



HERBERT UTZ VERLAG WISSENSCHAFT

FORSCHUNGSBERICHTE

322

Markus Westermeier

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

Markus Westermeier

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

Herbert Utz Verlag · München 2016

Forschungsberichte IWB
Band 322

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7243-1 Version: 1 vom 14.07.2016
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4586-2
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

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

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

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abkürzungen	V
Formelzeichen	VII
1 Einführung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Forschung	5
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
3	Konzeption der Methodik	45
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
4	Detaillierung der Methodik	69
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
5	Anwendung am Beispiel der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen	109
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

6	Zusammenfassung und Ausblick	151
6.1	Zusammenfassung der Arbeit	151
6.2	Ausblick	152
7	Literaturverzeichnis	155
8	Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten	169
9	Anhang	171
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
α	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.