

Christoph Nowacki

# Szenariobasierte Konfiguration der Produktmixflexibilität am Beispiel der Fertigung einer Lithium-Ionen-Batteriezelle



# Szenariobasierte Konfiguration der Produktmixflexibilität am Beispiel der Fertigung einer Lithium-Ionen-Batteriezelle

Von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christoph Reiner Nowacki

## **Berichter:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker

Tag der mündlichen Prüfung: 03. November 2015



# ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

**Christoph Nowacki**

Szenariobasierte Konfiguration der  
Produktmixflexibilität am Beispiel der  
Fertigung einer Lithium-Ionen-Batteriezelle

**Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 51/2015



**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Christoph Nowacki:

Szenariobasierte Konfiguration der Produktmixflexibilität am Beispiel der Fertigung einer Lithium-Ionen-Batterie zelle

1. Auflage, 2015

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2015  
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien  
an der RWTH Aachen  
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen  
Internet: [www.apprimus-verlag.de](http://www.apprimus-verlag.de), E-Mail: [info@apprimus-verlag.de](mailto:info@apprimus-verlag.de)

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-405-3

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Graduiertenkollegs Anlaufmanagement (DFG 1491/1).

Mein Dank gilt Herrn Professor Günther Schuh, Inhaber des Lehrstuhls für Produktionssystematik, für das Ermöglichen der Promotion sowie die Unterstützung, Förderung und das entgegengebrachte Vertrauen. Weiterhin danke ich in besonderem Maße Herrn Professor Achim Kampker, Inhaber des Lehrstuhls für Production Engineering of E-Mobility Components, für die Übernahme des Koreferats und die inhaltliche Betreuung der Arbeit. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Professor Dirk Abel und Herrn Professor Thomas Gries für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie des Prüfungsbeisitzes.

Diese Arbeit wäre nicht ohne den intensiven und anregenden Diskurs mit meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl sowie im Graduiertenkolleg Anlaufmanagement entstanden. Für die Möglichkeit, im Graduiertenkolleg forschen und promovieren zu dürfen, danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG. Darüber hinaus gilt mein Dank Doktor Peter Burggräf, Doktor Christoph Deutskens, Doktor Thomas Jasinski sowie Moritz Krunke, Kai Kreisköther und Tobias Welter für die freundschaftliche Zusammenarbeit am WZL und die konstruktive inhaltliche Diskussion dieser Arbeit. Ferner danke ich meinen studentischen Hilfskräften sowie Studien-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeitern für ihren Einsatz und ihre Unterstützung in allen Aufgabenbereichen am Lehrstuhl.

Über den mit der Promotion verbundenen Erkenntnisgewinn hinaus konnte ich durch meine Arbeit am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen unschätzbar wertvolle Erfahrungen in Theorie und Praxis sammeln. Das Umfeld aus Industrieberatung, Forschung, Lehre und Weiterbildung bot einen idealen Rahmen, um mich fachlich und auch persönlich auf meinen weiteren Werdegang vorzubereiten. Meine Zeit am Lehrstuhl wird immer eine prägende Erinnerung bleiben, für die ich sehr dankbar bin.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Besonders danke ich meiner verstorbenen Großmutter, meinen Eltern, meiner Tante, meinem Onkel sowie meinen beiden Geschwistern für ihre vorbehaltlose Unterstützung auf meinem bisherigen Lebensweg. Gerade meine Eltern gaben mir stets den notwendigen Rückhalt und vermittelten mir alle Fähigkeiten sowie den erforderlichen Optimismus, um diese Dissertation fertigzustellen. Ihnen widme ich diese Arbeit.

*Düsseldorf, im Dezember 2015*

*Christoph Nowacki*



# Inhaltsübersicht

<b>Inhaltsübersicht</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>Formelverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	6
1.3 Forschungskonzeption.....	8
1.4 Forschungsfrage .....	13
1.5 Aufbau der Arbeit.....	15
<b>2 Produktionssysteme im Spannungsfeld aus Scale und Scope</b> .....	<b>17</b>
2.1 Das Dilemma zwischen effizienter und individualisierter Produktion.....	17
2.2 Handlungsfelder im Spannungsfeld .....	35
2.3 Technologiekettenplanung zwischen Standardisierung und Flexibilität .....	48
<b>3 Die Lithium-Ionen-Batteriezellenproduktion als Fallbeispiel</b> .....	<b>63</b>
3.1 Grundlagen der Lithium-Ionen-Batterietechnologie .....	63
3.2 Herleitung der Anwendungsfälle zur Reflexion des Forschungsvorgehens.....	76
3.3 Zwischenfazit .....	83
<b>4 Ansätze für den Umgang mit varianzinduzierter Komplexität</b> .....	<b>85</b>
4.1 Übersicht bestehender Ansätze .....	85
4.2 Customer Value Management .....	87
4.3 Produktarchitekturgestaltung .....	93
4.4 Produktionsprozessgestaltung .....	100
4.5 Produktionsorganisation.....	104
4.6 Prozessstandardisierung und Flexibilität in Technologieketten.....	108
4.7 Zusammenfassung.....	123
<b>5 Konzept einer szenariobasierten Bestimmung des Flexibilitätsgrades</b> .....	<b>129</b>

---

5.1	Festlegung des Flexibilitätsgrades als unternehmerische Entscheidung .....	129
5.2	Konstituierender Rahmen der zu entwickelnden Methodik .....	137
5.3	Ableitung der Methodik zur Konfiguration spezifischer Flexibilitätsgrade .....	146
<b>6</b>	<b>Gestaltung des Flexibilitätsgrades in Technologieketten .....</b>	<b>153</b>
6.1	Quantifizierung des Kundenwerts von Produktmerkmalsvariationen .....	154
6.2	Analyse des potenziellen Wertbeitrags der Produktionsprozesse .....	163
6.3	Ableitung von Maßnahmen zur Konfiguration der Produktmixflexibilität .....	179
6.4	Kostenbewertung potenziell umzusetzender Gestaltungsmaßnahmen .....	195
6.5	Auswahl einer Flexibilitätskonfiguration .....	213
6.6	Ablauf der Methodik .....	221
<b>7</b>	<b>Anwendung und kritische Reflexion .....</b>	<b>223</b>
7.1	Überprüfung der Anwendbarkeit der Methodik .....	223
7.2	Fazit und kritische Reflexion der praktischen Anwendung .....	235
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>239</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>245</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>275</b>
10.1	Bestimmung der Zusammenhänge innerhalb der Produktarchitektur .....	275
10.2	Bestimmung der Zusammenhänge zwischen Produkt und Produktion .....	279

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsübersicht</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>Formelverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	6
1.3 Forschungskonzeption.....	8
1.3.1 Wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit .....	9
1.3.2 Forschungsmethodologisches Vorgehen .....	11
1.4 Forschungsfrage .....	13
1.5 Aufbau der Arbeit.....	15
<b>2 Produktionssysteme im Spannungsfeld aus Scale und Scope</b> .....	<b>17</b>
2.1 Das Dilemma zwischen effizienter und individualisierter Produktion .....	17
2.1.1 Produktionssysteme und Technologieketten.....	17
2.1.1.1 Begriffsverständnis und Grundlagen .....	17
2.1.1.2 Konfigurationsraum eines Produktionssystems .....	21
2.1.2 Ziele eines Produktionssystems im Dilemma aus Scale und Scope .....	23
2.1.2.1 Der Konflikt zwischen Economies of Scale und Economies of Scope.....	24
2.1.2.2 Zielgrößen eines Produktionssystems.....	26
2.1.3 Produkt- und Prozessvarianz in Produktionssystemen .....	28
2.1.3.1 Begriffsverständnis und Grundlagen .....	29
2.1.3.2 Auswirkungen der Varianz im Produktionssystem.....	30
2.2 Handlungsfelder im Spannungsfeld .....	35
2.2.1 Grundlagen zum Umgang mit varianteninduzierter Komplexität.....	35
2.2.1.1 Vermeidung von Komplexität.....	36
2.2.1.2 Reduzierung von Komplexität .....	38
2.2.1.3 Beherrschung von Komplexität .....	39

2.2.1.4	Szenariotechnik zur Prognose der Entwicklungen im Umfeld eines Produktionssystems .....	40
2.2.1.5	Integrierte Produkt- und Produktionsgestaltung .....	42
2.2.2	Handlungsfelder im Umgang mit varianteninduzierter Komplexität .....	43
2.2.2.1	Strategisches und operatives Variantenmanagement .....	45
2.2.2.2	Handlungsfelder der integrierten Produkt- und Produktionsgestaltung .....	46
2.3	Technologiekettenplanung zwischen Standardisierung und Flexibilität .....	48
2.3.1	Flexibilität versus Standardisierung .....	48
2.3.1.1	Begriffsverständnis und Grundlagen .....	48
2.3.1.2	Dimensionen und Arten der Flexibilität .....	51
2.3.1.3	Flexibilität und Standardisierung in Technologieketten .....	56
2.3.2	Wirkungen von Flexibilität und Standardisierung in Technologieketten .....	57
2.3.2.1	Auswirkungen der Flexibilität .....	57
2.3.2.2	Auswirkungen der Standardisierung .....	60
2.3.3	Bedarf einer integrierten und differenzierten Technologiekettenplanung .....	61
<b>3</b>	<b>Die Lithium-Ionen-Batteriezellenproduktion als Fallbeispiel .....</b>	<b>63</b>
3.1	Grundlagen der Lithium-Ionen-Batterietechnologie .....	63
3.1.1	Entwicklung automobiltauglicher Hochvoltspeichersysteme .....	64
3.1.1.1	Historische Entwicklung .....	64
3.1.1.2	Die Lithium-Ionen-Batterie als disruptive Technologie im Automobil .....	65
3.1.2	Funktionsprinzip und Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie .....	65
3.1.2.1	Funktionsprinzip einer Lithium-Ionen-Hochvoltbatteriezelle .....	65
3.1.2.2	Aufbau und Variationen einer Lithium-Ionen-Hochvoltbatterie .....	67
3.1.3	Produktionsprozesse einer Lithium-Ionen-Batteriezelle .....	69
3.1.4	Gründe für die Varianz in der Lithium-Ionen-Batteriezellenproduktion .....	75
3.2	Herleitung der Anwendungsfälle zur Reflexion des Forschungsvorgehens .....	76
3.2.1	Betrachtungsbereich der Anwendungsfälle .....	77
3.2.2	Differenzierungsrelevante Merkmale einer prismatischen Batteriezelle .....	79
3.2.3	Darstellung der zu betrachtenden Prozessschritte als Anwendungsfälle .....	80
3.2.3.1	Beschichtung der Elektroden .....	81
3.2.3.2	Zuschnitt der Elektroden .....	82
3.3	Zwischenfazit .....	83
<b>4</b>	<b>Ansätze für den Umgang mit varianzinduzierter Komplexität .....</b>	<b>85</b>
4.1	Übersicht bestehender Ansätze .....	85
4.2	Customer Value Management .....	87
4.2.1	Das Kano-Modell der Kundenanforderungen .....	88

---

4.2.2	Quality Function Deployment (QFD) nach AKAO .....	89
4.2.3	Markt- und kostenorientierte Variantenplanung nach KORRECK .....	90
4.2.4	Integriertes Variantenmanagement nach RATHNOW .....	91
4.2.5	Bewertung des Wirkungsgrades von Produktkomplexität nach NUBBAUM .....	92
4.2.6	Zwischenfazit zum Customer Value Management .....	93
4.3	Produktarchitekturgestaltung .....	93
4.3.1	Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten nach SCHUH .....	94
4.3.2	Variant Mode and Effects Analysis (VMEA) .....	95
4.3.3	Complexity Management Model nach MARTI .....	95
4.3.4	Ansätze der Modularisierung, Standardisierung und Baukastengestaltung .....	96
4.3.4.1	Modular Function Deployment (MFD) nach ERIXON und produktionsgerechte Modularisierung nach ABELE .....	96
4.3.4.2	Design for Variety (DFV) nach MARTIN .....	97
4.3.4.3	Strukturieren und Beurteilen von Baukastensystemen nach KOHLHASE .....	98
4.3.5	Produktarchitektur-Entwicklungsprozess (PAEP) .....	99
4.3.6	Zwischenfazit zur Produktarchitekturgestaltung .....	100
4.4	Produktionsprozessgestaltung .....	100
4.4.1	Prozessmodule nach AURICH .....	101
4.4.2	Gestaltung modularer Produktionssysteme nach NEUHAUSEN .....	101
4.4.3	Modular Plant Architecture (MPA) nach EVERSHEIM und SCHUH .....	102
4.4.4	Zwischenfazit zur Produktionsprozessgestaltung .....	104
4.5	Produktionsorganisation .....	104
4.5.1	Lean Production und das synchrone Produktionssystem (SPS) .....	104
4.5.2	Ganzheitliches Produktionssystem (GPS) .....	106
4.5.3	Globales Varianten-Produktionssystem (GVP) nach NYHUIS .....	107
4.5.4	Zwischenfazit zur Produktionsorganisation .....	108
4.6	Prozessstandardisierung und Flexibilität in Technologieketten .....	108
4.6.1	Quantifizierung der Flexibilität in Technologieketten .....	108
4.6.1.1	Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten nach HEGER .....	108
4.6.1.2	Planung modularer Fabriken nach WIENDAHL .....	110
4.6.1.3	Flexibilitätsbewertung nach DAS .....	111
4.6.1.4	Konstruktionsbegleitende Bewertung von Fertigungsfolgen nach TROMMER .....	112
4.6.1.5	Entwicklungsbegleitende Bewertung von Produktionsalternativen nach MÜLLER .....	113
4.6.1.6	Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung nach SCHUH .....	114
4.6.1.7	Messung der Maschinenflexibilität in Produktionssystemen nach WAHAB .....	115
4.6.1.8	Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung nach RÜHL .....	116
4.6.2	Gestaltung der Flexibilität in Technologieketten .....	117

4.6.2.1	Methoden der Technologieplanung nach KLOCKE und NAU .....	117
4.6.2.2	Wandlungsfähige Produktionsanlagen nach ZÄH .....	118
4.6.2.3	Wandlungsfähige, dezentrale Produktionsstrukturen nach DOHMS .....	119
4.6.2.4	Auswahl und Festlegung von Vorzugstechnologien nach GRÄBLER .....	120
4.6.2.5	Kostenoptimale und prozessstabile Fertigungsverkettungen nach WILLMS .....	121
4.6.2.6	Dedicated Flexibility nach GOTTSCHALK .....	122
4.6.3	Zwischenfazit zur Prozessstandardisierung und Flexibilisierung .....	123
4.7	Zusammenfassung .....	123
4.7.1	Defizite bestehender Ansätze hinsichtlich der Zielsetzung der Arbeit .....	123
4.7.2	Positionierung der Arbeit .....	127
<b>5</b>	<b>Konzept einer szenariobasierten Bestimmung des Flexibilitätsgrades .....</b>	<b>129</b>
5.1	Festlegung des Flexibilitätsgrades als unternehmerische Entscheidung .....	129
5.1.1	Ausgangssituation: Kosten- und Nutzenintransparenz der Flexibilität als Strukturdefizit der Produkt- und Prozessplanung .....	130
5.1.2	Hypothese: Kosten und Wertbeitrag der Produktmixflexibilität bestimmen den Grad an Produktmixflexibilität in einer Technologiekette .....	131
5.1.3	Lösungsansatz: Differenzierte Gestaltung der Produktmixflexibilität einer Technologiekette .....	133
5.1.4	Konzept: Szenariobasierte Konfiguration der Produktmixflexibilität als unternehmerische Entscheidung unter Unsicherheit .....	134
5.1.5	Effekt: Integrative Gestaltung von Produkt und Produktion .....	135
5.1.6	Zwischenfazit .....	136
5.2	Konstituierender Rahmen der zu entwickelnden Methodik .....	137
5.2.1	Zielsetzung der Methodik .....	137
5.2.2	Spezifische Anforderungen an die Methodik .....	138
5.2.2.1	Methodikentwicklung nach der System- und Modelltheorie .....	139
5.2.2.2	Quantifizierbarkeit und Modellierbarkeit des Nutzens und der Kosten von Flexibilität .....	140
5.2.2.3	Differenzierbarkeit der Flexibilität einer Technologiekette .....	140
5.2.3	Eingrenzungen des Betrachtungsbereichs und der Anwendbarkeit .....	141
5.2.3.1	Einordnung und Abgrenzung des Betrachtungsbereichs der Methodik .....	141
5.2.3.2	Anwendungsbedingte Eingrenzungen und Prämissen der Methodik .....	143
5.2.4	Einordnung der Methodik in die Produkt- und Produktionsplanung .....	145
5.2.5	Zwischenfazit .....	146
5.3	Ableitung der Methodik zur Konfiguration spezifischer Flexibilitätsgrade .....	146
5.3.1	Grobkonzept der Methodik .....	146
5.3.2	Zwischenfazit .....	151

---

<b>6</b>	<b>Gestaltung des Flexibilitätsgrades in Technologieketten</b>	<b>153</b>
6.1	Quantifizierung des Kundenwerts von Produktmerkmalsvariationen	154
6.1.1	Identifikation von Produktmerkmalen und potenziellen Ausprägungen	155
6.1.2	Qualitative Bewertung	156
6.1.3	Quantitative Bewertung	157
6.2	Analyse des potenziellen Wertbeitrags der Produktionsprozesse	163
6.2.1	Erfassung und Darstellung der Wirkzusammenhänge	164
6.2.2	Umsetzung der Produktmerkmale in der Produktarchitektur	167
6.2.2.1	Abhängigkeit von Produktmerkmalen zu Teilemerkmalen	168
6.2.2.2	Abhängigkeit von Teilemerkmalen zu Teilerkmalisdeterminanten	171
6.2.3	Prozesstechnische Umsetzung der Produktmerkmale	172
6.2.3.1	Abhängigkeit von Teilerkmalisdeterminanten zu Prozessparametern	172
6.2.3.2	Das Potenzial der Produktmixflexibilität als Einflussmöglichkeit der Prozessparameter	175
6.2.4	Wertbeitrag der Produktmixflexibilität in Technologieketten	176
6.3	Ableitung von Maßnahmen zur Konfiguration der Produktmixflexibilität	179
6.3.1	Identifikation von Gestaltungsmaßnahmen	181
6.3.1.1	Stellhebel zur Erweiterung der Produktmixflexibilität und ihre Implikationen	181
6.3.1.2	Maßnahmenkategorisierung nach Anpassungsumfang und Flexibilitätszuwachs	183
6.3.1.3	Zielwerte und Restriktionen potenziell umzusetzender Gestaltungsmaßnahmen	189
6.3.2	Erfassung des realisierten Wertbeitrags der Gestaltungsmaßnahmen	193
6.4	Kostenbewertung potenziell umzusetzender Gestaltungsmaßnahmen	195
6.4.1	Kostenwirkungen der Produktmixflexibilität	195
6.4.1.1	Einmalige Aufwendungen zur Implementierung einer Gestaltungsmaßnahme	196
6.4.1.2	Kontinuierliche Aufwendungen als Resultat gesteigerter Produktmixflexibilität	202
6.4.2	Quantifizierung der Kosten einer Gestaltungsmaßnahme	211
6.5	Auswahl einer Flexibilitätskonfiguration	213
6.5.1	Konfiguration der Produktmixflexibilität einer Technologiekette	214
6.5.1.1	Gegenüberstellung der Kosten und des Nutzens der Produktmixflexibilität	214
6.5.1.2	Wahl eines umzusetzenden Grades an Produktmixflexibilität	215
6.5.1.3	Entscheidung zwischen konkurrierenden Gestaltungsmaßnahmen	216
6.5.2	Gestaltung der Produktmixflexibilität als unternehmerische Entscheidung	216
6.5.2.1	Planungsszenarien für eine integrierte Produkt- und Prozessentwicklung	217
6.5.2.2	Kontextuelle Abhängigkeiten für die Auswahl einer Flexibilitätskonfiguration	220
6.6	Ablauf der Methodik	221
<b>7</b>	<b>Anwendung und kritische Reflexion</b>	<b>223</b>
7.1	Überprüfung der Anwendbarkeit der Methodik	223

---

7.1.1	Ausgangssituation .....	224
7.1.2	Bestimmung des potenziellen Wertbeitrags der Produktionsschritte .....	226
7.1.3	Identifikation und Bewertung von Flexibilisierungsmaßnahmen .....	229
7.1.3.1	Konfiguration der Beschichtungsanlage für die Elektroden der Zelle .....	229
7.1.3.2	Konfiguration der Schneidanlage für die Elektroden der Zelle .....	231
7.1.4	Auswahl des umzusetzenden Grades an Produktmixflexibilität .....	233
7.2	Fazit und kritische Reflexion der praktischen Anwendung .....	235
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>239</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>245</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>275</b>
10.1	Bestimmung der Zusammenhänge innerhalb der Produktarchitektur .....	275
10.2	Bestimmung der Zusammenhänge zwischen Produkt und Produktion .....	279

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Variantenausweitung und Variantenflexibilität .....	2
Abbildung 1-2: Wissenschaftssystematik .....	9
Abbildung 1-3: Heuristischer Bezugsrahmen der Arbeit .....	12
Abbildung 1-4: Aufbau der Arbeit .....	15
Abbildung 2-1: Struktur des Kapitels .....	17
Abbildung 2-2: Struktur eines Produktionssystems i.A.a. DYCKHOFF .....	18
Abbildung 2-3: Ebenen eines Produktionssystems .....	18
Abbildung 2-4: Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit .....	19
Abbildung 2-5: Technologie- und Prozessketten zur Herstellung eines Zahnrads .....	20
Abbildung 2-6: Konfigurationsraum eines Produktionssystems nach SCHUH .....	21
Abbildung 2-7: Produktpolitische Entscheidungen .....	22
Abbildung 2-8: Definition der Produktarchitektur nach GÖPFERT .....	22
Abbildung 2-9: Porter-Kurve .....	25
Abbildung 2-10: Leistungsziele eines Produktionssystems .....	26
Abbildung 2-11: Spannungsfelder eines Produktionssystems nach SCHUH .....	27
Abbildung 2-12: Strukturierung und Herleitung der relevanten Variantenbegriffe .....	29
Abbildung 2-13: Komplexitätskosten .....	32
Abbildung 2-14: Quersubventionierung zwischen Standardprodukten und Exoten .....	34
Abbildung 2-15: Strategische Stoßrichtungen des Variantenmanagements .....	35
Abbildung 2-16: Maßnahmen zur Vermeidung von Komplexität .....	36
Abbildung 2-17: Maßnahmen zur Reduzierung von Komplexität .....	38
Abbildung 2-18: Maßnahmen zur Beherrschung der Komplexität .....	39
Abbildung 2-19: Konstituierender Rahmen der Produkt- und Prozessgestaltung .....	44
Abbildung 2-20: Veränderungstypen eines Unternehmens nach WIENDAHL .....	49
Abbildung 2-21: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit nach NYHUIS .....	50
Abbildung 2-22: Differenzierung verschiedener Flexibilitätsarten .....	52
Abbildung 2-23: Produktionsflexibilität nach ABELE .....	54
Abbildung 2-24: Reale Flexibilität nach KALUZA .....	55
Abbildung 2-25: Typen der Standardisierung im Leistungserstellungsprozess .....	55
Abbildung 2-26: Standardisierung versus Flexibilität in einer Technologiekette .....	57
Abbildung 3-1: Struktur des Kapitels .....	63
Abbildung 3-2: Aufbau des Energiespeichers im Elektroauto .....	67
Abbildung 3-3: Aufbau verschiedener Batteriekonzepte .....	68
Abbildung 3-4: Grundlegende Prozessfolge in der Zellenfertigung .....	69
Abbildung 3-5: Mischen der Aktivmaterialien und Beschichten der Trägerfolien .....	70
Abbildung 3-6: Trocknen der Elektroden .....	71
Abbildung 3-7: Kalandrieren der Elektroden .....	71
Abbildung 3-8: Slitting bzw. Zuschneiden der Elektroden .....	72
Abbildung 3-9: Prozessfolge des Zusammenbaus einer prismatischen Batteriezelle .....	72
Abbildung 3-10: Wickeln der Jelly-Roll .....	72

Abbildung 3-11: Verschweißen der Ränder der Jelly-Roll und Verbinden der Ableiter.....	73
Abbildung 3-12: Isolieren der Jelly-Roll und Einführen in das Gehäuse.....	73
Abbildung 3-13: Formation der Zellen.....	74
Abbildung 3-14: Ausblick auf die technologische Entwicklung der Zellkomponenten.....	75
Abbildung 4-1: Struktur des Kapitels.....	85
Abbildung 4-2: Thematische Einordnung bestehender Ansätze.....	86
Abbildung 4-3: Bewertung des Wirkungsgrades von Produktkomplexität nach NUBBAUM.....	92
Abbildung 4-4: Strukturmaßnahmen nach ZÄH.....	119
Abbildung 4-5: Einstufung der Ansätze zur Bewertung und Konfiguration von Flexibilität.....	126
Abbildung 5-1: Struktur des Kapitels.....	129
Abbildung 5-2: Zielkonflikte zwischen Flexibilität und Standardisierung.....	130
Abbildung 5-3: Flexibilitätsgrad in einer Technologiekette.....	137
Abbildung 5-4: Anforderungen an die Methodik zur Konfiguration der Produktmixflexibilität.....	138
Abbildung 5-5: Einbindung der Methodik in die Produkt- und Produktionsentwicklung.....	145
Abbildung 5-6: Rahmen der Methodik zur Konfiguration der Produktmixflexibilität.....	147
Abbildung 6-1: Struktur des Kapitels.....	153
Abbildung 6-2: Ablauf des ersten Schritts der Methodik.....	154
Abbildung 6-3: Abbildung des vorläufigen Produktprogramms im Merkmalsbaum.....	155
Abbildung 6-4: Fragebogen zur bipolaren Befragung potenzieller Kunden.....	156
Abbildung 6-5: Ergebnismatrix zur Auswertung der bipolaren Befragung.....	157
Abbildung 6-6: Bestimmung des Umsatzbeitrags einer Produktmerkmalsausprägung.....	158
Abbildung 6-7: Ermittlung der relativen Häufigkeit einer Produktmerkmalsausprägung.....	158
Abbildung 6-8: Festlegung der Standardvariante.....	159
Abbildung 6-9: Ermittlung des Konkurrenzindex einer Produktmerkmalsausprägung.....	159
Abbildung 6-10: Kundenbefragung zur Ermittlung des Preisaufschlags.....	160
Abbildung 6-11: Rangfolge der Produktmerkmale und Produktmerkmalsausprägungen.....	163
Abbildung 6-12: Ablauf des zweiten Schritts der Methodik.....	163
Abbildung 6-13: Korrelationsmatrizen zur Darstellung der Abhängigkeiten.....	165
Abbildung 6-14: Zusammenhänge zwischen Produktmerkmal und Prozessparameter.....	166
Abbildung 6-15: Kantengewichtung im Graphen zur Quantifizierung der Beziehungsstärke.....	166
Abbildung 6-16: Produktmerkmale-Teilemerkmale-Korrelationsmatrix.....	168
Abbildung 6-17: Bewertungskriterien Produktmerkmal zu Teilemerkmal.....	170
Abbildung 6-18: Bewertungskriterien der Zusammenhänge in der Produktarchitektur.....	170
Abbildung 6-19: Teilemerkmale-Teilemerkmalsdeterminanten-Korrelationsmatrix.....	171
Abbildung 6-20: Teilemerkmalsdeterminanten-Prozessparameter-Korrelationsmatrix.....	172
Abbildung 6-21: Bewertungskriterien Teilemerkmalsdeterminante zu Prozessparameter.....	173
Abbildung 6-22: Bewertungskriterien der Schnittstelle von Produktarchitektur und Prozess.....	174
Abbildung 6-23: Berechnung des Wertbeitrags der Prozessparameter einer Technologiekette.....	179
Abbildung 6-24: Ablauf des dritten Schritts der Methodik.....	180
Abbildung 6-25: Ausnutzen bestehender Flexibilitätskorridore der Prozesse.....	184
Abbildung 6-26: Prozessweiterung mittels flexiblerer oder mehrerer Werkzeuge.....	185
Abbildung 6-27: Neukonfiguration der Prozessschritte.....	185
Abbildung 6-28: Neukonfiguration oder Rekonfiguration der Technologiekette.....	186
Abbildung 6-29: Substitution von Prozessschritten in einer Technologiekette.....	186

---

Abbildung 6-30: Einsatz alternativer oder ergänzender Fertigungsmittel.....	187
Abbildung 6-31: Kategorisierung von Maßnahmen zur Ausweitung der Produktmixflexibilität.....	188
Abbildung 6-32: Verbindungen zwischen Prozessparametern und Produktmerkmalen .....	190
Abbildung 6-33: Wertbeitrag einer Maßnahme $i$ zur Konfiguration der Produktmixflexibilität .....	194
Abbildung 6-34: Ablauf des vierten Schritts der Methodik .....	195
Abbildung 6-35: Potenzielle Implementierungskosten einer Flexibilisierungsmaßnahme .....	196
Abbildung 6-36: Gliederung der Herstellkosten in Anlehnung an EHRENSPIEL.....	203
Abbildung 6-37: Zusammensetzung Maschinenstundensatz nach MÜLLER i.A.a WARNECKE.....	206
Abbildung 6-38: Kostenwirkungen einer Gestaltungsmaßnahme $i$ für eine Planungsperiode $t$ .....	211
Abbildung 6-39: Ablauf des fünften Schritts der Methodik.....	214
Abbildung 6-40: Kategorisierung von Gestaltungsmaßnahmen nach ihrem Nettonutzen .....	215
Abbildung 6-41: Szenariobasierte Bestimmung des Nettonutzens einer Gestaltungsmaßnahme .....	218
Abbildung 6-42: Szenariobasierte Auswahl des Grades an Produktmixflexibilität .....	219
Abbildung 7-1: Struktur des Kapitels.....	223
Abbildung 7-2: Zu gestaltende Batteriezelle und Produktionsprozesse des Fallbeispiels.....	224
Abbildung 7-3: Ausgewählte Merkmalsausprägungen und Konfiguration der Anlagen .....	234
Abbildung 10-1: Gesamtkantengewichtung einer Abhängigkeit in der Produktarchitektur .....	278

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Produktmerkmale einer prismatischen Lithium-Ionen-Batteriezele .....	79
Tabelle 3-2:	Komponenten und Teilemerkmale prismatischer Lithium-Ionen-Batteriezellen .....	80
Tabelle 3-3:	Parameter zur Beschreibung des Beschichtungsprozesses der Elektroden .....	81
Tabelle 3-4:	Parameter zur Beschreibung des Schneidprozesses der Elektroden .....	82
Tabelle 6-1:	Realisierbare Wertbeiträge einer Merkmalsausprägung $PM_{m-n}$ je Periode $t$ .....	162
Tabelle 6-2:	Beispiel zur Definition von Zielwerten für einen Prozessparameter .....	191
Tabelle 6-3:	Beispielhafte Maßnahmen zur Umsetzung verschiedener Parameterbereiche .....	192
Tabelle 6-4:	Periodisch anfallende Kosten einer Flexibilisierungsmaßnahme .....	213
Tabelle 6-5:	Einflüsse auf den tendenziell zu installierenden Grad an Produktmixflexibilität ...	220
Tabelle 7-1:	Potenziell umzusetzende Produktmerkmalsvariationen im Fallbeispiel .....	225
Tabelle 7-2:	Bestimmung der Gesamtwertbeiträge der Produktmerkmalsausprägungen .....	225
Tabelle 7-3:	Beziehungen zwischen Produktmerkmalen und Teilemerkmalen .....	226
Tabelle 7-4:	Beziehungen zwischen Teilemerkmalen und Teilemerkmalsdeterminanten .....	227
Tabelle 7-5:	Beziehungen zwischen Teilemerkmalsdeterminanten und Prozessparametern .....	228
Tabelle 7-6:	Bestimmung des potenziellen Wertbeitrags der Prozessparameter .....	228
Tabelle 7-7:	Maßnahmen zur Variation des Volumenstroms des Slurries .....	230
Tabelle 7-8:	Maßnahmen zur Variation der Spalthöhe des Zuflusses des Slurries .....	230
Tabelle 7-9:	Maßnahmen zur Variation der Spaltbreite des Zuflusses des Slurries .....	230
Tabelle 7-10:	Potenzielle Wertbeiträge der Maßnahmen für die Elektrodenbeschichtung .....	231
Tabelle 7-11:	Erwartete Gesamtkosten der Maßnahmen für die Elektrodenbeschichtung .....	231
Tabelle 7-12:	Maßnahmen zur Variation der Schnittbreite des Elektrodenzuschnitts .....	232
Tabelle 7-13:	Potenzielle Wertbeiträge der Maßnahmen für den Elektrodenzuschnitt .....	232
Tabelle 7-14:	Erwartete Gesamtkosten der Maßnahmen für den Elektrodenzuschnitt .....	233
Tabelle 7-15:	Übersicht der aggregierten Maßnahmen und ihrer Gesamtkosten .....	233
Tabelle 7-16:	Übersicht der nach Nettonutzen geordneten Gestaltungsmaßnahmen .....	234
Tabelle 10-1:	Funktionale Beziehungen in der Produktarchitektur .....	275
Tabelle 10-2:	Physikalische Wirkmechanismen in der Produktarchitektur .....	276
Tabelle 10-3:	Geometrische Wirkmechanismen in der Produktarchitektur .....	277
Tabelle 10-4:	Stoffliche Wirkmechanismen in der Produktarchitektur .....	278
Tabelle 10-5:	Fertigungsverfahren des Urformens und ausgewählte Parameter (I) .....	279
Tabelle 10-6:	Fertigungsverfahren des Urformens und ausgewählte Parameter (II) .....	280
Tabelle 10-7:	Fertigungsverfahren des Umformens und ausgewählte Parameter .....	281
Tabelle 10-8:	Fertigungsverfahren des Trennens und ausgewählte Parameter (I) .....	282
Tabelle 10-9:	Fertigungsverfahren des Trennens und ausgewählte Parameter (II) .....	283
Tabelle 10-10:	Fertigungsverfahren des Fügens und ausgewählte Parameter (I) .....	284
Tabelle 10-11:	Fertigungsverfahren des Fügens und ausgewählte Parameter (II) .....	285
Tabelle 10-12:	Fertigungsverfahren des Beschichtens und ausgewählte Parameter .....	286
Tabelle 10-13:	Fertigungsverfahren des Stoffeigenschaftenänderns u. ausgewählte Parameter .....	287

## Formelverzeichnis

Formel 6-1:	Wertbeitrag WB einer Produktmerkmalsausprägung $PM_{m-n}$ .....	161
Formel 6-2:	Erwartete Menge verkaufter Produkte mit Ausprägung $PM_{m-n}$ pro Periode .....	161
Formel 6-3:	Kapitalwert der Wertbeiträge einer Produktmerkmalsausprägung $PM_{m-n}$ .....	162
Formel 6-4:	Realisierbarer Gesamtwertbeitrag eines Produktmerkmals $PM_m$ .....	162
Formel 6-5:	Summe eingehender Kantengewichtungen für $PM_m, TM_m, TD_m$ .....	177
Formel 6-6:	Wertbeitrag einer eingehenden starken Beeinflussung in $PM_m, TM_m, TD_m$ .....	177
Formel 6-7:	Wertbeitrag einer eingehenden mittleren Beeinflussung in $PM_m, TM_m, TD_m$ .....	177
Formel 6-8:	Wertbeitrag einer eingehenden schwachen Beeinflussung in $PM_m, TM_m, TD_m$ .....	177
Formel 6-9:	Gesamter Wertbeitrag eines Teilemerkmals $TM_n$ .....	178
Formel 6-10:	Gesamter Wertbeitrag einer Teilemerkmalsdeterminante $TD_n$ .....	178
Formel 6-11:	Gesamter Wertbeitrag eines Prozessparameters $PP_n$ .....	178
Formel 6-12:	Gesamtwertbeitrag als Kapitalwert einer Gestaltungsmaßnahme $i$ .....	194
Formel 6-13:	Kosten einer Anpassung der Werkzeuge in Fertigungsressourcen .....	197
Formel 6-14:	Kosten einer Anpassung der Komponenten von Fertigungsressourcen .....	198
Formel 6-15:	Kosten alternativer, zusätzlicher oder redundanter Fertigungsressourcen .....	198
Formel 6-16:	Kosten einer Anpassung der Komponenten sonstiger Betriebsmittel .....	199
Formel 6-17:	Kosten alternativer, zusätzlicher oder redundanter sonstiger Betriebsmittel .....	199
Formel 6-18:	Kosten einer Anpassung der Informations- und Medienversorgung .....	200
Formel 6-19:	Kosten einer Anpassung der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) .....	200
Formel 6-20:	Installations- und Inbetriebnahmekosten einer Gestaltungsmaßnahme $i$ .....	201
Formel 6-21:	Aus Gestaltungsmaßnahme $i$ resultierende Personalkosten .....	201
Formel 6-22:	Aus Gestaltungsmaßnahme $i$ resultierende sonstige einmalige Aufwendungen .....	202
Formel 6-23:	Fertigungslohnkosten für eine Technologiekette bzw. Fertigungsfolge .....	205
Formel 6-24:	Ressourcenbezogene Fertigungskosten eines Erzeugnisses .....	207
Formel 6-25:	Betriebsmittelzeit einer Ressource $n$ zur Herstellung von $m$ Erzeugniseinheiten ..	207
Formel 6-26:	Potenzielle einmalige Kosten einer Gestaltungsmaßnahme $i$ in Periode $t$ .....	212
Formel 6-27:	Entstehende Herstellkosten durch Gestaltungsmaßnahme $i$ in Periode $t$ .....	212
Formel 6-28:	Gesamtkosten einer Gestaltungsmaßnahme $i$ .....	213
Formel 6-29:	Nutzenüberschuss als Nettonutzen einer Gestaltungsmaßnahme $i$ .....	215

## Abkürzungen

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V.
Aufl.	Auflage
Bd.	Band
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CEN	Comité Européen de Normalisation (französisch)
CI	Coupling Index (englisch)
DEA	Data Envelopment Analysis (englisch)
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.
DFV	Design for Variety (englisch)
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
ebd.	ebenda
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EK	Einmalige Kosten
eLab	Elektromobilitätslabor
EN	Europäische Norm
engl.	englisch
et al.	et alii
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
e. V.	eingetragener Verein
EV	Electric Vehicle (englisch)
f.	folgende
ff.	fortfolgende
FFS	Flexibles Fertigungssystem
FLK	Fertigungslohnkosten
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (englisch)
ggf.	gegebenenfalls
GK	Gesamtkosten
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPS	Ganzheitliches Produktionssystem
GVI	Generational Variety Index (englisch)
GVP	Globales Varianten-Produktionssystem
Hg.	Herausgeber
HoQ	House of Quality (englisch)
i. A. a.	in Anlehnung an
i. d. R.	in der Regel

---

IEC	International Electrotechnical Commission (englisch)
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung und -entwicklung
inkl.	inklusive
ISO	International Organization for Standardization (englisch)
IT	Informationstechnik
IuM	Informations- und Medienversorgung
Jg.	Jahrgang
Kap.	Kapitel
KI	Konkurrenzindex
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MAK	Maschinenkosten
MEK	Materialeinzelkosten
MFD	Modular Function Deployment (englisch)
MGK	Materialgemeinkosten
Mio.	Million
MK	Materialkosten
MPA	Modular Plant Architecture (englisch)
Mrd.	Milliarde
NN	Nettonutzen
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
Nr., #	Nummer
NRW	Nordrhein-Westfalen
o. V.	ohne Verfasser
PAEP	Produktarchitektur-Entwicklungsprozess
PAS	Publicly Available Specifications (englisch)
PM	Produktmerkmal(sausprägung)
PP	Prozessparameter
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PSM	Produktionsstrukturmatrix
QFD	Quality Function Deployment (englisch)
RF GK	Restfertigungsgemeinkosten
RPK	Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
S.	Seite(n)
SEI	Solid Electrolyte Interphase (englisch)
SEK	Sondereinzelkosten der Fertigung
SOP	Start of Production (englisch)
Sp.	Spalte(n)
SPS	Synchrones Produktionssystem
Stk.	Stück
TD	Teilemerkmalsdeterminanten
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TM	Teilemerkmal

---

TPM	Total Productive Maintenance (englisch)
TQC	Total Quality Control (englisch)
TQM	Total Quality Management (englisch)
u.	und
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
vgl.	vergleiche
VMEA	Variant Mode and Effects Analysis (englisch)
WB	Wertbeitrag
WFI	Wandlungsfähigkeitsindex
WZL	Werkzeugmaschinenlabor
z.B.	zum Beispiel
%	Prozent

# 1 Einleitung

Die Erkenntnis, dass produzierende Unternehmen mit einem immer dynamischeren und differenzierteren Marktumfeld konfrontiert sind und sich in einem verschärften Wettbewerb abheben müssen, ist nicht neu. Dennoch fällt es vielen Unternehmen insbesondere in Hochlohnländern zunehmend schwerer, das Dilemma aus gleichzeitig wachsendem Kostendruck und Differenzierungsdruck zu bewältigen und eine geeignete Positionierung ihrer Produktionssysteme zu finden.<sup>1</sup> Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur initialen Konfiguration eines Produktionssystems als Bestandteil des Anlaufmanagements im Spannungsfeld aus Economics of Scale und Scope und liefert einen Ansatz für eine szenariobasierte Festlegung des Grades an Produktmixflexibilität entlang einer Technologiekette im Rahmen einer integrierten Produkt- und Prozessentwicklung.

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen in Hochlohnländern hängt davon ab, technologisch anspruchsvolle Produkte kundenindividuell herstellen und in der geforderten Qualität zügig auf den Markt bringen zu können. Neue und innovative Technologien erscheinen in immer kürzer werdenden Zeitabständen, sodass sich Produktlebenszyklen und Innovationszyklen reduzieren und die technologische Unsicherheit für Unternehmen steigt. Mit der steigenden Anzahl an Produkteinführungen steigen auch die Anzahl der Produktanläufe und damit die Anzahl an Störungen der betrieblichen Abläufe. Auch die Komplexität der Produkte nimmt stetig zu. Gleichzeitig wächst jedoch der Zeitdruck für deren Markteinführung. Des Weiteren wird der Markt aufgrund schwankender Nachfragezahlen und Auswirkungen globaler Krisen immer unkalkulierbarer. Auf den zunehmend gesättigten Absatzmärkten verändert sich das Nachfrageverhalten kontinuierlich. Steigende Funktionalitätsanforderungen und individuellere Kundenanforderungen führen zu diversifizierten Produktstrukturen und einer Vielzahl an Produkt- und Prozessvarianten im Unternehmen. Die Produktion muss sich ständig wechselnden Marktanforderungen flexibel und reaktionsschnell anpassen. Gleichzeitig müssen Produktionsabläufe immer effizienter werden, um einem wachsenden Kostendruck zu begegnen.<sup>2</sup>

In einer von SCHUH durchgeführten Studie bestätigten bspw. 86% der befragten Unternehmen einen wachsenden Differenzierungsanspruch hinsichtlich ihres Produktportfolios aufgrund einer zunehmen-

---

<sup>1</sup> Vgl. Kampker et al. (2014) – Assessment and Configuration, S. 147 ff.; Schuh et al. (2013) – Flexibilität trotz hoher Variantenvielfalt, S. 16 ff.

<sup>2</sup> Vgl. u.a. Wiendahl, Hernández (2002) – Fabrikplanung im Blickpunkt, S. 133; Wiendahl (2006) – Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld, S. 183; Nofen (2006) – Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse, S. 1; Nofen et al. (2005) – Bedeutung der Wandlungsfähigkeit, S. 8 f.; Záh et al. (2004) – Erhöhung der Wandlungsfähigkeit, S. 173; Schuh et al. (2008) – Grundlagen des Anlaufmanagements, S. 1; Heger (2007) – Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten, S. 1; Nußbaum (2011) – Bewertung des Wirkungsgrades von Produktkomplexität, S. 1; Westkämper, Zahn (2009) – Wandlungsfähige Produktionsunternehmen, S. V; Nyhuis et al. (2010) – Wandlungsfähigkeit, S. 4; Schuh et al. (2008) – Individualisierte Produktion, S. 285 f.; Schuh (2005) – Produktkomplexität managen, S. 9; Stecher, Müller (2002) – Innovationswettbewerb, S. 247; Hernández (2003) – Systematik der Wandlungsfähigkeit, S. 2 ff.; Schenk, Wirth (2004) – Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, S. 3 u. S. 11 f.; Heinen et al. (2008) – Wandlungsfähigkeit, S. 21; Nyhuis et al. (2009) – Wandlungsfähige Produktionssysteme, S. 205

den Internationalisierung. 66% der Befragten gaben an, ihre Produkte gezielt den neuen Märkten anpassen zu müssen.<sup>3</sup> Die Resultate der in Abbildung 1-1 dargestellten Befragung bestätigen die generell steigende Variantenzahl sowie die zunehmende Bedeutung der Variantenflexibilität über verschiedene Branchen hinweg. Ein anderes anschauliches Beispiel des in den letzten Jahren stark gestiegenen Differenzierungsanspruchs für produzierende Unternehmen liefert die Entwicklung der in Deutschland verfügbaren Fahrzeugmodelle. In dem Zeitraum zwischen 1995 und 2015 hat sich die Anzahl der Fahrzeugmodelle mit einem Anstieg von 230 auf 420 verfügbarer Modellreihen nahezu verdoppelt.<sup>4</sup> Gleichzeitig belegen zahlreiche Studien der letzten Jahre in verschiedenen Branchen die Bedeutung des zunehmenden Preis- und Kostendrucks auf produzierende Unternehmen als zentrale Herausforderung einer nachhaltigen Wettbewerbsfähigkeit.<sup>5</sup>

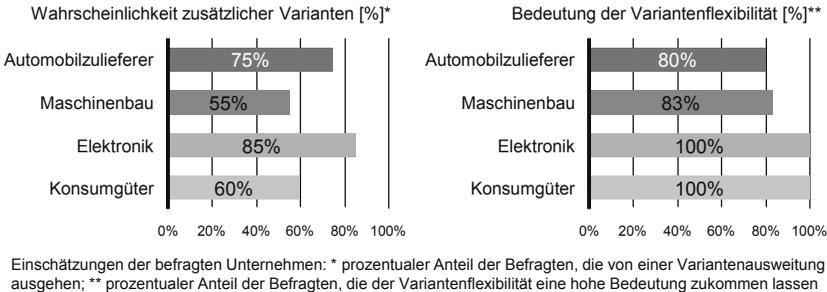


Abbildung 1-1: Variantenausweitung und Variantenflexibilität<sup>6</sup>

Wissenschaft und Industrie suchen schon länger nach Auswegen aus diesem Dilemma. So sind die Lean Production Prinzipien mittlerweile jedem Unternehmen ein Begriff und werden häufig auch gewinnbringend angewendet. Jedoch stehen viele Unternehmen noch immer vor dem Problem, die geforderte Variantenvielfalt mit einer kostengünstigen Produktion zu vereinen.<sup>7</sup> Zur Wettbewerbssicherung versuchen Unternehmen, den wachsenden individuellen Kundenbedürfnissen mit einer Differenzierung des Leistungsangebotes zu begegnen. Die damit einhergehende Ausweitung der Produkt- und Leistungsvariation verursacht jedoch nicht nur einen Anstieg der Produktkomplexität, sondern auch einen unkontrollierten Anstieg der Komplexität in den Prozessen nahezu aller Unternehmensbereiche.<sup>8</sup> Das turbulente Umfeld der industriellen Produktion erfordert jedoch eine schnelle und permanente Anpassungs-

<sup>3</sup> Vgl. Schuh (2007) – Effizient, schnell und erfolgreich, S. 12

<sup>4</sup> Vgl. Schade et al. (2012) – Zukunft der Automobilindustrie, S. 138 u. S. 147

<sup>5</sup> Vgl. z.B. Deloitte Research (2005) – Unlocking the value of globalization; Roland Berger (2012) – 4th Operations Efficiency Radar; Kerkhoff Consulting GmbH (2010) – Strategische Herausforderungen für den Einkauf

<sup>6</sup> I.A.a. Lanza et al. (2010) – Monetäre Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen, S. 530 ff. u. S. 535; Lanza et al. (2009) – Bewertung von Stückzahl- und Variantenflexibilität, S. 1039 f. u. S. 1043 ff.: Ziel der Befragung war die Einschätzung der Wahrscheinlichkeit einer Variantenausweitung in der Zukunft und der Bedeutung der Variantenflexibilität durch verschiedene Industrieunternehmen unterschiedlicher Branchen.

<sup>7</sup> Vgl. Kampker et al. (2014) – Assessment and Configuration, S. 147 ff.; Schuh et al. (2013) – Flexibilität trotz hoher Variantenvielfalt, S. 16 ff.

<sup>8</sup> Vgl. Schuh (2005) – Produktkomplexität managen, S. 9 f. u. S. 13 f.; Schuh et al. (2008) – Individualisierte Produktion, S. 285 f.; Westkämper (2009) – Turbulentes Umfeld, S. 11; Nußbaum (2011) – Bewertung des Wirkungsgrades von Produktkomplexität, S. 1

und Veränderungsfähigkeit im Produktionssystem.<sup>9</sup> Zugleich führt ein Anstieg der Produktvarianz zu einem Rückgang der Produktionszahlen einzelner Varianten des Produktprogramms, sodass sich die Mengendegressionseffekte in der Produktion reduzieren.<sup>10</sup> Schon PORTER beschrieb die Gefahr, sich bei dem Versuch der simultanen Realisierung von Economies of Scale und Scope in einer nicht eindeutigen Wettbewerbsstrategie zu verirren.<sup>11</sup> So überlagert der grundlegende Konflikt zwischen dem Streben nach Spezialisierungsvorteilen und Mengenvorteilen die klassischen Ziele eines Produktionssystems aus Zeit-, Qualitäts- und Kostenzielen.<sup>12</sup>

Grundsätzlich stehen zur Entschärfung des Konflikts aus Economies of Scale und Scope Handlungsfelder der Produkt- und Produktionsgestaltung zur Verfügung. Für die Produktgestaltung existieren verschiedene Ansätze zur Modularisierung, Standardisierung und Baukastengestaltung, die eine flexible Produktarchitektur zur Erfüllung individueller Kundenwünsche mit einem möglichst hohen Anteil an standardisierten Bauteilen oder Komponenten umsetzen sollen. Auch in der Produktionsgestaltung finden diese Ansätze bspw. in der Modularisierung von Betriebsmitteln oder der Gestaltung von Prozessbaukästen Anwendung, um eine flexible Produktionsstruktur mit möglichst einheitlichen Produktionsabläufen zu vereinen. Zusätzlich existieren verschiedene Konzepte der Produktionsorganisation und Produktionssteuerung für die Beherrschung eines variantenreichen Produktprogramms in der Produktion. All diese Ansätze liefern wichtige Hilfsmittel im Umgang mit varianteninduzierter Komplexität. Sie adressieren jedoch häufig nur isoliert entweder die Produkt- oder die Produktionsebene und berücksichtigen die internen und externen Wirkzusammenhänge eines Produktionssystems nicht ausreichend.<sup>13</sup>

Zum einen fehlen Ansätze für eine integrative Abstimmung zwischen Produkt und Produktion, die die Abhängigkeiten zwischen Produktarchitektur und Produktionsstruktur ausreichend erfassen können.<sup>14</sup> So gilt bspw. als zentraler Hebel zur Erzielung von Mengendegressionseffekten in der Produktion die Standardisierung möglichst vieler Produktkomponenten oder Baugruppen, um den Anteil an Gleichteilen zu erhöhen. Eine Erhöhung der Anzahl an Gleichteilen durch eine Eingrenzung der Produktarchitekturflexibilität bietet jedoch erst dann einen Vorteil für die Auslegung der Produktionsprozesse und Produktionsressourcen, wenn dadurch auch varianzanfällige Produktionsprozesse standardisiert werden können. Umgekehrt bewirken flexible Produktionsprozesse erst dann einen wirklichen Mehrwert, wenn sie dazu beitragen, eine vom Kunden gewünschte Produktvariante herstellen zu können. Zum anderen lässt sich mittels bestehender Ansätze die Dynamik der externen Einflüsse auf ein Produktionssystem in der Gestaltung von Produktarchitektur und Produktionsstruktur nur unzureichend berücksichtigen.<sup>15</sup>

---

<sup>9</sup> Vgl. Lindemann, Baumberger (2006) – Individualisierte Produkte, S. 7; Westkämper (2008) – Fabriken sind komplexe langlebige Systeme, S. 86; Wiendahl, Hernández (2002) – Fabrikplanung im Blickpunkt, S. 133 f.

<sup>10</sup> Vgl. Firchau (2003) – Variantenoptimierende Produktgestaltung, S. 1; Westkämper (2006) – Einführung in die Organisation der Produktion, S. 16 f.

<sup>11</sup> Vgl. Porter (1980) – Competitive strategy, S. 41 f.

<sup>12</sup> Vgl. Brecher et al. (2011) – Integrative Produktionstechnik, S. 21 f. u. S. 28 f.; Wiendahl (2011) – Auftragsmanagement der industriellen Produktion, S. 13; Westkämper (2006) – Einführung in die Organisation der Produktion, S. 68 f.; Westkämper (2008) – Fabriken sind komplexe langlebige Systeme, S. 94

<sup>13</sup> Vgl. Schuh et al. (2013) – Flexibilität trotz hoher Variantenvielfalt, S. 16 ff.; Schuh et al. (2011) – Integrative Assessment and Configuration of Production Systems, S. 457 ff.; Kampker et al. (2014) – Assessment and Configuration, S. 147 ff.; Kampker et al. (2012) – Cost innovations, S. 431 ff.

<sup>14</sup> Vgl. Schuh et al. (2011) – Integrative Assessment and Configuration of Production Systems, S. 457 ff.; Kampker et al. (2012) – Cost innovations, S. 431 ff.

<sup>15</sup> Vgl. Ehrlenspiel (1995) – Integrierte Produktentwicklung, S. 150 ff.; Schuh et al. (2011) – Individualisierte Produktion, S. 87 ff.; Nußbaum (2011) – Bewertung des Wirkungsgrades von Produktkomplexität, S. 116 ff.; Schuh et al. (2011) – Integrative Assessment and Configuration of Production Systems, S. 457 ff.

Es fehlt die Möglichkeit, die Vielfältigkeit der potenziellen Entwicklungen im Umfeld eines Produktionssystems und die resultierende Bandbreite der Einflussgrößen auf die Produkt- und Produktionsgestaltung systematisch zu erfassen und zu quantifizieren.<sup>16</sup>

Um initiativ im Vorfeld eines Produktionsanlaufs gezielt ein Maß an Flexibilität für die Produktion festlegen zu können, müssen die Effekte der Flexibilität einzelner Produktionsprozesse als Nutzen- und Kostenwirkungen in den verschiedenen Gestaltungsfeldern eines Produktionssystems dargestellt und unter Berücksichtigung der externen Einflüsse auf ein Produktionssystem bewertet werden.<sup>17</sup> In diesem Zusammenhang bedarf es zum einen einer systematischen Abbildung der Zusammenhänge zwischen antizipierter Produktvarianz, Produktarchitektur und Prozessvarianz in der Produktion. Zum anderen müssen die unsicheren künftigen Entwicklungen in einem Produktionssystem und insbesondere in dessen Umfeld als Szenarien in der Bewertung der Nutzen- und Kostenwirkungen der Flexibilität berücksichtigt werden. Somit könnten die Anforderungen aus der Produktion stärker und differenzierter in der Produktprogramm- und Produktgestaltung berücksichtigt werden. Gleichzeitig könnte die Produktionsstruktur speziell auf die Erzeugung der vom Kunden gewünschten Produktvarianz ausgelegt werden.<sup>18</sup>

Jedoch lassen sich Nutzen und Kosten der Flexibilität bisher nicht unmittelbar vergleichen. Die Abhängigkeiten zwischen den Elementen eines Produktionssystems können nicht zureichend dargestellt werden. Weiterhin beeinflussen die dynamischen Einflüsse auf ein Produktionssystem sowohl den zukünftigen Nutzen als auch die zu erwartenden Kosten der Flexibilität.<sup>19</sup> Könnten die zukünftigen Entwicklungen im Umfeld eines Produktionssystems vorhergesagt oder zumindest eingegrenzt werden und könnten weiterhin die Abhängigkeiten zwischen den Elementen eines Produktionssystems quantifiziert werden, so könnten im Rahmen einer integrativen Produkt- und Produktionsgestaltung die Produktprogrammvielfalt und der Grad an Flexibilität in Produktarchitektur und Produktionsstruktur nach Nutzen und Aufwand festgelegt und aufeinander abgestimmt werden. So ließe sich das Risiko einer Über- oder Untererfüllung des Flexibilitätsbedarfs in der Produktion für die Zukunft eingrenzen.<sup>20</sup>

Insbesondere vor dem Hintergrund einer zunehmenden Anzahl an Produktneueinführungen oder Produktrekonfigurationen und der damit steigenden Anzahl an Produktionsanläufen ist es erstrebenswert, die voneinander abhängigen Gestaltungsobjekte eines Produktionssystems (wie Technologien, Produkt-

---

<sup>16</sup> Vgl. Kampker et al. (2012) – Cost innovations, S. 431 ff.; Kampker et al. (2014) – Assessment and Configuration, S. 147 ff.; Schuh et al. (2013) – Flexibilität trotz hoher Variantenvielfalt, S. 20

<sup>17</sup> Vgl. Große-Heitmeyer, Wiendahl (2004) – Einführung, S. 10; Wemböner (2006) – Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau, S. 75; Ost (1993) – Entwicklung eines Verfahrens zur differenzierten Flexibilitätsanalyse und -bewertung, S. 85 f.; Nyhuis et al. (2009) – Wandlungsfähige Produktionssysteme, S. 209 f.; Schuh et al. (2011) – Individualisierte Produktion, S. 88 f.; Schuh et al. (2011) – Integrative Assessment and Configuration of Production Systems, S. 458; Lanza et al. (2009) – Bewertung von Stückzahl- und Variantenflexibilität, S. 1039; Schuh et al. (2013) – Flexibilität trotz hoher Variantenvielfalt, S. 16 ff.; Kampker et al. (2012) – Cost innovations, S. 431 ff.; Wachter (2006) – Kundenwert aus Kundensicht, S. 2 ff.; Schuh (2005) – Produktkomplexität managen, S. 26 u. S. 36

<sup>18</sup> Vgl. Schuh et al. (2011) – Individualisierte Produktion, S. 84 ff.; Schuh et al. (2011) – Integrative Assessment and Configuration of Production Systems, S. 457 ff.

<sup>19</sup> Vgl. Kampker et al. (2012) – Cost innovations, S. 431 ff.; Schuh et al. (2013) – Flexibilität trotz hoher Variantenvielfalt, S. 16 ff.; Kampker et al. (2014) – Assessment and Configuration, S. 147 ff.

<sup>20</sup> Vgl. Kampker et al. (2012) – Cost innovations, S. 431 ff.; Grunwald (2002) – Flexible integrierte Produktentwicklung und Montageplanung, S. 38 ff.; Kampker et al. (2014) – Assessment and Configuration, S. 147 ff.; Ehrlenspiel (1995) – Integrierte Produktentwicklung, S. 150 f.

programm, Produktarchitektur, Produktionsprozesse und Personalressourcen) im Vorfeld eines Produktionsanlaufs aufeinander abzustimmen.<sup>21</sup> So kann zum einen die Beherrschbarkeit des Produktionsanlaufs verbessert werden und die Komplexität dieser Phase merklich eingegrenzt werden. Zum anderen können durch die Abstimmung des Grades an Flexibilität in der Produktarchitektur und Produktionsstruktur hinsichtlich einer antizipierten, vom Kunden gewünschten und honorierten Produktprogrammvielfalt die Umfänge und möglicherweise auch die Anzahl der Produktionsanläufe beschränkt werden.<sup>22</sup>

Ein Beispiel für die Potenziale einer integrierten Produkt- und Prozessentwicklung zur Beschränkung des Zielkonflikts zwischen Flexibilität und Standardisierung liefert die sich im Aufbau befindende Produktion von Elektrofahrzeugen und deren Komponenten. Neben den technischen und organisatorischen Herausforderungen stellen insbesondere die hohen Herstellungskosten ein wesentliches Hemmnis für eine erfolgreiche Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen dar.<sup>23</sup> Der durchschnittliche Preis der zurzeit auf dem Markt erhältlichen Fahrzeuge ist mit einem bis zu hundertprozentigen Zuschlag im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen nicht wettbewerbsfähig. Dabei machen die Kosten des elektrischen Lithium-Ionen-Hochvoltspeichersystems den größten Anteil an den Mehrkosten aus.<sup>24</sup> Aufgrund der unsicheren Marktentwicklung, der spezifischen Anforderungen aus der Automobilindustrie und der verschiedenen Technologien wird es für die nächsten Jahre schwierig sein, die Vielzahl an unterschiedlichen Hochvoltspeichersystemen einzugrenzen und Skaleneffekte für die Gestaltung der Produktionstechnik zu erzielen. Sowohl für die Automobilindustrie als auch für den Maschinen- und Anlagenbau besteht die Gefahr, technologische Exoten zu verfolgen. Dennoch müssen Produktionskonzepte für eine Serienproduktion entwickelt werden, um die zukünftig geforderten Stückzahlen zu marktfähigen Preisen anbieten zu können. Die Herausforderung liegt entsprechend darin, möglichst flexible Produktionsprozesse für verschiedene künftige Anwendungen mit einer möglichst kosteneffizienten und einheitlichen Anlagentechnik abzubilden. Um diesen Konflikt zu entschärfen, bedarf es einer abgestimmten Entwicklung der Produkttechnologie und Produktionstechnologie.<sup>25</sup> Diesbezüglich erweist sich die mangelnde Marktreife der Hochvoltspeichertechnologie jedoch auch gleichzeitig als Vorteil. Da sich

---

<sup>21</sup> Vgl. Schuh et al. (2008) – Grundlagen des Anlaufmanagements, S. 406; Schmitt et al. (2010) – Interdisziplinäres Anlaufmanagement, S. 318; Almgren (1999) – Pilot production and manufacturing startup, S. 14 f.; Tücks (2010) – Ramp-Up Management in der Automobilindustrie, S. 2; Gross, Renner (2010) – Coordination and Cooperation during Production, S. 5; Wiesinger, Housein (2002) – Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten, S. 505; Kampker et al. (2011) – Fabrikplanung der Zukunft, S. 321

<sup>22</sup> Vgl. Lanza (2005) – Simulationsbasierte Anlaufunterstützung, S. 19 f.; Dombrowski, Hanke (2009) – Lean Ramp-up, S. 877; Heina (1999) – Variantenmanagement, S. 16; Fritsche (1998) – Bewertung und Verkürzung von Anlaufprozessen, S. 17; Schuh (2005) – Produktkomplexität managen, S. 14; Lösch (2001) – Controlling der Variantenvielfalt, S. 40; Tücks (2010) – Ramp-Up Management in der Automobilindustrie, S. 2

<sup>23</sup> Vgl. Kampker et al. (2012) – Cost innovations, S. 431 ff.; Kampker et al. (2013) – Integrated Product and Factory Design for Lithium-Ion Batteries, S. 65 ff.

<sup>24</sup> Vgl. Heymann et al. (2011) – Elektromobilität, S. 6; McKinsey & Company (2011) – Boost! Transforming the powertrain value chain, S. 6; Kampker et al. (2012) – Networked product and production development for lithium-ion batteries, S. 215; Böcker et al. (2010) – Elektrofahrzeuge, S. 44; Leonhard et al. (2008) – Energiespeicher in Stromversorgungssystemen, S. 86

<sup>25</sup> Vgl. Kampker et al. (2013) – Integrated Product and Factory Design for Lithium-Ion Batteries, S. 65 ff.; Kampker et al. (2012) – Networked product and production development for lithium-ion batteries, S. 215; Klink et al. (2012) – Überspannung im Batteriemarkt für Elektrofahrzeuge, S. 5

für die Lithium-Ionen-Batterie als disruptive Technologie<sup>26</sup> weder Produkttechnologien noch Produktionstechnologien etabliert haben, bieten sich für deren Entwicklung Freiheitsgrade, die eine weitestgehend restriktionsfreie Abstimmung der Produktstruktur und Produktionstechnologie erlauben.<sup>27</sup>

Es zeigt sich, dass in Wissenschaft und Praxis zwar einige Ansätze und Bemühungen bestehen, die den Konflikt zwischen dem Streben nach Spezialisierungsvorteilen und Mengenvorteilen im Rahmen der Produktgestaltung, Produktionsgestaltung oder einer integrierten Produkt- und Produktionsgestaltung adressieren. Jedoch bedarf es geeigneter Konzepte und Methoden für eine differenzierte Abstimmung der Flexibilität auf Produkt- und Prozessebene unter Berücksichtigung der externen dynamischen Einflüsse auf ein Produktionssystem, um weitere Potenziale bezüglich einer simultanen Produktdifferenzierung und Generierung von Kosteneinsparungen in der Produktion auszuschöpfen.<sup>28</sup>

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Dissertation liefert einen wissenschaftlichen Beitrag zur Zielsetzung des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Graduiertenkollegs Anlaufmanagement.<sup>29</sup> Das an der RWTH Aachen ansässige Graduiertenkolleg behandelt den Produktionsanlauf als multidimensionale, interdisziplinäre und hochgradig interdependente Problemstellung, welche darin besteht, innerhalb einer komplexen Organisationsstruktur eine Vielzahl von Entscheidungen zu treffen. Ziel des Kollegs ist es daher, in einem interdisziplinären Kontext Entscheidungsmodelle für die unterschiedlichen Phasen des Produktionsanlaufs zu entwickeln. Die Zielsysteme der Entscheidungsfindung stellen die Schnittstelle zwischen den Ingenieur- und den Wirtschaftswissenschaften dar. Einerseits werden technologische Systeme, andererseits wird das Verhalten von Menschen und Organisationen in der Steuerung solcher Systeme betrachtet.<sup>30</sup>

Das leitende Motiv dieser Arbeit ist die Unterstützung produzierender Unternehmen im Bereich einer variantenreichen Serienfertigung bei der Entschärfung des Zielkonflikts zwischen der Erfüllung individueller Kundenwünsche mittels eines breiten Produktprogramms und der gleichzeitigen Umsetzung einer möglichst effizienten und kostengünstigen Fertigung. Ansatzpunkt hierfür ist die integrierte Gestaltung von Produkt und Produktion als initialer Bestandteil des Anlaufmanagements. Um die Auswirkungen der Artvarianz eines Produktprogramms in der Produktion einzudämmen, wird eine Methodik zur szenariobasierten Konfiguration des Grades an Produktmixflexibilität in Technologieketten auf Basis einer differenzierten Gegenüberstellung des Nutzens und der Kosten der Produktmixflexibilität entwickelt.

---

<sup>26</sup> Vgl. Christensen (1997) – The Innovator’s Dilemma, S. 15: Der Begriff einer disruptiven Technologie wurde von CHRISTENSEN geprägt, um eine neue Technologie zu beschreiben, die unerwartet eine bereits etablierte Technologie vom Markt verdrängt und ablöst. Er definiert eine disruptive Innovation als ein Produkt oder eine Dienstleistung, die nicht in Form einer verbesserten, sondern einer ganz neuen Technologie für ein neues Kundensegment auf den Markt kommt.

<sup>27</sup> Vgl. Kampker et al. (2013) – Integrated Product and Factory Design for Lithium-Ion Batteries, S. 65 ff.; Kampker et al. (2012) – Networked product and production development for lithium-ion batteries, S. 215 ff.

<sup>28</sup> Vgl. Kampker et al. (2012) – Cost innovations, S. 431 ff.; Schuh et al. (2011) – Integrative Assessment and Configuration of Production Systems, S. 457 ff. u. S. 461; Schuh et al. (2013) – Flexibilität trotz hoher Variantenvielfalt, S. 16 ff.

<sup>29</sup> Förderkennzeichen: DFG 1491/1

<sup>30</sup> Vgl. Schmitt et al. (2010) – Interdisziplinäres Anlaufmanagement, S. 322

Voraussetzung für die Gegenüberstellung des Nutzens und der Kosten der Produktmixflexibilität sind deren Quantifizierbarkeit und Zurechenbarkeit. In der Planung von Produkt und Produktion ist zu entscheiden, welcher Grad an Flexibilität an welcher Stelle einer Technologiekette notwendig bzw. möglich ist, um die Kundenbedürfnisse hinsichtlich der Produktprogrammvielfalt zu befriedigen und gleichzeitig die Produkt- und Prozessvielfalt kostenseitig beherrschen zu können.<sup>31</sup> Dazu sind die Implikationen der Flexibilität in einem Produktionssystem sowohl aus Kundensicht (Produktsicht) als auch aus Produktionssicht zu bewerten und abzuwägen.<sup>32</sup> Produktionsprozesse, für die die Ausweitung der Flexibilität einen hohen Anstieg der Kosten verursacht, sollten unter Kostengesichtspunkten möglichst standardisiert bzw. wenig flexibel gestaltet werden. Hingegen sollten aus Nutzensicht diejenigen Produktionsprozesse möglichst flexibel gestaltet werden, die eine vom Kunden wahrgenommene und honorierte Varianz erzeugen.<sup>33</sup> Der Nutzen der Produktmixflexibilität eines Produktionsprozesses in einer Technologiekette lässt sich also durch dessen Beitrag zur Erzeugung einer vom Kunden wahrgenommenen und honorierten Produktvielfalt ausdrücken. Der Aufwand, der für eine Ausweitung der Flexibilität eines Prozessschrittes notwendig ist, setzt sich aus einmaligen und laufenden Kosten in der Produktion zusammen, die durch eine Flexibilitätserweiterung verursacht werden.<sup>34</sup>

Wären die Kosten- und Nutzenwirkungen einer Flexibilitätsanpassung in einer Technologiekette für die verschiedenen Produktionsprozesse über die Wirkzusammenhänge eines Produktionssystems bekannt, besäßen Unternehmen eine bessere Basis, um die am Markt anzubietende Produktprogrammvielfalt und die Konfiguration ihrer Technologieketten aufeinander abzustimmen.<sup>35</sup> Die Kosten einer Flexibilitätserweiterung könnten für verschiedene Prozesse differenziert gegen den Wert zusätzlich erzeugbarer Produktvarianten als Nutzen aufgewogen werden. Im Rahmen einer integrierten Produkt- und Prozessgestaltung ließen sich somit die Flexibilität der Produktionsprozesse und die Produktprogrammvielfalt gemeinsam konfigurieren. Konkurrierende Möglichkeiten zur Gestaltung der Flexibilität entlang einer Technologiekette könnten unmittelbar untereinander verglichen werden.<sup>36</sup>

Allerdings unterliegt die Bewertung der Auswirkungen der Flexibilität in einer Technologiekette gewissen kontextuellen Abhängigkeiten. So bestimmen unternehmensexterne oder auch unternehmensinterne Einflussgrößen wie die Marktsituation, die Branche oder die Unternehmensstrategie längerfristig

---

<sup>31</sup> Vgl. Schuh et al. (2011) – Individualisierte Produktion, S. 84; Brecher et al. (2011) – Integrative Produktionstechnik, S. 29

<sup>32</sup> Vgl. Schuh et al. (2013) – Flexibilität trotz hoher Variantenvielfalt, S. 16 ff.; Kampker et al. (2012) – Cost innovations, S. 431 ff.

<sup>33</sup> Vgl. Schuh et al. (2013) – Flexibilität trotz hoher Variantenvielfalt, S. 19 f.

<sup>34</sup> Vgl. Firchau (2003) – Variantenoptimierende Produktgestaltung, S. 35; Schuh et al. (2011) – Individualisierte Produktion, S. 103

<sup>35</sup> Vgl. Große-Heitmeyer, Wiendahl (2004) – Einführung, S. 10; Wemhöner (2006) – Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau, S. 75; Lanza et al. (2010) – Monetäre Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen, S. 530; Nußbaum (2011) – Bewertung des Wirkungsgrades von Produktkomplexität, S. 1; Schuh et al. (2011) – Individualisierte Produktion, S. 84 ff.; Nyhuis et al. (2009) – Wandlungsfähige Produktionssysteme, S. 209 f.; Schuh et al. (2011) – Integrative Assessment and Configuration of Production Systems, S. 457 f.; Ehrmann (1999) – Logistik, S. 383; Schuh et al. (2013) – Flexibilität trotz hoher Variantenvielfalt, S. 16 ff.; Heina (1999) – Variantenmanagement, S. 1; Chang et al. (2003) – Manufacturing flexibility and business strategy, S. 13 f.

<sup>36</sup> Vgl. Schuh (2005) – Produktkomplexität managen, S. 259; Ost (1993) – Entwicklung eines Verfahrens zur differenzierten Flexibilitätsanalyse und -bewertung, S. 85; Lanza et al. (2009) – Bewertung von Stückzahl- und Variantenflexibilität, S. 1039; Heina (1999) – Variantenmanagement, S. 1; Schuh et al. (2008) – Individualisierte Produktion, S. 287 ff.

oder kurzfristig die spezifische Gewichtung der Nutzen- und Kostenwirkungen der Flexibilität.<sup>37</sup> Weiterhin unterliegen die Effekte der Flexibilität spezifischen technischen Restriktionen. Die Flexibilität entlang einer Technologiekette lässt sich prinzipiell nicht beliebig steigern, sodass das Potenzial einer Technologiekette zur Herstellung verschiedener Produktvarianten immer eine anwendungsfallsspezifische Grenze aufweist.<sup>38</sup> Auch sind die Wirkungen der Flexibilität zeitbehaftet, weil die Nutzenwirkungen und auch die Kostenwirkungen eines installierten Flexibilitätspotenzials aufgrund einer gewissen Verzögerungszeit nicht unmittelbar vollständig nachweisbar sind.<sup>39</sup> Da nach derzeitigem Wissensstand physikalische Gesetzmäßigkeiten Zeitreisen maximal theoretisch zulassen<sup>40</sup>, bedarf es im Vorfeld eines Produktionsanlaufs also der Antizipation eines zukünftigen Zustandes eines Produktionssystems, um Nutzen- und Kostenwirkungen der Flexibilität einer Technologiekette a priori quantifizieren und bewerten zu können. Aufgrund der Volatilität der externen und internen Einflussgrößen eines Produktionssystems, die den kontextuellen Zusammenhang für die Konfiguration des Flexibilitätsgrades einer Technologiekette bestimmen, weist die Beurteilung der Kosten-Nutzen-Relation der Flexibilität für einen künftigen Betrachtungszeitraum immer eine gewisse Unsicherheit auf.<sup>41</sup> So erscheint es sinnvoll, verschiedene Szenarien für künftig mögliche Zustände eines Produktionssystems herzuleiten und zu betrachten. Eine Methodik zur Bestimmung des Flexibilitätsgrades sollte daher, adaptierbar an verschiedene zukünftige Entwicklungen und kontextuelle Zusammenhänge, die Beurteilung unterschiedlicher Szenarien ermöglichen. Entsprechend kann die Zielsetzung dieser Arbeit wie folgt formuliert werden:

Ziel ist die Entwicklung einer heuristischen Vorgehensweise zur kontextabhängigen Konfiguration des Grades an Produktmixflexibilität in einer Technologiekette im Rahmen einer integrierten Produkt- und Prozessgestaltung auf Basis einer Kosten- und Nutzenabschätzung für verschiedene Szenarien eines antizipierten zukünftigen Zustands eines Produktionssystems.

Zur Absicherung der formulierten Zielsetzung wird die Anwendbarkeit der in dieser Arbeit zu entwickelnden Methodik am Beispiel der Gestaltung einer Technologiekette für die Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen demonstriert und erprobt.

### 1.3 Forschungskonzeption

Um die erlangten Erkenntnisse und erarbeiteten Ergebnisse eines Forschungsprozesses für Außenstehende intersubjektiv begreifbar zu machen, ist es zunächst erforderlich, sowohl die grundlegende Erkenntnisperspektive als auch das methodologische Vorgehen des Forschungsprozesses zu beschreiben.<sup>42</sup> Die grundlegende Erkenntnisperspektive beinhaltet erste Prinzipien, auf die sich die Arbeit stützt.

<sup>37</sup> Vgl. Nyhuis et al. (2009) – Wandlungsfähige Produktionssysteme, S. 205 ff.; Heina (1999) – Variantenmanagement, S. 13 ff.; Bartuschat (1995) – Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt, S. 8 f. u. S. 19 ff.; Fiebig (2012) – Die flexible Fabrik, S. 38

<sup>38</sup> Vgl. Bellmann (2005) – Flexibilisierung der Produktion, S. 157 f.; Brecher et al. (2011) – Integrative Produktionstechnik, S. 29

<sup>39</sup> Vgl. Hopfmann (1989) – Flexibilität im Produktionsbereich, S. 39 f.; Behrbohm (1985) – Flexibilität in der industriellen Produktion, S. 210; Bunz (1988) – Strategieunterstützungsmodelle für Montageplanungen, S. 44

<sup>40</sup> Vgl. Hawking (1992) – Chronology protection conjecture, S. 603 ff.

<sup>41</sup> Vgl. Nyhuis et al. (2009) – Wandlungsfähige Produktionssysteme, S. 209 f.; Lanza et al. (2009) – Bewertung von Stückzahl- und Variantenflexibilität, S. 1039; Chang et al. (2003) – Manufacturing flexibility and business strategy, S. 14; Hernández (2003) – Systematik der Wandlungsfähigkeit, S. 3; Ost (1993) – Entwicklung eines Verfahrens zur differenzierten Flexibilitätsanalyse und -bewertung, S. 85; Bartuschat (1995) – Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt, S. 8

<sup>42</sup> Vgl. Binder, Kantowsky (1996) – Technologiepotentiale, S. 3

Diese Prinzipien sind jedoch nicht weiter begründbar und daher als grundlegend zu akzeptieren.<sup>43</sup> Die Erläuterung der grundlegenden Erkenntnisperspektive erfolgt in Kapitel 1.3.1 mit der wissenschaftstheoretischen Einordnung der Arbeit. Das forschungsmethodologische Vorgehen dieser Arbeit beschreibt die gewählte Vorgehensweise zur Gewinnung von Erkenntnissen. Es existiert prinzipiell eine Vielzahl an Forschungsmethodologien. Die Wahl eines adäquaten forschungsmethodologischen Vorgehens wird durch die Einordnung des Forschungsvorhabens in das Spektrum der Wissenschaft und den zugrunde gelegten Forschungsansatz bestimmt (Kapitel 1.3.2).

### 1.3.1 Wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit

ULRICH und HILL schlagen die Einteilung der Wissenschaft in die Formal- und Realwissenschaft vor (vgl. Abbildung 1-2).<sup>44</sup> Die beiden Stränge unterscheiden sich hinsichtlich Untersuchungsgegenstand, Forschungsmethodik und Zielsetzung. Formale Systeme bilden den Untersuchungsgegenstand der Formalwissenschaften (auch Idealwissenschaften). Die Realwissenschaften (auch Erfahrungswissenschaften) hingegen betrachten reale Sachverhalte.<sup>45</sup>

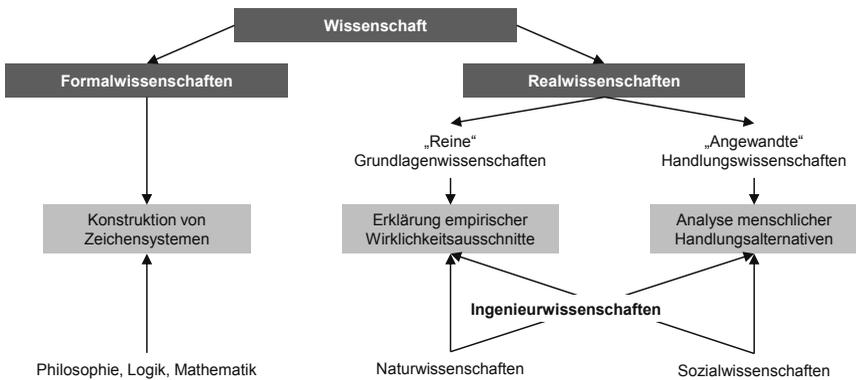


Abbildung 1-2: Wissenschaftssystematik<sup>46</sup>

Die Formalwissenschaften, zu denen bspw. die Mathematik und die Philosophie gehören, verfolgen das Ziel, Zeichensysteme zu konstruieren und Regeln zu deren Verwendung zu entwickeln.<sup>47</sup> Da sich Formalwissenschaften nicht auf tatsächlich existierende Objekte beziehen, beschränkt sich die Prüfung der Richtigkeit ihrer Aussagen allein auf die Suche nach logischen Widersprüchen.<sup>48</sup>

Die Realwissenschaften lassen sich in reine Grundlagenwissenschaften und in angewandte Handlungswissenschaften einteilen.<sup>49</sup> Generell zielen die Realwissenschaften darauf ab, wahrnehmbare

<sup>43</sup> Vgl. Guba, Lincoln (1994) – Competing paradigms in qualitative research, S. 107  
<sup>44</sup> Vgl. Ulrich, Hill (1976) – Wissenschaftstheoretische Grundlagen (Teil I), S. 305  
<sup>45</sup> Vgl. Baßeler et al. (2002) – Grundlagen und Probleme der Volkswirtschaft, S.1  
<sup>46</sup> I.A.a. Ulrich, Hill (1976) – Wissenschaftstheoretische Grundlagen (Teil I), S. 305  
<sup>47</sup> Vgl. Ulrich, Hill (1976) – Wissenschaftstheoretische Grundlagen (Teil I), S. 305  
<sup>48</sup> Vgl. Schanz (1987) – Grundfragen der Führungsforschung, Sp. 2039 ff.  
<sup>49</sup> Vgl. Ulrich, Hill (1976) – Wissenschaftstheoretische Grundlagen (Teil I), S. 305