. Technische Universität München (2012). München: Utz 2013. ISBN: 978-3-83164-319-6. (Forschungsberichte *iwb* 279).

**MOLITOR 1997**

Molitor, M.: Prozesskettenorientierte Qualitätstechnik – dargelegt am Beispiel der Getriebeserienfertigung. Hab. RWTH Aachen (1995). Aachen: Shaker 1997. ISBN: 3-8265-2241-9. (Berichte aus der Produktionstechnik 4/97).

**MORGENSTERN 2004**

Morgenstern, C.: Praxishandbuch Six Sigma. Projektauswahl, Prozessoptimierung, Nullfehlerqualität. Kissing: WEKA Media 2004-2005. ISBN: 3-81113-330-6.

**MÜLLER 2006**

Müller, B. M.: Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile. Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg (2005). Bamberg: Meisenbach 2006. ISBN: 3-87525-240-3. (Fertigungstechnik - Erlangen 173).

**MYERS ET AL. 2009**

Myers, R. H.; Anderson-Cook, C. M.; Montgomery, D. C.: Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments. 3. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley 2009. ISBN: 978-0-47017-446-3.

**NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT 2012**

Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht). <[http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht\\_emob\\_3\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_3_bf.pdf)> – 25.01.2015.

**NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT 2014**

Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung. <[http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Verkehr/emob\\_fortschrittsbericht\\_2014\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/emob_fortschrittsbericht_2014_bf.pdf)> – 25.01.2015.

**NEWMAN 2003**

Newman, M. E.: The structure and function of complex networks. <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0303516>> – 04.01.2015.

**PETERSEN 1991**

Petersen, H.: Grundlagen der statistischen Versuchsplanung. Landsberg/Lech: ecomed 1991. ISBN: 3-60965-340-X.

**PETTINGER 2013**

Pettinger, K.-H.: Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-64230-652-5.

**POLKE 1990**

Polke, R.: Qualitätssicherung in der Feststoffverfahrenstechnik. Chemie Ingenieur Technik 62 (1990) 10, S. 813-821.

**PULS 2002**

Puls, C.: Konfigurationswissen in KMU. Diss. ETH Zürich (2002). <[http://www.coma.imes.ethz.ch/pdf/Diss\\_Pulsi.pdf](http://www.coma.imes.ethz.ch/pdf/Diss_Pulsi.pdf)> – 26.05.2015.

RANGLES 1947

Randles, J. E. B.: Kinetics of rapid electrode reactions. Discussions of the Faraday Society 1 (1947), S. 11.

REFA 1990

REFA: Methodenlehre der Betriebsorganisation, Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. 2 Aufl. München: Hanser 1990.

ISBN: 978-3-44615-967-9.

REINHART 1996

Reinhart, G.: Qualitätsmanagement. Ein Kurs für Studium und Praxis. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-54061-078-2.

REINHART ET AL. 2014

Reinhart, G.; Kurfer, J.; Westermeier, M.; Zeilinger, T.: Integrated Product and Process Model for Production System Design and Quality Assurance for EV Battery Cells. Advanced Materials Research 907 (2014), S. 365-378.

REINHART & ZÄH 2014

Reinhart, G.; Zäh, M.: *iwb* newsletter 22 (2014) 3. <[http://www.iwb.mw.tum.de/iwbmedia/iwb\\_newsletter\\_2014\\_3-p-10532.pdf](http://www.iwb.mw.tum.de/iwbmedia/iwb_newsletter_2014_3-p-10532.pdf)> - 26.05.2015.

REIß 1993A

Reiß, M.: Komplexitätsmanagement (I). Das Wirtschaftsstudium (1993) 1, S. 54-60.

REIß 1993B

Reiß, M.: Komplexitätsmanagement (II). Das Wirtschaftsstudium (1993) 2, S. 132-137.

RENNER 2012

Renner, Tim: Performance Management im Produktionsanlauf. Diss. RWTH Aachen (2012). Hochschulbibliothek RWTH Aachen 2012.

<<http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2012/3929/pdf/3929.pdf>> - 26.05.2015.

ROSS 2002

Ross, P.: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung. Diss. Technische Universität München (2002). München: Utz 2002. ISBN: 3-83160-191-7. (Forschungsbericht *iwb* 170).

RUPRECHT & KAISER 2013

Ruprecht, E.; Kaiser, J.: Kostenoptimierte Batterie-Zellfertigung. ATZ-Elektronik 8 (2013) 3, S. 180-185.

RYZKO 2001

Ryzko, P. J.: Prozessüberwachung und -optimierung in der Elastomerverarbeitung auf der Basis statistischer Versuchsmethodik und mathematischer Prozessmodelle. Diss. RWTH Aachen (2001). <<http://d-nb.info/965487954/34>> - 26.05.2015.



SAKTI ET AL. 2015

Sakti, A.; Michalek, J. J.; Fuchs, E. R.; Whitacre, J. F.: A techno-economic analysis and optimization of Li-ion batteries for light-duty passenger vehicle electrification. *Journal of Power Sources* 273 (2015), S. 966-980.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES 2006

Sandia National Laboratories SAND2005-3123: FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications: 2006.

SARKAR & PFEIFER 2006

Sarkar, S.; Pfeifer, J.: *The philosophy of science. An encyclopedia.* New York: Routledge 2006. ISBN: 978-0-41593-927-0.

SCHÄFER 2003

Schäfer, L.: *Analyse und Gestaltung fertigungstechnischer Prozessketten. Konzept zur datenbasierten Ermittlung qualitätswirksamer Einfluss-Ursache-Wirkzusammenhänge und zur Ableitung von Maßnahmen zur Prozesssicherung.* Diss. Univ. Kaiserslautern (2003). ISSN: 0937-9061. (Produktionstechnische Berichte aus dem FBK 45).

SCHEFFLER 1997

Scheffler, E.: *Statistische Versuchsplanung und -auswertung. Eine Einführung für Praktiker.* 3. Aufl. von "Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung". Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie 1997. ISBN: 3-34200-366-9.

SCHNEIDER-WINDEN 1992

Schneider-Winden, K.: *Industrielle Planungstechniken. Eine Einführung.* Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 3-18401-099-6.

SCHRÖDER 2010

Schröder, D.: *Intelligente Verfahren. Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2010. ISBN: 978-3-64211-397-0.

SCHULZE 1999

Schulze, A.: *Statistische Versuchsplanung.* In: Masing, W. (Hrsg.): *Handbuch Qualitätsmanagement.* München: Hanser 1999, S. 389-424. ISBN: 3-446-19397-9.

SEBER & WILD 1989

Seber, G. A. F; Wild, C. J.: *Nonlinear regression.* New York: Wiley 1989. ISBN: 0-47147-135-6.

SHAININ & SHAININ 1988

Shainin, D.; Shainin, P.: *Better than Taguchi orthogonal tables. Quality and Reliability Engineering International* 4 (1988) 2, S. 143-149.

SIBBERTSEN & LEHNE 2015

Sibbertsen, P.; Lehne, H.: *Statistik. Einführung für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler.* 2. Aufl. Berlin: Gabler 2015. ISBN: 978-3-66246-234-8.

SIEBERTZ ET AL. 2010

Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung. Design of experiments (DoE).* Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-05492-1.

### SIMON 2013

Simon, R.: Aufbau einer Fabrik zur Zellfertigung. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-64230-652-5.

### STEINS 2000

Steins, D.: Entwicklung einer Systematik zur qualitätsgerechten Optimierung komplexer Produktionssysteme. Diss. RWTH Aachen (2000). Aachen: Shaker 2000. ISBN: 3-8265-7141-X. (Berichte aus der Produktionstechnik 10/2000).

### STEWART 1981

Steward, D. V.: The design structure system: A method for managing the design of complex systems. IEEE Transactions on Engineering Management EM-28 (1981) 3, S. 71-74.

### STRAUß ET AL. 1994

Strauß, B.; Haag, H.; Badtke, G.: Forschungsmethoden, Untersuchungspläne, Techniken der Datenerhebung in der Sportwissenschaft. Forschungsmethodologische Grundlagen. Schorndorf: Hofmann 1994. ISBN: 978-3-7780-7882-2.

### TAGUCHI 1986

Taguchi, G.: Introduction to quality engineering. Designing quality into products and processes. Tokyo: The Organization 1986. ISBN: 9-28331-084-5.

### TERNINKO ET AL. 1998

Terninko, J.; Zusman, A.; Zlotin, B.: TRIZ – der Weg zum konkurrenzlosen Erfolgsprodukt. Ideen produzieren, Nischen besetzen, Märkte gewinnen. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1998. ISBN: 3-47891-920-7.

### THE INTERNATIONAL ACADEMY OF PRODUCTION ENGINEERING 2013

The International Academy of Production Engineering: Encyclopedia of Production Engineering. 1. Aufl. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-64220-616-0.

### TIETJEN & MÜLLER 2009

Tietjen, T.; Müller, D. H.: FMEA-Praxis. Das Komplettpaket für Training und Anwendung. 3. Aufl. München: Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-40267-6.

### TITTMANN 2003

Tittmann, P.: Graphentheorie. Eine anwendungsorientierte Einführung. München, Wien: Hanser 2003. ISBN: 3-44622-343-6.

### TURAU 2009

Turau, V.: Algorithmische Graphentheorie. 3. Aufl. München: Oldenbourg 2009. ISBN: 978-3-48659-057-9.

### UNBEHAUEN 2007

Unbehauen, H.: Regelungstechnik I. Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme. 14. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2007. ISBN: 978-3-83489-196-9.

### VUORILEHTO 2013

Vuorilehto, K.: Materialien und Funktion. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-64230-652-5.

WEBER & ROTH 2013

Weber, C. J.; Roth, M.: Separatoren. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-64230-652-5.

WENGLER 1996

Wengler, M. M.: Methodik für die Qualitätsplanung und -verbesserung in der Keramikindustrie. Ein Beitrag zum Qualitätsmanagement bei der Planung neuer und der Optimierung bestehender Prozesse. Diss. RWTH Aachen (1995). Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. ISBN: 3-18339-202-X. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik 392).

WERDICH 2011

Werdich, M. (Hrsg.): FMEA - Einführung und Moderation. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2011. ISBN: 978-3-83481-433-3.

WESTERMEIER ET AL. 2013

Westermeier, M.; Reinhart, G.; Zeilinger, T.: Method for quality parameter identification and classification in battery cell production. In: IEEE (Verfasser): 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC) 2013. Nürnberg. Piscataway, N.J.: IEEE, 2013. ISBN: 978-1-4799-1102-8.

WESTERMEIER ET AL. 2014

Westermeier, M.; Reinhart, G.; Steber, M.: Complexity Management for the Start-up in Lithium-ion Cell Production. Procedia CIRP 20 (2014), S. 13-19.

WOOD ET AL. 2015

Wood, D. L.; Li, J.; Daniel, C.: Prospects for reducing the processing cost of lithium ion batteries. Journal of Power Sources 275 (2015), S. 234-242.

WÖHRLE 2013

Wöhrle, T.: Lithium-Ionen-Zelle. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-64230-652-5.

YASSINE ET AL. 2003

Yassine, A.; Whitney, D.; Daleiden, S.; Lavine, J.: Connectivity maps: Modeling and analysing relationships in product development processes. Journal of Engineering Design 14 (2003) 3, S. 377-394.

YI ET AL. 2013

Yi, J.; Kim, U. S.; Shin, C. B.; Han, T.; Park, S.: Three-Dimensional Thermal Modeling of a Lithium-Ion Battery Considering the Combined Effects of the Electrical and Thermal Contact Resistances between Current Collecting Tab and Lead Wire. Journal of the Electrochemical Society 160 (2013) 3, S. A437.

ZAPP 1998

Zapp, M.: Ultraschallunterstütztes Schleifen von Hochleistungskeramik - Ein Beitrag zur gezielten Beeinflussung der Eigenschaften von Bauteilen durch die ganzheitliche Prozeßkettenbetrachtung. Diss. Univ. Kaiserslautern (1998). ISSN: 0937-9061. (FBK Produktionstechnische Berichte 30).

ZIMMERMANN 2008

Zimmermann, H.-J.: Operations Research. Methoden und Modelle. Für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2008. ISBN: 978-3-83480-455-6.

## 8 Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen im Rahmen der qualitätsorientierten Analyse komplexer Prozessketten im Allgemeinen und am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen untersucht wurden. Deren Ergebnisse sind in Teilen in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für Ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Nachfolgend sind die Studienarbeiten chronologisch aufgelistet:

Studierende(r)	Studienarbeit
Nadler, C.	Entwicklung eines Qualitätssicherungskonzeptes für die Herstellung von Hochenergiespeichern, abgegeben im November 2012
Mittler, T.	SysML-Modellierung von Produkt-Prozess-Interaktionen bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen, abgegeben im Juni 2013
Fischer, J. F. L.	Entwicklung eines Algorithmus zur Identifikation von Prozess-Produkt-Interaktionen im Herstellungsprozess von Lithium-Ionen-Zellen, abgegeben im Januar 2014
Steber, M.	Methode zur Prozesskettenanalyse und Versuchsplanung in der Produktion von Lithium-Ionen-Zellen, abgegeben im Februar 2014
Steinecker, C.	Methode zur Identifikation von prozessübergreifenden Abhängigkeiten am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen, abgegeben im Februar 2014
Edenstrasser, A.	Wirtschaftlichkeit der Batterieproduktion, abgegeben im Juni 2014
Aramouny, M.	Entwicklung einer Methode zur Planung des Produktionsanlaufs von Batteriezellen, abgegeben im Juli 2014

<b>Studierende(r)</b>	<b>Studienarbeit</b>
Moretti, N.	Entwicklung eines Softwaretools zur Qualitätsbestimmung von Lithium-Ionen-Zellen, abgegeben im Oktober 2014
Buchta, V.	Statistische Bewertung experimenteller Analysen von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen bei der Produktion von Lithium-Ionen-Zellen, abgegeben im Februar 2015
Nirschl, T.	Methode zur MDM-basierten, deduktiv-qualitativen Analyse komplexer Prozessketten, abgegeben im Februar 2015
Pritzl, T.	Empirische Analyse der Produktion von Lithium-Ionen-Zellen, abgegeben im Februar 2015
Ruppert, S.	Prozessübergreifende Versuchsplanung für die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen, abgegeben im August 2015
Nirschl, T.	Methode zur Qualitätsplanung in komplexen Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen, abgegeben im Dezember 2015

## 9 Anhang

### 9.1 Empfehlungen zur Akquisition von Expertenwissen

*Tabelle 32: Leitfragen, mögliche Kennzahlen und Empfehlungen zur Durchführung von Schritt 2 der deduktiv-qualitativen Analyse*

Leitfrage	Kennzahl	Empfehlung
Liegen ausreichend Bewertungen zu den Stell- und Störgrößen vor?	$\frac{\text{Anzahl bewerteter Stell- und Störgrößen}}{\text{Gesamtanzahl Stell- und Störgrößen}}$	1
Sind genügend Zwischenproduktmerkmale als Wirkungen bewertet worden, welche durch den Prozess planmäßig beeinflusst werden sollen?	$\frac{\text{Anzahl der Bewertungen unter Beteiligung von Zwischenproduktmerkmalen}}{\text{Gesamtanzahl der Bewertungen zum Prozess}}$	ca. 0,3...0,5
Sind genügend Zwischenproduktmerkmale als Ursachen bewertet worden, welche den Prozess planmäßig beeinflussen?		
Sind genügend Zwischenproduktmerkmale als Ursachen bewertet worden, welche die planmäßige Durchführung des Prozesses beeinträchtigen?		
Ist der Anteil der bewerteten Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen eines Prozesses realistisch?	$\frac{\text{Anzahl der Bewertungen mit Wechselwirkungen}}{\text{Gesamtanzahl der Bewertungen zum Prozess}}$	ca. 0,1...0,5 je nach Komplexität des Prozesses
Ist der Anteil der bewerteten, direkten Wirkungen auf die Fertigproduktmerkmale realistisch?	$\frac{\text{Anzahl direkter Wirkungen auf Fertigproduktmerkmale}}{\text{Gesamtanzahl der Bewertungen zum Prozess}}$	Gegen 0 im ersten, gegen 1 im letzten Prozess
Liegen ausreichend Bewertungen der Fertigproduktmerkmale als Wirkungen vor?	$\frac{\text{Anzahl der Bewertungen zu den Fertigproduktmerkmalen}}{\text{Gesamtanzahl der Fertigproduktmerkmale}}$	2...5
Sind die wichtigsten Ursache-Wirkungs-Beziehungen durch ausreichend Expertenmeinungen abgesichert?	$\frac{\text{Anzahl der Mehrfachmeinungen}}{\text{Gesamtanzahl der Bewertungen zum Prozess}}$	$\geq 0,2$ (Pareto-Prinzip)
Sind ausreichend fundierte Expertenmeinungen vorhanden?	$\frac{\text{Anzahl sicherer Meinungen } (S_A, S_B \in \{2, 3\})}{\text{Gesamtanzahl der Bewertungen zum Prozess}}$	$\geq 0,2$ (Pareto-Prinzip)

## 9.2 Pareto-Analyse des qualitativen Erklärungsmodells

Tabelle 33: Pareto-Analyse der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge im qualitativen Erklärungsmodell

Grenzen der Risiko-klassen	Risiko-klasse	Anzahl der Zusammenhänge	gesamtes Risiko der Klasse	Anteil am Gesamtrisiko in %	kumulierter Anteil am Gesamtrisiko in %	Kategorie
8,5-9	8,75	92	805	48,6	48,6	A
8-8,5	8,25	0	0	0	48,6	A
7,5-8	7,75	0	0	0	48,6	A
7-7,5	7,25	3	21,75	1,3	49,9	A
6,5-7	6,75	0	0	0	49,9	A
6-6,5	6,25	2	12,5	0,8	50,6	A
5,5-6	5,75	54	310,5	18,7	69,4	A
5-5,5	5,25	0	0	0	69,4	A
4,5-5	4,75	6	28,5	1,7	71,1	A
4-4,5	4,25	3	12,75	0,8	71,9	A
3,5-4	3,75	27	101,25	6,1	78,0	A
3-3,5	3,25	2	6,5	0,4	78,4	A
2,5-3	2,75	102	280,5	16,9	95,3	B
2-2,5	2,25	2	4,5	0,3	95,6	C
1,5-2	1,75	28	49	3,0	98,5	C
1-1,5	1,25	8	10	0,6	99,1	C
0,5-1	0,75	2	1,5	0,1	99,2	C
0-0,5	0,25	53	13,25	0,8	100,0	C
Summe		384	1657,5	100,0		

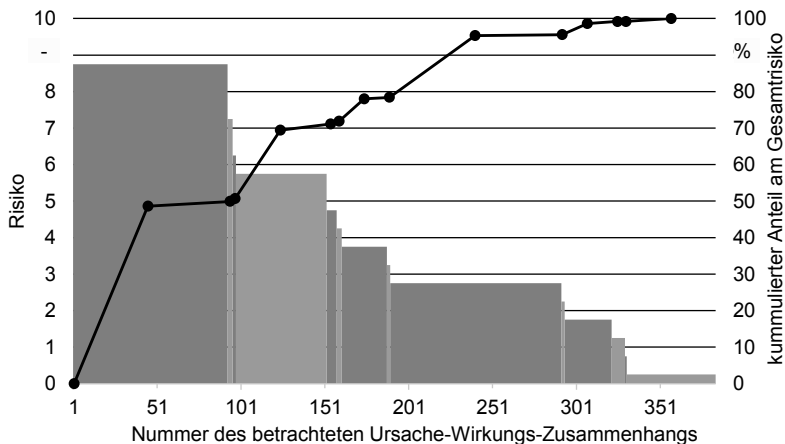


Abbildung 41: Pareto-Diagramm des Risikos der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge im qualitativen Erklärungsmodell



### 9.3 Versuchsaufwand der empirischen Analysen

*Tabelle 34: Vergleich der benötigten Versuchszahlen unterschiedlicher Versuchspläne in der prozessbezogenen Analysephase für jeden Einzelprozess ohne Wiederholungen*

Prozess	Anzahl der Faktoren	Anzahl der Faktoren im Referenzszenario (+ 25 %)	Anzahl der Versuche (D-optimal)	Anzahl der Versuche im Referenzszenario	Kommentar
1	2	3	18	30	jeweils Kathode und Anode
2	3	4	30	46	jeweils Kathode und Anode
3	2	3	18	30	jeweils Kathode und Anode
4	7	9	108	166	jeweils Kathode und Anode
5	7	9	108	166	jeweils Kathode und Anode
6	5	6	64	84	jeweils Kathode und Anode
7	4	5	46	64	jeweils Kathode und Anode
8	5	6	64	84	jeweils Kathode und Anode
9	7	9	54	83	
10a	3	4	30	46	jeweils Kathode und Anode
10b	3	4	30	46	jeweils Kathode und Anode
11	0	0	0	0	in Abschnitt 5.2.2 ausgeschlossen
12	4	5	23	32	
13	0	0	0	0	in Abschnitt 5.2.2 ausgeschlossen
14a	4	5	23	32	
14b	4	5	23	32	
15a	6	8	42	68	
15b	6	8	42	68	
16b	4	5	23	32	
17	0	0	0	0	in Abschnitt 5.2.2 ausgeschlossen
18b	0	0	0	0	bereits mit Prozess 14b abgedeckt
19	0	0	0	0	in Abschnitt 5.2.2 ausgeschlossen
20	0	0	0	0	keine Untersuchung der Zelltests

*Tabelle 35: Resultierende Versuchsanzahlen nach Produktvarianten und Prozesskettenabschnitt für die prozessbezogenen Experimente ohne Wiederholungen*

<b>Prozesskettenabschnitt</b>	<b>Versuchsanzahl für Pouch-Zellen</b>	<b>zusätzliche Versuchsanzahl für Hardcase-Zellen</b>	<b>Versuchsanzahl für beide Produktvarianten</b>
Elektrodenherstellung	392	-	392
Zellmontage	259	95	354
gesamt	651	95	746

# Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
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, [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung  
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes 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 3-931327-06-0
- 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 Produktionssysteme  
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen  
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 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 Industriekeramik 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 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag  
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
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 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 - Produktivitätssteigerung 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 Mikrobautteilen  
125 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 Produktsimulation  
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 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
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien  
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung  
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele  
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug  
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien  
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge  
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder  
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen  
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement  
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche  
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder  
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement  
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen  
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?  
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau  
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung  
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlank im Mittelstand  
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation  
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten  
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt  
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik  
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau  
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben  
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen  
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!  
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«  
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen  
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlschmelzen  
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren  
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung  
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen  
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung  
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette  
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen  
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

## Forschungsberichte IWB Band 1-121

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1 -121 sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen.

- 1 Streifinger, E.: Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel  
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 Fuchsberger, A.: Untersuchung der spannenden Bearbeitung von Knochen  
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 Maier, C.: Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrieroboter  
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 Summer, H.: Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen  
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 Simon, W.: Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen  
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 Büchs, S.: Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung  
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 Hunzinger, J.: Schneiderdierte Oberflächen  
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 Pilland, U.: Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen  
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozessgestaltung  
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 Reithofer, N.: Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen  
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse  
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 Reinhart, G.: Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungszäse  
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 Bürstner, H.: Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion  
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 Riese, K.: Klipsmontage mit Industrierobotern  
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 Lutz, P.: Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung  
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 Klippel, C.: Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems  
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 Rascher, R.: Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung  
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 Heusler, H.-J.: Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 Kirchknopf, P.: Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 Sauerer, Ch.: Beitrag für ein Zerspanprozessmodell Metallbandsägen  
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 Karstedt, K.: Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung  
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 Peiker, St.: Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems  
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 Schugmann, R.: Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage  
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 Wrba, P.: Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 Eibelshäuser, R.: Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung  
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 Prasch, J.: Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie  
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 Teich, K.: Prozeßkommunikation und Rechnernetz in der Produktion  
1990: 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfang, W.: Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter 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 Tuczek, H.: Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung  
1992: 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.: Planungsstrategien zur stömungstechnischen 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 Kupec, 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 Hoßmann, 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 Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse  
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 Schrüfer, 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 Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe  
1992: 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 Glaas, 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 Bomm, 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 Strohmayr, R.: Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeeinrichtungen  
1993: 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 Glas, J.: Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware  
1993: 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 Stetter, R.: Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboterereinsatzes  
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 Woenckhaus, Ch.: Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung  
1994: 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 Kummelstein, G.: 3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme  
1994: 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 Kugelman, 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 Viethen, 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 Projektkommunikations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld  
1997: 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 Welling, A.: Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge  
1994: 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 Zetmayer, 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 Raith, 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 Produktionssystemen 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 Zwanzer, 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 Materialflußsteuerungen  
1995 - 94 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-58953-8
- 87 Rockland, M.: Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung 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 variantenreiche 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-Konturfolgensensoren  
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 Fertigungszellen - 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 Pischelsrieder, 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 variantenreichen 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 Wagner, 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 Krönert, 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 Lindermaier, R.: Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen  
1998 - 84 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-64686-8
- 116 Koehrer, J.: Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung  
1998 - 75 Abb. - 185 Seiten - ISBN 3-540-65037-7
- 117 Schuller, 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.:** Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen  
1999 - 63 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-65896-3

## Forschungsberichte IWB ab Band 122

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
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, [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 122 **Burghard Schneider:** Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 **Bernd Goldstein:** Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung  
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 **Helmut E. Mößner:** Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme  
164 Seiten - ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 **Ralf-Gunter Gräser:** Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern  
167 Seiten - ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 **Hans-Jürgen Trossin:** Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik  
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 **Doris Kugelmann:** Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern  
168 Seiten - ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 **Rolf Diesch:** Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen  
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 **Werner E. Lulay:** Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen  
190 Seiten - ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 **Otto Murr:** Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen  
178 Seiten - ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 **Michael Macht:** Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping  
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 **Bruno H. Mehler:** Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden  
152 Seiten - ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 **Knut Heltmann:** Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle  
146 Seiten - ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 **Stefan Blessing:** Gestaltung der Materialfußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen  
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 **Can Abay:** Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik  
159 Seiten - ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 **Stefan Brandner:** Integriertes Produktdaten- und Prozessmanagement in virtuellen Fabriken  
172 Seiten - ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 **Arnd G. Hirschberg:** Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung  
165 Seiten - ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 **Alexandra Reek:** Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen  
193 Seiten - ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 **Khalid-Alexander Sabbah:** Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen  
148 Seiten - ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 **Klaus U. Schliffenbacher:** Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken  
187 Seiten - ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 **Andreas Sprenzel:** Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung  
144 Seiten - ISBN 978-3-89675-757-9
- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion  
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen  
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen  
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehner:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss  
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen  
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Hohn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0



- 150 *Jörn Böhl*: Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 *Robert Bürgel*: Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 *Stephan Dürrschmidt*: Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0022-6
- 153 *Bernhard Eich*: Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung  
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 *Wolfgang Rudarfer*: Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke  
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 *Hans Meier*: Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe  
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 *Gerhard Nowak*: Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 *Martin Werner*: Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen  
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 *Bernhard Lenz*: Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung  
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 *Stefan Grunwald*: Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 *Josef Gartner*: Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen  
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 *Wolfgang Zeller*: Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 *Michael Loferer*: Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen  
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 *Jörg Fährer*: Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 *Jürgen Höppler*: Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 *Hubert Götte*: Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik  
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 *Martin Weißenberger*: Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 *Dirk Jacob*: Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 *Ulrich Roßgoderer*: System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen  
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 *Robert Klingel*: Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen  
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 *Paul Jens Peter Ross*: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 *Stefan von Praun*: Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 *Florian von der Hagen*: Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 *Oliver Kramer*: Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 *Winfried Dohmen*: Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 *Oliver Anton*: Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 *Welf Broser*: Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 *Frank Breitinge*: Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen  
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 *Johann von Pieveling*: Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling  
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 *Thomas Baudisch*: Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 *Heinrich Schieferstein*: Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems  
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 *Joachim Berlak*: Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 *Christian Meierlohn*: Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung  
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 *Volker Weber*: Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 *Thomas Bongardt*: Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern  
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9
- 185 *Tim Angerer*: Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechanischer Produktkomponenten  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 *Alexander Krüger*: Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme  
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 *Matthias Meindl*: Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 *Thomas Fusch*: Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 *Thomas Mosandl*: Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 *Christian Patron*: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 *Robert Cisek*: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3

- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen  
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung  
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern  
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griechsch:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-6
- 211 **Klaus Schlickenrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrensbewegungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wunsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlintensins  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern  
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels  
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4

- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 244 **Georg Völlner:** Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte  
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilleistungsanforderung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung  
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage  
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schilp:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme  
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme  
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest  
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreißschweißen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik  
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung  
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen  
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Rad:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleoperation systems with heavy-duty teleoperators  
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreißschweißen von Rohren  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmelungsschweißen von Stählen  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbetriebenen Fertigung  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbetriebene 3D-Drucken  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5
- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Mar Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwingrad-Reißschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekou Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Esche:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden  
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6

- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen  
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathey Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4368-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung  
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahmert:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärrens  
128 Seiten - ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreißschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-4452-0
- 298 **Florian Karl:** Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4458-2
- 299 **Philipp Ronald Engelhardt:** System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-4472-8
- 300 **Markus Graßl:** Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4476-6
- 301 **Thomas Kirchmeier:** Methode zur Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess  
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4478-0
- 302 **Oliver Rösch:** Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4486-5
- 303 **Christoph Sieben:** Entwicklung eines Prognosemodells zur prozessbegleitenden Beurteilung der Montagequalität von Kolbendichtungen  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4510-7
- 304 **Philipp Alexander Schmidt:** Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4519-0
- 305 **Yi Shen:** System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4520-6
- 306 **Thomas Bonin:** Moderne Ordnungsreduktionsverfahren für die Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen  
274 Seiten - ISBN 978-3-8316-4522-0
- 307 **Jan Daniel Musiol:** Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden  
168 Seiten - ISBN 978-3-8316-4523-7
- 308 **Emin Genc:** Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-4525-1
- 309 **Mirko Langhast:** Beherrschung von Schweißverzug und Schweißbeanspruchungen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4524-2
- 310 **Markus Schweiher:** Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation  
284 Seiten - ISBN 978-3-8316-4536-7
- 311 **Florian Geiger:** System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4537-4
- 312 **Peter Schnellbach:** Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-4540-4
- 313 **Stefan Schwarz:** Prognosefähigkeit dynamischer Simulationen von Werkzeugmaschinenstrukturen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4542-8
- 314 **Markus Pröpster:** Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4547-3
- 315 **Dominik David Simon:** Automatisierte flexible Werkzeugsysteme zum Umformen und Spannen von Kunststoffscheiben und -schalen  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-4548-0
- 316 **Stefan Maurer:** Frühaufklärung kritischer Situationen in Versorgungsprozessen  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4554-1

- 317 **Tobias Maier:** Modellierungssystematik zur aufgabenbasierten Beschreibung des thermoelastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen  
274 Seiten · ISBN 978-3-8316-4561-9
- 318 **Klemens Konrad Niehues:** Identifikation linearer Dämpfungsmodelle für Werkzeugmaschinenstrukturen  
286 Seiten · ISBN 978-3-8316-4568-8
- 319 **Julian Christoph Sebastian Backhaus:** Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme  
264 Seiten · ISBN 978-3-8316-4570-1
- 320 **Sabine G. Zitzlsberger:** Flexibles Werkzeug zur Umformung von Polycarbonatplatten unter besonderer Beachtung der optischen Qualität  
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4573-2
- 321 **Christian Thiemann:** Methode zur Konfiguration automatisierter thermografischer Prüfsysteme  
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-4574-9
- 322 **Markus Westermeier:** Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen  
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4586-2





