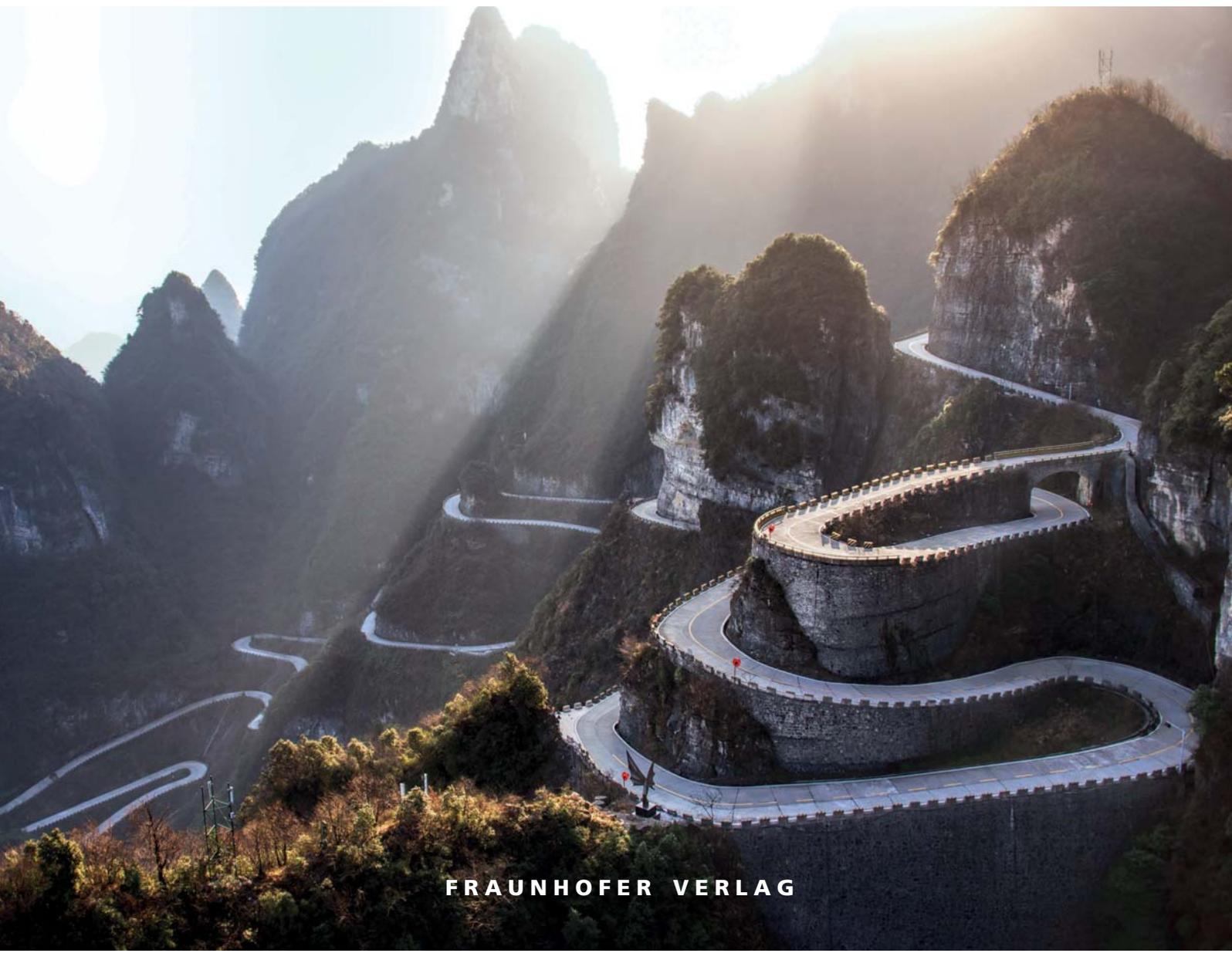


TIM HETTESHEIMER

STRATEGISCHE PRODUKTIONSPLANUNG IN JUNGEN MÄRKTEN

EIN SYSTEMDYNAMISCHER ANSATZ ZUR KONZEPTION UND DYNAMISCHEN BEWERTUNG
VON PRODUKTIONSSTRATEGIEN AM BEISPIEL DER LITHIUM-IONEN-TRAKTIONSBATTERIE



Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Tim Hettesheimer

Strategische Produktionsplanung in jungen Märkten

Ein systemdynamischer Ansatz zur Konzeption und dynamischen Bewertung von Produktionsstrategien am Beispiel der Lithium-Ionen-Traktionsbatterie

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Telefon 07 21 68 09-0
Telefax 07 21 689152
E-Mail info@isi.fraunhofer.de
URL www.isi.fraunhofer.de

D 90

Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2017

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.

ISBN: 978-3-8396-1275-0

Titelbild: [©shutterstock.com/kikujungboy/Fraunhofer ISI](https://www.shutterstock.com/kikujungboy/Fraunhofer%20ISI)

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2017

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Strategische Produktionsplanung in jungen Märkten
—
Ein systemdynamischer Ansatz zur Konzeption und dynamischen
Bewertung von Produktionsstrategien am Beispiel der
Lithium-Ionen-Traktionsbatterie

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Tim Hettesheimer

Tag der mündlichen Prüfung:	12.01.2017
Referent:	Prof. Dr. Frank Schultmann
Korreferent:	Prof. Dr. Martin Wietschel

Für
Ava & Ilsa

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner beruflichen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI in Karlsruhe entstanden und wurde am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktionswirtschaft und Logistik (IIP) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) betreut. Nach erfolgreicher Fertigstellung dieser Arbeit möchte ich nun die Möglichkeit nutzen, mich bei all jenen zu bedanken, die mich im Laufe der Erstellung unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt hierbei meinem Doktorvater Prof. Dr. Frank Schultmann für seine Bereitschaft zur Betreuung dieser Arbeit, die wertvollen Ratschläge und das stets vertrauensvolle Betreuungsverhältnis. Zudem möchte ich mich ausdrücklich bei Prof. Dr. Martin Wietschel für die Übernahme des Koreferats sowie die vielfältige Unterstützung im Rahmen und auch außerhalb dieser Arbeit bedanken. Mein Dank geht auch an Prof. Dr. Hagen Lindstädt und Prof. Dr. Maxim Ulrich für ihr Mitwirken im Prüfungskollegium.

Meinen beiden Mentoren Dr. Christian Lerch und Prof. Dr. Marcus Schröter möchte ich für die wichtigen Impulse in den verschiedenen Phasen dieser Arbeit sowie die Diskussionen, Denkanstöße und motivierenden Worte meine tiefe Wertschätzung und meinen Dank aussprechen. In diesem Kontext möchte ich mich auch bei Dr. Simon Hirzel für die vielen Gespräche und Diskussionen zum Thema multikriterielle Bewertung bedanken. Dr. Clemens Rohde danke ich dafür, dass er mir auch bei größter Projektlast Freiräume für die Erstellung dieser Dissertation ermöglicht hat. Meinen Kolleginnen Kerstin Kopf, Bärbel Katz und Renate Schmitz gilt mein Dank für das Gegenlesen dieser Arbeit und die Unterstützung bei allerlei kleinen und großen Problemen. Meinen Kolleginnen und Kollegen vom Fraunhofer ISI danke ich für die gute und konstruktive Arbeitsatmosphäre, in der ich diese Arbeit schreiben durfte – insbesondere meinem Büronachbarn Cornelius Moll sowie Dr. Katharina Mattes und Prof. Matthias Gotsch. Ebenso danke ich meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen Dr. Sabine Biege, Prof. Christoph Zanker, Prof. Steffen Kinkel, Dr. Oliver Kleine, Prof. Oliver Som und Dr. Ute Weißfloch. Für die manchmal nötige Ablenkung vom Doktorandenschreibtisch danke ich Sebastian Fuchs, Tobias Schmitt, Steffen Schütz sowie Cleo und Greta Heil.

Letztlich möchte ich meiner Familie herzlich danken: meinem Onkel Prof. Dr. Edwin Hettesheimer, dass er in mir das Interesse für den Weg der Promotion geweckt hat und meiner Schwester Diana für das ausdauernde Korrekturlesen dieser Arbeit. Meine tiefempfundene Dankbarkeit gilt auch meinen Eltern Petra und Karl für ihre stets bedingungslose Unterstützung. Dieses Vertrauen war und ist mir ein großer Rückhalt.

Mein letzter und größter Dank gilt meiner jungen Familie. Dass ich diese Arbeit letztlich fertigstellen konnte, verdanke ich meiner Partnerin Manuela. Sie hat mir stets Rückhalt gegeben und durch ihren Zuspruch und ihre Teilhabe hat sie einen bedeutenden Anteil an dieser Arbeit. Meinen beiden Mädels Ava und Ilsa – ihr wart meine liebste Ablenkung und zeitgleich größte Motivation beim Verfassen dieser Dissertation. Diese Arbeit widme ich euch.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Lösungsweg	6
2	DIE LITHIUM-IONEN-BATTERIE IM SPANNUNGSFELD DER ELEKTROMOBILITÄT	11
2.1	Rahmenbedingungen der Elektromobilität und Implikationen für die LiB.....	11
2.1.1	Sozio-kulturelle Rahmenbedingungen	12
2.1.2	Ökologische Rahmenbedingungen	13
2.1.3	Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen.....	15
2.1.4	Ökonomische Rahmenbedingungen	18
2.1.5	Technologische Rahmenbedingungen.....	22
2.2	Branchenstruktur und -dynamik im jungen Markt der LiB	26
2.2.1	Eigenschaften von jungen Märkten.....	26
2.2.2	Der Markt für LiB	29
2.2.3	Produktionsstandorte von LiB	30
2.2.4	Produktionskapazitäten.....	31
2.2.5	Produzierte Produkttechnologie	33
2.2.6	Ausgestaltung der Wertschöpfungstiefe	34
2.2.7	Zwischenfazit	36
3	STAND DER TECHNIK.....	39
3.1	Stand der Produkttechnik	39
3.1.1	Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen Batterie	39
3.1.2	Batterietechnologien und deren Eignung für die Elektromobilität	41
3.1.3	Die Lithium-Ionen-Batterie: Zellchemie, -geometrie und Ausblick	43
3.1.4	Aufbau und zentrale Komponenten eines Batteriesystems.....	48
3.2	Stand der Prozesstechnik	49
3.2.1	Herstellungsprozess einer LiB.....	49
3.2.2	Elektrodenfertigung.....	51
3.2.2.1	Mischen	51
3.2.2.2	Beschichten	52
3.2.2.3	Kalandern	52
3.2.2.4	Schneiden	53
3.2.2.5	Trocknen.....	53
3.2.3	Zellassemblierung.....	53
3.2.3.1	Stapeln.....	54

3.2.3.2	Zellableiter schweißen	54
3.2.3.3	Verpacken, Elektrolytbefüllung und Versiegeln	54
3.2.3.4	Formation, Aging und Test	55
3.2.4	Modulfertigung	56
3.2.5	Batteriesystemfertigung	56
3.2.6	Einfluss von Batteriegröße und Produktionsmenge auf die Investitionen	57
4	GRUNDLAGEN DER STRATEGISCHEN PRODUKTIONSPLANUNG	59
4.1	Die Produktion aus systemischer Sicht	59
4.1.1	Die Rolle des Produktionsmanagements	62
4.1.2	Prozess der strategischen Planung	64
4.1.3	Die Produktionsstrategie als Gestaltungsrahmen für das Produktionssystem	73
4.1.3.1	Technologiestrategie	75
4.1.3.2	Strategie der Fertigungstiefe	76
4.1.3.3	Kapazitätsstrategie	79
4.1.3.4	Standortstrategie	81
4.2	Implikationen für die strategische Produktionsplanung auf jungen Märkten am Beispiel der LIB	84
4.2.1	Implikationen für die strategische Analyse.....	85
4.2.2	Implikationen für die Strategieformulierung.....	87
4.2.3	Implikationen für die Strategiebewertung und -auswahl.....	89
5	KONZEPTION UND ENTWICKLUNG EINER PLANUNGSMETHODIK	91
5.1	Anforderungen an eine problemadäquate Planungsmethodik	91
5.2	Modellgestützte Planung.....	95
5.2.1	Spezifizierung eines problemadäquaten Entscheidungsmodells und Einordnung in den strategischen Planungsprozess	95
5.2.2	Grundlegende Struktur und Komponenten eines Entscheidungsmodells	98
5.3	Methodische Ausgestaltung der Planungsmethodik	100
5.3.1	Methodische Ausgestaltung des Zielsystems	102
5.3.2	Methodische Ausgestaltung der Strategiewahl.....	103
5.3.3	Methodische Ausgestaltung der Umweltzustände.....	103
5.3.4	Methodische Ausgestaltung der Wirkprognose	105
5.3.4.1	Klassifizierung und Erläuterung gängiger Prognosemethoden	105
5.3.4.2	Auswahl einer problemadäquaten Prognosemethode.....	111
5.3.5	Methodische Ausgestaltung des Bewertungssystems.....	115
5.3.5.1	Einordnung von Verfahren zur multikriteriellen Bewertung	115
5.3.5.2	Nutzentheoretische Verfahren	118
5.3.5.3	Prävalenzverfahren	120

5.3.5.4	Systematische Auswahl einer problemadäquaten Bewertungsmethode.....	121
5.4	Zusammenfassung der methodischen Ausgestaltung der Planungsmethodik.....	126
6	METHODISCHE KOMBINATION VON SYSTEM DYNAMICS UND PROMETHEE	128
6.1	Grundlagen der Kernmethoden.....	128
6.1.1	Grundlagen der Modellierung mit System Dynamics.....	128
6.1.2	Grundlagen der multikriteriellen Bewertung mit PROMETHEE	134
6.2	Einordnung in bestehende wissenschaftliche Arbeiten	138
6.2.1	Bestehende Ansätze im Teilbereich LiB-Produktion	138
6.2.2	Bestehende Ansätze im Teilbereich Strategische Produktionsplanung	140
6.2.3	Bestehende Ansätze im Teilbereich methodische Kombination von System Dynamics und MADM	141
6.3	Entwicklung einer kontinuierlichen Bewertungsmethodik für dynamisch-komplexe Systeme	143
6.3.1	Diskussion bestehender Ansätze und methodischer Entwicklungsbedarf	143
6.3.2	Methodische Kombination von SD und PROMETHEE zur Anwendung in dynamisch-komplexen Systemen	147
7	FORMALE MODELLIERUNG UND IMPLEMENTIERUNG.....	151
7.1	Ziele und Anforderungen an ein strategisches Entscheidungsunterstützungssystem.....	151
7.2	Modellkonzept	152
7.2.1	Dynamisches Problemverhalten.....	152
7.2.1.1	Dynamisches Problemverhalten des Grundmodells	153
7.2.1.2	Dynamisches Problemverhalten aufgrund der Wirkung von Produktionsstrategien	155
7.2.1.3	Festlegung der Modellgrenzen	158
7.2.2	Modellstruktur.....	160
7.3	Quantitativer Modellentwurf.....	162
7.3.1	Sektor Nachfragemarkt.....	163
7.3.2	Sektor Wertschöpfungssystem.....	166
7.3.2.1	Subsektor Produktion und Distribution	167
7.3.2.2	Subsektor Produktionskapazitäten	171
7.3.2.3	Subsektor Material.....	174
7.3.2.4	Subsektor Personal	176
7.3.2.5	Subsektor Recycling	179
7.3.3	Sektor Unternehmensentwicklung.....	183
7.3.3.1	Sektor Unternehmensskalierung.....	183
7.3.3.2	Subsektor Material- und Komponentenkosten	188
7.3.4	Sektor Bewertung.....	192

7.3.4.1	Subsektor Selbstkosten	192
7.3.4.2	Subsektor multikriterielle Bewertung.....	200
7.4	Validierung	205
8	EXEMPLARISCHE ANWENDUNG DES STRATEGISCHEN ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNGSSYSTEM.....	212
8.1	Rahmenbedingungen	212
8.1.1	Ausgangssituation.....	212
8.1.2	Definition des Zielsystems	213
8.2	Parametrisierung	214
8.2.1	Parametrisierung der Modellsektoren	215
8.2.2	Formulierung und Parametrisierung der Strategiealternativen	220
8.2.2.1	Formulierung der Produktionsstrategien	220
8.2.2.2	Parametrisierung der Produktionsstrategien.....	222
8.2.3	Parametrisierung der Umweltszenarien.....	223
8.2.3.1	Definition der Umweltszenarien	223
8.2.3.2	Parametrisierung der Szenarien.....	225
8.3	Simulationsstudien	227
8.3.1	Szenario "Öl-Zeitalter" (OA).....	227
8.3.2	Szenario „Schock“	229
8.3.3	Szenario „Elektrisches-Zeitalter“ (EA).....	232
8.4	Szenarioübergreifende Bewertung	234
8.4.1	Szenarioübergreifende Bewertung bei Gleichgewichtung	236
8.4.2	Alternative Wettbewerbsstrategie Kostenführerschaft	238
8.4.3	Alternative Wettbewerbsstrategie Differenzierung	240
8.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	241
9	KRITISCHE WÜRDIGUNG UND FORSCHUNGSBEDARF.....	245
9.1	Kritische Würdigung.....	245
9.2	Forschungsbedarf.....	251
10	ZUSAMMENFASSUNG	253
ANHANG 1: ERGEBNIS DER INTEGRIERTEN PRÜFFUNKTION AUF EINHEITENKONSISTENZ UND MODELLSYNTAX.....		281
ANHANG 2: ERGEBNISSE DER RISIKOANALYSEN.....		282
ANHANG 3: STANDARDISIERTER FRAGEBOGEN		287
ANHANG 4: MATHEMATISCHE GLEICHUNGEN DES SIMULATIONSMODELLS.....		288

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Inhalte und Zusammenhänge der Kapitel	10
Abbildung 2:	Die LiB im Spannungsfeld von Elektromobilität und externen Rahmenbedingungen	12
Abbildung 3:	Herstellerspezifische Flottenemissionen und potentielle Strafzahlungen	17
Abbildung 4:	Kostenstruktur eines BEV	18
Abbildung 5:	Vergleich der Haltungskosten pro km eines BEV mit denen eines konventionellen PKW	19
Abbildung 6:	Veränderung der Wertschöpfung automobiler Komponenten bis zum Jahr 2030	21
Abbildung 7:	Antriebsarten und deren technische Spezifikationen	23
Abbildung 8:	Anteil der weltweit neuzugelassenen Elektrofahrzeuge nach Antriebsarten	26
Abbildung 9:	Einschätzungen der Kostenentwicklung von LiB	29
Abbildung 10:	Kapazitätsbedarf und -abdeckung an LiB-Zellen im Jahr 2013	30
Abbildung 11:	Globale Verteilung der Produktionskapazitäten für LiB-Zellen	32
Abbildung 12:	Globale Produktionskapazitäten und deren Auslastung	33
Abbildung 13:	Kooperationsformen und Wertschöpfungstiefen im Bereich der LiB	35
Abbildung 14:	Die LiB im komplexen Spannungsfeld der Elektromobilität	37
Abbildung 15:	Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Li-Ionen Zelle	40
Abbildung 16:	Spezifische Leistung und Energie unterschiedlicher Batterietechnologien	42
Abbildung 17:	Übersicht gängiger Zellgeometrien	47
Abbildung 18:	Zusammensetzung eines Batteriesystems	48
Abbildung 19:	Schematische Abbildung des kompletten Batteriesystem	49
Abbildung 20:	Herstellungsprozess einer Lithium-Ionen-Batterie	50
Abbildung 21:	Investitionen für Produktionsanlagen unter alternativen Konfigurationen	57
Abbildung 22:	Entwicklung der Kostenanteile unter alternativen Konfigurationen	58
Abbildung 23:	Das Produktionssystem als Subsystem des Unternehmens	61
Abbildung 24:	Der strategische Planungsprozess als Teil des strategischen Managements	66
Abbildung 25:	Kategorien von Unternehmenszielen	67
Abbildung 26:	Zusammenhang zwischen globalem Umfeld und Wettbewerbsumfeld	68
Abbildung 27:	Strategieelemente und -ebene in der strategischen Planung	70
Abbildung 28:	Standortfaktorenbündel für Automobilzulieferer	83
Abbildung 29:	Interdependenzen zwischen den Teilstrategien	88
Abbildung 30:	Eigenschaften des Planungsproblems und draus resultierende Anforderungen an eine Planungsmethodik	92
Abbildung 31:	Definition der Merkmale des zu entwickelnden Entscheidungsmodells	97
Abbildung 32:	Schematische Darstellung der Modellintegration in den Planungsprozess	98

Abbildung 33:	Komponenten eines Entscheidungsmodells.....	99
Abbildung 34:	Zusammenhang von Strukturdefekt, Modellerstellung und Planungsmethoden	101
Abbildung 35:	Klassifizierung von Prognosemethoden.....	111
Abbildung 36:	Regelkreis des Produktionsmanagements.....	113
Abbildung 37:	Einteilung von MADM-Methoden nach Art der Information	117
Abbildung 38:	Methodische Ausgestaltung der Planungsmethodik und der Komponenten des Entscheidungsmodells	126
Abbildung 39:	Grundlegendes Schema eines Modellierungsprozesses.....	129
Abbildung 40:	Iterativer Modellierungsprozess für systemdynamische Simulationsmodelle	129
Abbildung 41:	Beispielhafte Darstellung eines Kausaldiagramms.....	132
Abbildung 42:	Notation eines Bestands- und Flussgrößen-Diagramms.....	133
Abbildung 43:	Verallgemeinerte Präferenzfunktionen	135
Abbildung 44:	Potentielle Ausprägungen von Strategien über einen Simulationslauf	144
Abbildung 45:	Veranschaulichung verschiedener Ansätze zur Lösung des Zeitproblems	145
Abbildung 46:	Vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse einer kontinuierlichen Bewertung mit PROMETHEE.....	149
Abbildung 47:	Kausaldiagramm des dynamischen Problemverhaltens	153
Abbildung 48:	Festlegung der Modellgrenzen.....	159
Abbildung 49:	Modellstruktur, Modellgrenzen und Schlüsselvariablen	160
Abbildung 50:	Sektor Nachfrage.....	164
Abbildung 51:	Modellierung der Batterienachfrage.....	166
Abbildung 52:	Subsektor Produktion mit Fokus Auftragseingang und Lieferzeit	167
Abbildung 53:	Subsektor Produktion mit Fokus auf Produktionsrestriktionen und Fehlmengen	169
Abbildung 54:	Effekte auf die Lieferzeit und der Einfluss von Soll- und Ist-Produktionsrate	171
Abbildung 55:	Subsektor Produktionskapazität.....	172
Abbildung 56:	Kapazitätsausbau entsprechend unterschiedlicher Kapazitätsstrategien (links) und Kapazitätsaufbau bei einem dynamischen Nachfrageverlauf (rechts).....	174
Abbildung 57:	Modellstruktur des Subsektors Material	175
Abbildung 58:	Materialbeschaffungs- und Verarbeitungsrate und deren Auswirkung auf die Lagerreichweite.....	176
Abbildung 59:	Modellstruktur des Subsegments Personal	177
Abbildung 60:	Personalbedarf und Bestand und resultierender Erfüllungsgrad	178
Abbildung 61:	Ausschnitt des Subsegments Recycling.....	180
Abbildung 62:	Recyclingrate von BEV-Äquivalenten und Ergebnis in €/t für verschiedene Strategietypen	183
Abbildung 63:	Anpassung der Produktionskapazitäten an die Nachfrage	185
Abbildung 64:	Kosten für Produktionsanlagen und die Größe der Werksfläche in Abhängigkeit der Kapazitätsstrategie	188

Abbildung 65:	Modellstruktur Subsegments Material- und Komponentenkosten.....	189
Abbildung 66:	Anteil von Batterieelementen an den Systemkosten und produktionsneutraler Kostenverlauf.....	192
Abbildung 67:	Subsektor Selbstkosten	193
Abbildung 68:	Einfluss verschiedener Strategietypen auf Stückkosten und Marktanteil.....	199
Abbildung 69:	Modellstruktur des Bereichs Stück- bzw. Selbstkosten.....	201
Abbildung 70:	Morphologischer Kasten zur Ableitung der Produktionsstrategien	220
Abbildung 71:	Direkt von der Produktionsstrategie beeinflusste Modellgrößen	222
Abbildung 72:	Nachfrageentwicklung in den verschiedenen Szenarien	226
Abbildung 73:	Ergebnis zu Selbstkosten der Produktionsstrategien im Szenario OA.....	228
Abbildung 74:	Ergebnis zu Lieferzeiten der Produktionsstrategien im Szenario OA	228
Abbildung 75:	Ergebnis des PROMETHEE von Produktionsstrategien im Szenario OA	229
Abbildung 76:	Ergebnis zu Selbstkosten der Produktionsstrategien im Szenario Schock	230
Abbildung 77:	Ergebnis zu Lieferzeiten der Produktionsstrategien im Szenario Schock.....	231
Abbildung 78:	Ergebnis des PROMETHEE von Produktionsstrategien im Szenario Schock.....	231
Abbildung 79:	Ergebnis zu Selbstkosten der Produktionsstrategien im Szenario EA	232
Abbildung 80:	Ergebnis zu Lieferzeiten der Produktionsstrategien im Szenario EA.....	233
Abbildung 81:	Ergebnis des PROMETHEE von Produktionsstrategien im Szenario EA.....	233
Abbildung 82:	Streuung der Strategie-Nettoflüsse über die Szenarien	234
Abbildung 83:	Einordnung der Lebenszyklusphasen in die Simulation	235
Abbildung 84:	Ergebnis der integralen Betrachtung	236
Abbildung 85:	Ergebnis der integralen Betrachtung für die Wettbewerbsstrategie Kostenführer	239
Abbildung 86:	Ergebnis der integralen Betrachtung für die Wettbewerbsstrategie Differenzierung.....	240

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Subventionsprogramme ausgewählter Länder	16
Tabelle 2:	Komponentenbasiertes Potential zur Senkung der CO ₂ -Emissionen sowie deren Kosten	20
Tabelle 3:	Auswirkungen der Antriebsform auf relevante Fahrzeugkomponenten	23
Tabelle 4:	Kriterien und deren Ausprägung während unterschiedlicher Lebenszyklusphasen	27
Tabelle 5:	Hersteller und deren Produktkonfigurationen von Li-Ionenzellen für BEV	34
Tabelle 6:	Technische Eigenschaften unterschiedlicher Batterietypen	44
Tabelle 7:	Eigenschaften unterschiedlicher Zellformen	47
Tabelle 8:	Strategische Ziele für die Produktion	67
Tabelle 9:	Literaturüberblick zu strategischen Gestaltungsfeldern in der Produktion	74
Tabelle 10:	Zusammensetzung der Technologiestrategien	75
Tabelle 11:	Strategien der Fertigungstiefe	77
Tabelle 12:	Standortfaktoren nach Hansmann	82
Tabelle 13:	Differenzierungsmerkmale unterschiedlicher MADM-Methoden	125
Tabelle 14:	Schematische Darstellung einer Entscheidungsmatrix	134
Tabelle 15:	Teilstrategien und davon beeinflusste Modellparameter	158
Tabelle 16:	Allgemeine Notationen und deren Bedeutung	163
Tabelle 17:	Auswahl relevanter Validierungsschritte	206
Tabelle 18:	Im Rahmen der Risikoanalyse variierte Inputparameter	210
Tabelle 19:	Einschätzung zur Relevanz und Ausprägung von Kriterien	214
Tabelle 20:	Material- und Komponentenbedarf in kWh nach Batterietypen	216
Tabelle 21:	Material- und Komponentenkosten je Einheit nach Batterietypen	217
Tabelle 22:	Grundparametrisierung der Prozessschritte	218
Tabelle 23:	Parametrisierung des Subsektors Recycling	219
Tabelle 24:	Tabellarische Ansicht der auf Basis des morphologischen Kastens definierten Produktionsstrategien	221
Tabelle 25:	Zuordnung verwendeter Abkürzungen zu Strategiealternativen	221
Tabelle 26:	Parametervariation in Abhängigkeit des Standortes	223
Tabelle 27:	Durch Szenarien beeinflusste Modellgrößen sowie deren Ausprägungsänderung	224
Tabelle 28:	Parametrisierung der Simulationsszenarien	225
Tabelle 29:	Zeitbedarf zur Änderung von standortabhängigen Kriterien	226
Tabelle 30:	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der integrierten Bewertung	243

Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytischen Hierarchie Prozess
ARRA	American Recovery and Reinvestment Act
BatPaC	Battery Performance and Cost model
BEV	Battery Electric Vehicle
CAGR	Compound Annual Growth Rate
ELECTRE	Elimination Et Choix Traduisant la Réalité
E-PKW	Elektro-Personenkraftwagen
HEV	Hybrid Electric Vehicle bzw. Hybridelektrokraftfahrzeug
IEA	Internationale Energieagentur
JV	Joint Venture
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
LFP	Lithium-Eisenphosphat-Batterien
LiB	Lithium-Ionen-Batterie
LiO	Li-Luft Batterie
LiPF ₆	Hexafluorophosphat
LiS	Lithium-Schwefel-Batterie
LMO	Manganspinell-Oxide
MADM	Mult-Attribute Decision Making
MAUT	Multiattributive Nutzentheorie
MCDA	Multi-Criteria Decision Aid
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MODM	Multi-Objective Decision Making
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid
PHEV	Plug-in-Hybrid Electric Vehicle
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations
SD	System Dynamics
SEI	Solid Electrolyte Interphase
SEPP	Simulationsbasiertes strategisches Entscheidungsunterstützungssystem zur Planung der Produktion
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas
WZ	Wirtschaftszweig
xEV	Umfasst HEV, PHEV und BEV

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Der Klimawandel und die stetig voranschreitende Ressourcenverknappung führen zu einem Umdenken im Bereich der Individualmobilität. Neue alternative Antriebstechnologien, wie die Elektromobilität, gewinnen für die Automobilindustrie zunehmend an Bedeutung. Zwar fristen diese neuen Antriebsformen, verglichen mit dem konventionellen Verbrennungsmotor, derzeit noch ein Nischendasein, jedoch ist zu erwarten, dass deren Marktanteil zukünftig stark zunehmen wird. Der elektrifizierte Antriebsstrang bietet somit neue Herausforderungen und Chancen sowohl für die etablierten Akteure der Automobilindustrie, als auch für neue Akteure aus anderen Branchen, wie etwa Batteriesystemhersteller (vgl. Kley et al. 2011; Schade et al. 2014).

In Deutschland stellt die Automobilindustrie einen der zentralen Treiber für Wirtschaft, Beschäftigung und letztendlich auch Wohlstand dar. Mit einem Umsatz von 364 Mrd. € im Jahr 2013 lag deren Anteil am Gesamtumsatz des verarbeitenden Gewerbes bei 21 %. Zudem ist die Automobilindustrie mit den ca. 772.000 direkt darin Beschäftigten einer der größten Arbeitgeber des verarbeitenden Gewerbes (vgl. Statistisches Bundesamt 2014). Ein technologischer Wandel vom konventionellen hin zum elektrifizierten Fahrzeug würde in erster Linie den Antriebsstrang der Fahrzeuge betreffen. Der Antriebsstrang von konventionellen Fahrzeugen¹ stellt derzeit eine Kernkomponente der Automobilhersteller dar. Etwa 25 % der Wertschöpfung am gesamten Fahrzeug entfallen allein darauf (vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven 2011; Schade et al. 2014). Bei einem rein elektrisch angetriebenen Fahrzeug werden jedoch genau diese Komponenten nicht länger oder nur in reduziertem Umfang benötigt. Dagegen werden andere Komponenten stark an Bedeutung gewinnen. Der Wandel vom konventionell zum alternativ betriebenen Fahrzeug hat somit nicht nur auf die Hersteller der Fahrzeuge eine enorme Auswirkung, sondern betrifft die komplette Wertschöpfungskette der Automobilproduktion. Insbesondere die Lithium-Ionen-Traktionsbatterie (LiB)² ist hierbei sowohl aus technischer als auch wirtschaftlicher Sicht von großer Bedeutung. Ihr Anteil an den Gesamtherstellkosten eines Elektrofahrzeugs liegt bei 35-40 % (vgl. Thielmann et al. 2014). Sie determiniert demnach nicht nur bedeutende technische Parameter des Fahrzeugs wie Reichweite und Leistung, sondern auch in großem Maße dessen Kostenstruktur. Die LiB wird daher auch als Schlüsselkomponente der Elektromobilität angesehen. Der Markt hierfür befindet sich zwischen der Einführungsphase und der Phase des

¹ *Bestehend aus Verbrennungsmotor, Abgasanlage und Getriebe.*

² *Lithium-Ionen-Batterien finden derzeit vor allem im Consumer-Bereich Anwendung. Aufgrund des Kontextes dieser Arbeit soll im Folgenden unter dem Kürzel „LiB“ explizit der Bereich für die Anwendung im automobilen Kontext verstanden werden.*

schnellen Wachstums und wird deshalb auch als „junger Markt“³ bezeichnet. Charakteristisch für einen solchen Markt ist die erst zögerliche Umsatzentwicklung, die dann rasant ansteigt. Der Markt ist geprägt von technologischen und strategischen Unsicherheiten. Den Akteuren liegen zudem keinerlei Erfahrungswerte vor, auf die sie bei Entscheidungen zurückgreifen könnten (vgl. Levitt 1965; Porter 2013). Für neue und bereits etablierte Akteure innerhalb der Wertschöpfungskette eröffnen sich hierdurch sowohl Chancen als auch Risiken für eine strategische Anpassung ihres Produktportfolios. Auf der einen Seite bietet sich die Chance, den potentiellen Verlust durch gefährdete oder obsolete Komponenten zu kompensieren oder zur Erschließung eines gänzlich neuen Geschäftsfeldes mit hohem ökonomischem Potential. Auf der anderen Seite stehen diesem enormen Potential derzeit ebenso hohe Risiken in Form von Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen ökonomischen, technologischen und rechtlichen Entwicklungen des Marktes entgegen (vgl. Peters et al. 2013).

Folglich müssen sich die betroffenen Akteure in diesem Spannungsfeld die Fragen stellen, ob sie in diesem neuen Markt partizipieren wollen und wie sie auch unter – für junge Märkte charakteristischen – turbulenten Umfeldentwicklungen langfristig wettbewerbsfähig bleiben können. In diesem Kontext kommt einem wettbewerbsfähigen Produktionssystem und dessen strategischer Planung und Ausgestaltung eine zentrale Rolle zu. Die Schaffung und Bereitstellung von produktionsspezifischen Potentialen erfolgt anhand der durch die Produktionsstrategie festgelegten Entscheidungen. Diese Entscheidungen sind in Bezug auf den zukünftigen Unternehmenserfolg von grundlegender Bedeutung. Die Produktion wird als einer der zentralen funktionalen Unternehmensbereiche erachtet und verursacht oftmals bis zu 90 % der gesamten Kosten im Unternehmen (vgl. Zäpfel 2000a). Bei der Entscheidung, ob ein Unternehmen in einem jungen Markt partizipieren möchte, kommt folglich dem Produktionssystem und der Produktionsstrategie zu dessen Gestaltung oftmals eine zentrale Rolle zu. Sie bestimmt nicht nur maßgeblich, ob ein wettbewerbsfähiges Produkt in ausreichender Quantität und Qualität gefertigt werden kann, sondern auch zu welchen Kosten.

Für Unternehmen, die im Bereich der Elektromobilität aktiv sind, ist der derzeit bestehende strategische Handlungsspielraum sehr groß. Ebenso besteht jedoch ein großes Informationsdefizit bezüglich des entstehenden Marktes und der darin agierenden Wettbewerber. Entsprechend besitzen die relevanten Entscheider, die vorrangig im strategischen Management zu finden sind, ein kognitives Defizit. Dennoch müssen sie auf Grundlage dieser Informationsdefizite und unter Unsicherheit die strategischen Entscheidungen treffen, ob sie auf dem Markt für LiB aktiv werden wollen und wie sie die hierzu benötigte Wertschöpfungsstruktur wettbewerbsfähig und robust aufbauen können. Die damit verbundene Bindewirkung und deren Konsequenzen kann sich dabei

³ *Märkte, die sich in der Lebenszyklusphase der Einführung bzw. der des schnellen Wachstums befinden, werden auch als junge Märkte bezeichnet (vgl. Höft 1992). Eine detaillierte Beschreibung junger Märkte erfolgt in Kapitel 2.2.1.*

massiv und mitunter auch existenziell auf den Unternehmenserfolg auswirken. So kann dem Unternehmen einerseits ein monetärer Schaden durch einen erfolglosen Markteintritt⁴ oder andererseits ein Schaden durch den Nicht-Eintritt in einen Technologiemarkt entstehen.⁵ Die Prämisse sollte daher sein, dass per se nur solche strategischen Handlungsoptionen ausgewählt werden, die aus einer großen Anzahl an Alternativen durch ein planvolles und zielorientiertes Vorgehen rational und systematisch bestimmt wurden. Der strategische Planungsprozess bietet hierfür einen geeigneten Rahmen zur Entscheidungsvorbereitung (vgl. Hahn und Taylor 2006). In jungen Märkten ist ein solches Vorgehen allerdings nur schwer zu realisieren. Grund hierfür ist, dass es sich bei der strategischen Planung um die Generierung und Verarbeitung von entscheidungsrelevanten Informationen handelt. Das Dilemma liegt darin, dass diese vorrangig in den Phasen der Unternehmens- und Umfeldanalyse generiert werden. Für junge Märkte liegen belastbare und vollständige Informationen jedoch nur bedingt vor. Ebenso ist eine Prognose hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen des Umfeldes und der eigenen Wettbewerbsfähigkeit aufgrund der hohen Komplexität⁶ und herrschenden Unsicherheiten schwierig (vgl. Aldinger 2009; Meffert 1998; Porter 2013). Die traditionellen und vorwiegend qualitativ geprägten Methoden der strategischen Planung, wie z. B. Portfoliomethoden oder Checklisten, sind unter diesen turbulenten Rahmenbedingungen nicht zielführend. Sie verbleiben auf einer für diese Problemstellung ungenügenden qualitativen und abstrakten Ebene (vgl. Aldinger 2009).

In der Literatur wird zur Lösung von komplexen und schlecht strukturierten Planungsproblemen der Einsatz von Modellen zur Entscheidungsunterstützung angeregt. Dabei handelt es sich um die formale Darstellung von Planungsproblemen. Sie beinhalten eine Menge an möglichen Handlungsalternativen, eine Zielfunktion sowie ein Simulations-

⁴ Wie z. B. Bosch in der Solarindustrie: Im Jahr 2012 machte die Sparte ca. 1 Mrd. € Verlust (vgl. Robert Bosch GmbH 2013).

⁵ Ein klassisches Beispiel hierfür ist der ehemalige Handy-Weltmarktführer Nokia, der im April 2014 seine Handysparte an Microsoft verkaufte. Das Unternehmen trat erst verspätet in den neu entstehenden Markt für Smartphones ein und konnte sich gegenüber der Konkurrenz nicht mehr behaupten (vgl. Hecking 2014).

⁶ Der Begriff der Komplexität ist in der Literatur nicht eindeutig definiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird dem Begriff die Definition von Ulrich und Probst zugrundegelegt. Danach ist ein komplexes System dadurch charakterisiert, dass es aus vielen verschiedenen Elementen besteht die untereinander eng verknüpft sind und miteinander interagieren. Zudem ist das System einer hohen Veränderlichkeit bzw. Dynamik unterworfen. Das System kann somit innerhalb von kürzester Zeit eine große Anzahl an Zuständen einnehmen, weshalb dessen Verhalten, zukünftige Zustände und die Auswirkungen von Eingriffen nicht eindeutig prognostiziert werden können (vgl. Ulrich und Probst 1991).

oder Optimierungsmodell zur Bewertung (vgl. Klein und Scholl 2011).⁷ Simulationsmodelle bieten dann einen Mehrwert, wenn das Modell mit mathematisch-analytischen Verfahren nicht lösbar ist oder reale Experimente aus ökonomischen, technischen oder ethischen Gründen nicht durchführbar sind (vgl. März et al. 2011). Ebenso kann eine detaillierte Analyse von Systemen durchgeführt werden, die sich noch im Entwurfsstadium befinden bzw. noch nicht real existieren (vgl. Hader 2001). Dieser Aspekt ist besonders für die Analyse eines potentiellen Produktionssystems und dessen Leistungsfähigkeit relevant.

Für die strategische Planung eines wettbewerbsfähigen Produktionssystems und die damit einhergehende Entscheidung für erfolgsversprechende Produktionsstrategien wird somit eine adäquate simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung benötigt.⁸ Bereits bestehende Beiträge und Modelle im Kontext der strategischen Planung der Produktion werden den hier geschilderten Rahmenbedingungen und Planungsproblemen in jungen Märkten nicht gerecht. Die Ursache hierfür kann zumeist auf einen oder mehrere der nachfolgenden Aspekte zurückgeführt werden:

- Junge Märkte sind geprägt von großer Unsicherheit, Dynamik und einem erheblichen informatorischen Defizit über das Marktumfeld, den Markt an sich und die darin agierenden Wettbewerber. Strategische Planungs- und Entscheidungsprobleme können in diesem Kontext auch als schlecht strukturiert bezeichnet werden (vgl. Klein und Scholl 2011). Der Einsatz eines alleinstehenden Simulationsmodells ist unter diesen Rahmenbedingungen nicht zielführend. Daher ist eine problemadäquate und durchgängige Planungsmethodik zur Überwindung der informatorischen Defizite und strukturellen Defekte⁹ notwendig. Das Simulationsmodell wird integriert und in dessen Rahmen die benötigten Informationen und Strukturen generiert.

⁷ *Im Kontext dieser Arbeit besteht das vorrangige Ziel nicht darin, die optimale Lösung bzw. Strategie zu identifizieren, sondern ein Verständnis für das Systemverhalten- und dessen Zusammenhänge zu generieren, um so die Wahl einer robusten Strategie vorzubereiten. Daher liegt der Fokus im Folgenden auf den (systemdynamischen) Simulationsmodellen (vgl. Stumpfe 2003).*

⁸ *Obwohl Simulationsmodelle insbesondere auf operativer Ebene weit verbreitet sind, finden sie nur sporadischen Einsatz bei strategischen Problemstellungen. Zwar sehen Unternehmen moderne Simulationsmethoden als einen der wichtigsten Faktoren bei der Strategieentwicklung an, jedoch verwenden nur weniger als 5 % Simulationsmodelle, um Strategien zu entwickeln und zu evaluieren. Zudem verwenden weniger als 20 % der Unternehmen Simulationsmodelle zur strategischen Analyse (vgl. Gilbert und Behnam 2009).*

⁹ *Die Struktur eines Planungs- oder Entscheidungsproblem wird maßgeblich durch die dazu vorliegenden Daten, Variablen, Wirkungszusammenhänge und Zielsetzungen bestimmt. Je nach dem Grad der Strukturiertheit offenbaren sich bestimmte Strukturdefekte, die eine Lösung des Problems behindern. Durch die Anwendung geeigneter Methoden und Modelle lässt sich der Grad der Strukturierung verbessern und strukturelle Defekte überwinden (vgl. Klein und Scholl 2011).*

- Die strategische Planung des Produktionssystems beschränkt sich nicht allein auf den Bereich der Produktion. Entsprechend der Auffassung der Produktion als System, besteht eine Vielzahl an Beziehungen und Wechselwirkungen mit anderen unternehmensinternen Funktionsbereichen (z. B. Beschaffung, Personal etc.) und unternehmensexternen Bereichen (z. B. Absatzmarkt, Technologiemarkt etc.). Bei einer Fokussierung auf lediglich einen Teilaspekt oder ein Subsystem ohne eine problemadäquate Erfassung der Interdependenzen, besteht die Gefahr, dass erfolgskritische Wechselwirkungen nicht erfasst werden und sich die Entscheidungsqualität dadurch erheblich verschlechtert. Dies betrifft ebenso die Fokussierung auf eine einzelne Teilstrategie der Produktionsstrategie (z. B. Kapazitätsstrategie), die ebenfalls stets im Zusammenhang mit den restlichen Teilstrategien und übergeordneten Unternehmensstrategien behandelt werden sollte.
- Ein Unternehmen folgt bei seinen Entscheidungen in der Regel der Maxime der größten Wirtschaftlichkeit. Diese stellt jedoch vor allem in den frühen Lebenszyklen einer Branche nicht das einzige Entscheidungskriterium dar. So stehen anfangs verstärkt das Unternehmenswachstum und der Zugewinn von Marktanteilen im Fokus und werden erst zu einem späteren Zeitpunkt durch die Profitabilität als dominantes Ziel ersetzt (vgl. Buss 2010). Es handelt sich somit nicht um eine rein monetäre, sondern vielmehr um eine multikriterielle Entscheidung, die sowohl quantitative (z. B. Produktionskosten, Lieferzeit etc.) als auch qualitative Kriterien (z. B. Schutz von geistigem Eigentum, Kundennähe etc.) umfassen kann. Werden diese Aspekte nicht berücksichtigt oder die qualitativen Kriterien monetarisiert, um diese zu einem einzigen (zumeist wirtschaftlichen) Entscheidungskriterium zu aggregieren, gehen relevante Entscheidungsinformationen verloren und die Entscheidungsqualität wird reduziert. Bei jungen Märkten spielen jedoch gerade solche qualitativen Kriterien, wie der Schutz von geistigem Eigentum oder die Nähe zu den Kunden, eine wichtige Rolle bei der Entscheidung von Unternehmen. Sie sollten daher als eigenständige Kriterien Berücksichtigung finden.
- Die strategische Planung umfasst einen langen Zeitraum und weist eine hohe dynamische Komplexität auf. Es ist daher unbedingt zu vermeiden, dass solche Strategien präferiert werden, die lediglich kurzfristig vorteilhafter sind als andere (vgl. Sterman 2000). Diese Gefahr kann bestehen, wenn Strategien nur zu einem oder nur zu wenigen diskreten Zeitpunkten bewertet werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Unternehmen, die in jungen Märkten aktiv werden wollen, eine strategische Entscheidung treffen müssen, die mit einem hohen wirtschaftlichen Risiko verknüpft ist. Dabei liegen planungsrelevante Informationen nur bedingt vor. Die zukünftige Entwicklung des Marktes und dessen Akteuren ist geprägt von diversen Unsicherheiten. Verschärfend kommt hinzu, dass sowohl eine große Anzahl an Wechselwirkungen innerhalb des Unternehmens sowie mit dessen Außenwelt bestehen. Diese beeinflussen sich gegenseitig und induzieren eine hohe Komplexität. All dies führt dazu, dass die mit der Wahl einer Produktionsstrategie einhergehenden langfristigen Konsequenzen auf die Unternehmensziele sich nicht ex ante quantifizieren

lassen. Die traditionellen Methoden der strategischen Planung sowie bestehende Modelle zur Planung und Entscheidungsunterstützung sind unter diesen Rahmenbedingungen für eine Problemlösung nicht geeignet. Die zukünftige Ausgestaltung und die daraus resultierende Wettbewerbsfähigkeit des Produktionssystems kann dementsprechend nicht eingeschätzt werden, mit dem Resultat, dass eine generelle Entscheidung über die Partizipation im jungen Markt der LiB sowie im speziellen über deren Art und Weise, nicht rational gefällt werden kann.

1.2 Zielsetzung und Lösungsweg

Aus der zuvor geschilderten Problemstellung ergibt sich die Zielsetzung dieser Arbeit. Zur Verbesserung der Entscheidungsqualität¹⁰ von Akteuren in jungen Märkten ist eine Planungsmethodik zu konzipieren und zu entwickeln, die den Rahmenbedingungen und informatorischen Defiziten auf jungen Märkten gerecht werden kann. Auf Grundlage dieser Planungsmethodik wird ein Entscheidungsmodell entwickelt, in dessen Zentrum ein Entscheidungsunterstützungssystem¹¹ steht, das es den Entscheidern ermöglichen soll, alternative Produktionsstrategien auf ihre Vorteilhaftigkeit unter unterschiedlichen Umfeldentwicklungen zu überprüfen, zu bewerten und robuste¹² wettbewerbsfähige Strategie zu identifizieren. Das zugrundeliegende Simulationsmodell soll in der Lage sein, die relevanten systemischen Zusammenhänge des Produktionssystems und der Produktionsstrategien adäquat abzubilden. Die Bewertung anhand einer Zielgröße erscheint in diesem Kontext als ungenügend, weshalb eine multikriterielle Bewertung unter explizitem Einbezug von qualitativen Kriterien vorgenommen werden soll. Letztlich soll dem Entscheider ermöglicht werden, seine Entscheidung unter möglichst großer Transparenz und Informationsbeständigkeit zu fällen, um so die Vertrauensbildung zu erhöhen. Die Bewertung der Produktionsstrategien und die Darstellung der Ergebnisse sollen daher nicht mehr nur anhand einzelner diskreter Zeitpunkte erfolgen, sondern kontinuierlich über den gesamten Bewertungszeitraum hinweg möglich sein.

¹⁰ Die Entscheidungsqualität kann generell anhand der Rationalität oder der Richtigkeit einer Entscheidung gemessen werden. Eine Bewertung anhand der Richtigkeit macht aufgrund der Singularität und Ungewissheit des hier vorliegenden Entscheidungsproblems keinen Sinn. Im Kontext dieser Arbeit wird daher unter einer Verbesserung der Entscheidungsqualität eine erhöhte Rationalität verstanden (vgl. Eisenführ und Weber 2003).

¹¹ Entscheidungsunterstützungssysteme oder auch Decision Support Systems (DSS) sind interaktive EDV-gestützte Systeme, die Entscheidungsträger anhand von Modellen, Methoden und problembezogenen Daten in ihrem Entscheidungsprozess bei der Lösung von Aufgaben in eher schlecht strukturierter Entscheidungssituationen unterstützen (vgl. Gluchowski et al. 2008)

¹² Als robuste Strategien werden solche bezeichnet, die selbst noch im Fall der schlechtesten Umweltentwicklung zu einem für den Entscheider akzeptablen Ergebnis führen (vgl. Scholl 2013)

Basierend auf dieser Zielsetzung sowie der bestehenden Forschungslücke, lassen sich fünf wesentliche Forschungsfragen (FF) formulieren, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden sollen:

- **FF 1:** Welche Defizite weist der Prozess der strategischen Planung bei jungen Märkten auf und welche Implikationen für die strategische Planung der Produktion in jungen Märkten lassen sich daraus ableiten?
- **FF 2:** Wie ist eine Planungsmethodik und insbesondere ein daraus resultierendes Entscheidungsmodell konzeptionell und methodisch auszugestalten, damit im Umfeld junger Märkte Entscheider dazu befähigt werden können, robuste Produktionsstrategien rational und systematisch zu identifizieren und zu bewerten?
- **FF 3:** Wie kann die Wirkung alternativer Produktionsstrategien unter verschiedenen Umweltentwicklungen systemisch erfasst und abgebildet werden? Wie kann deren kontinuierliche Bewertung unter Einbezug von quantitativen und qualitativen Zielgrößen erfolgen, um robuste Strategien zu identifizieren und die Entscheidungsqualität zu steigern?
- **FF 4:** Welche Produktionsstrategien bieten zu welchem Zeitpunkt des Produktlebenszyklus in Abhängigkeit verschiedener Umweltbedingungen für ein Unternehmen das Potential, im Markt für LiB wettbewerbsfähig zu sein?
- **FF 5:** Welche Produktionsstrategie bietet bei unterschiedlichen Wettbewerbsstrategien den größten Vorteil?

Zur Beantwortung obiger Forschungsfragen ist die Arbeit in drei Teile untergliedert. Teil A umfasst die Kapitel 2 bis 4 und befasst sich mit der Einführung und den relevanten Grundlagen des Themenkomplexes. Das Ergebnis von Teil A stellt die Lösung von Forschungsfrage 1 dar, welche zugleich die Grundlage für den Teil B „Planungsmethodik und Modellentwicklung“ darstellt. Teil B widmet sich im Verlauf der Kapitel 5 bis 7 der Entwicklung einer problemadäquaten Planungsmethodik und eines Entscheidungsmodells bzw. eines Entscheidungsunterstützungssystems. Entsprechend dieses Fokus beantwortet dieser Teil die Forschungsfragen 2 und 3. Der dritte Teil dieser Arbeit, Teil C „Ergebnisse und Schlussfolgerungen“, umfasst die abschließenden Kapitel 8 bis 10 und fokussiert sich auf die methodische Umsetzung im Rahmen eines Fallbeispiels. In diesem Rahmen werden die Antworten auf die Forschungsfragen 4 und 5 gegeben. Ebenfalls Bestandteil von Teil C sind die abschließende kritische Würdigung sowie die Zusammenfassung der Arbeit. Die Arbeit mit ihren drei Teilen umfasst somit insgesamt zehn Kapitel, deren Inhalt im Folgenden kurz beschrieben wird.

Das auf die Einleitung folgende Kapitel 2 befasst sich mit dem Spannungsfeld zwischen Elektromobilität und LiB. Das Kapitel zielt darauf ab, die Ursachen für die bestehende Dynamik und Unsicherheit im Markt für LiB darzulegen. Zu Beginn werden die ökonomischen, ökologischen, politisch-rechtlichen, sozio-kulturellen sowie technologischen Rahmenbedingungen, die die aktuelle und zukünftige Entwicklung der Elektromobilität beeinflussen, beschrieben. In diesem Kontext wird die zentrale Bedeutung der Lithium-

Ionen-Traktionsbatterie als Schlüsselkomponente für die erfolgreiche Diffusion der Elektromobilität aufgezeigt. Im zweiten Teil von Kapitel 2 erfolgt eine genauere Erläuterung der Struktur und der derzeitigen Beschaffenheit des jungen Marktes für LiB sowie eine Übersicht zur derzeitigen Ausgestaltung von Produktionsstrategien.

Kapitel 3 beschreibt den aktuellen Stand der Lithium-Ionen-Technik für die Elektromobilität. Die zentralen Komponenten sowie die Funktionsweise des Produkts LiB werden näher erläutert. Im zweiten Teil werden der Produktionsprozess einer LiB sowie die hierzu benötigten Produktionsfaktoren und damit einhergehende Investitionen beispielhaft beschrieben.

Kapitel 4 widmet sich dem Prozess der strategischen Planung des Produktionssystems. Das Produktionssystem sowie dessen Einbindung im Unternehmen und im Unternehmensumfeld werden aus systemtheoretischer Sicht erläutert. Darauf aufbauend wird der Prozess der strategischen Produktionsplanung als bewährtes Mittel zur wettbewerbsfähigen Gestaltung des Produktionssystems beschrieben. Das Ergebnis dieses Planungsprozesses stellt eine geeignete Produktionsstrategie dar. Die wesentlichen Teilstrategien, die eine Produktionsstrategie ausmachen (Kapazitäts-, Standort- und Technologiestrategie sowie die Strategie der Fertigungstiefe) und deren Variations- und Kombinationsmöglichkeiten, die die Leistung eines Produktionssystems bestimmen, sind ebenfalls Betrachtungsgegenstand von Kapitel 4. Das Kapitel schließt mit einer Synthese der bisherigen Ergebnisse. Sowohl die externen Umfeldentwicklungen als auch Erkenntnisse zum Markt und Wettbewerb aus Kapitel 2 und die produkt- bzw. produktionsspezifischen Charakteristika der LiB aus Kapitel 3, werden in Kontext zum Prozess der strategischen Produktionsplanung gesetzt, um dessen Eignung zur ex ante Planung der Produktion für den jungen Markt für LiB zu beurteilen.

Kapitel 5 greift die Ergebnisse der Synthese auf und leitet die sich daraus ergebenden Anforderungen an eine Planungsmethodik zur strategischen Produktionsplanung für junge Märkte ab. Anschließend werden Aufbau und Funktion von modellbasierten Entscheidungsmodellen als Instrumente zur Auswahl und Bewertung von Strategien unter hoher Komplexität und Unsicherheit erläutert. Entscheidungsmodelle stellen Ergebnis und Kern der Planungsmethodik dar. Die in Bezug auf die zuvor formulierten Anforderungen problemadäquater methodischer Ausgestaltung der Planungsmethodik sind ebenfalls Bestandteil von Kapitel 5.

Kapitel 6 befasst sich mit der Begründung der Notwendigkeit einer methodischen Kombination von systemdynamischer Simulation und multikriterieller Bewertung. Auf Basis der bestehenden Literatur erfolgt sowohl eine Einordnung der Planungsmethodik als auch die Identifikation von Defiziten bereits bestehender Ansätze. Auf Basis des festgestellten Entwicklungsbedarfs wird ein Vorgehen zur Kombination von systemdynamischer Simulation und multikriterieller Bewertung entwickelt. Diese Kombination ermöglicht auch bei dynamisch-komplexen Systemen eine kontinuierliche Bewertung von Produktionsstrategien.

In Kapitel 7 erfolgt die formale Modellierung und Implementierung eines simulationsbasierten strategischen Entscheidungsunterstützungssystems zur Planung der Produktion (*SEPP*), dessen Kern die Kombination von systemdynamischer Simulation und multikriterieller Bewertung bildet. Es ermöglicht die Identifikation und kontinuierliche Bewertung vorteilhafter Produktionsstrategien.

Das *SEPP* wird in Kapitel 8 exemplarisch auf das Beispiel eines Tier1-Zulieferers für LiB angewendet. Rahmenbedingungen und Szenarien werden beschrieben und das Modell entsprechend parametrisiert. Die Ergebnisse der szenariobasierten Simulationsstudien werden einer integrierten Bewertung unterzogen, diskutiert und darauf basierend Handlungsempfehlungen ausgesprochen.

Kapitel 9 unterzieht die Arbeit einer kritischen Würdigung und gibt einen Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf. Zum Abschluss der Arbeit werden in Kapitel 10 nochmals der Inhalt und die zentralen Ergebnisse zusammengefasst.

Der Inhalt der einzelnen Kapitel ist in nachfolgender Abbildung 1 nochmals schematisch zusammengefasst. Zusätzlich verdeutlicht sind deren Wirkbeziehungen und Beiträge für den Prozess der strategischen Produktionsplanung von LiB sowie für das zu erstellende *SEPP*. Zudem ist in den relevanten Kapiteln vermerkt, welche Forschungsfragen (FF) in deren Kontext gelöst werden.

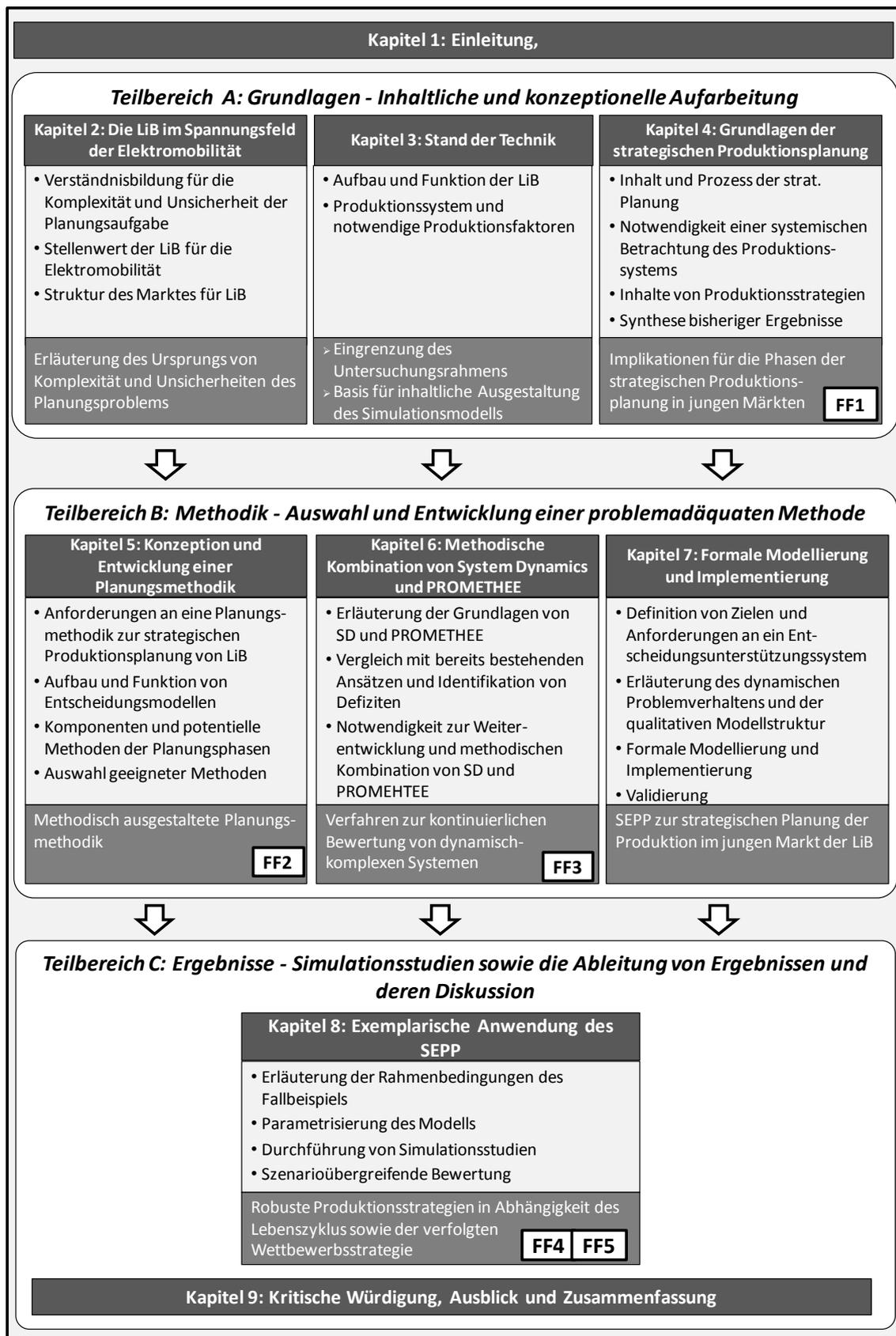


Abbildung 1: Inhalte und Zusammenhänge der Kapitel

2 Die Lithium-Ionen-Batterie im Spannungsfeld der Elektromobilität

Kapitel 2 befasst sich im ersten Teilabschnitt mit dem globalen Umfeld des jungen Marktes für LiB und den dort herrschenden Rahmenbedingungen. Die fünf wesentlichen Bereiche des Umfeldes werden bezüglich potentieller Chancen und Risiken für die LiB analysiert. Zudem wird untersucht, wie sich diese auf Dynamik, Komplexität und Unsicherheit im Markt für LiB auswirken. Der Fokus bei dieser Betrachtung richtet sich nicht ausschließlich auf die LiB sondern aufgrund der engen Wirkbeziehung ebenfalls auf die Elektromobilität. Deren Diffusion ist untrennbar mit der der LiB verbunden und kann somit als Befähiger oder Treiber für diese erachtet werden.

Das zweite Unterkapitel widmet sich dem eigentlichen Markt für LiB und analysiert dessen Markt- und Wettbewerbsstruktur. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen dabei die Produktionsstandorte, die bestehenden Produktionskapazitäten sowie die Ausgestaltung der Wertschöpfungstiefe.¹³ Das Ende des Kapitels bildet ein Zwischenfazit, in dem die Ergebnisse zusammengefasst und in Kontext gesetzt werden.

2.1 Rahmenbedingungen der Elektromobilität und Implikationen für die LiB

Die Basis für die robuste und erfolgreiche Planung eines Produktes für einen jungen Markt stellt in hohem Maße das Verständnis über dessen zukünftige Entwicklung und damit verbundener Faktoren dar. Im konkreten Fall der Lithium-Ionen-Traktionsbatterie bedeutet dies, dass der Markt der LiB untrennbar mit der Diffusion von Elektrofahrzeugen verbunden ist. Um folglich die Entwicklung des Marktes für LiB einschätzen zu können und zu erkennen wodurch die Dynamik, Komplexität und Unsicherheit induziert werden, muss daher zuerst der Markt für Elektrofahrzeuge sowie die Elektromobilität generell betrachtet werden.

Das Konzept der Elektromobilität als alternative Mobilitätsform ist bereits seit mehr als 100 Jahren bekannt. Bis heute konnten sich Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang jedoch nicht gegen konventionell betriebene Fahrzeuge behaupten, deren Diffusion deutlich schneller vonstattenging (vgl. Høyer 2008). In den letzten Jahren führten Entwicklungen auf globaler Ebene sowie das Aufkommen neuer Megatrends zu einer Renaissance der Elektromobilität. Beinahe alle relevanten Automobilhersteller bieten

¹³ *Der Fokus wurde hierbei bewusst auf diese drei Aspekte gelegt, da sie Teilbereiche der Produktionsstrategie betreffen und Rückschlüsse auf evtl. bestehende dominante Strategien erlauben, vgl. Kapitel 4.1.3. Die hier nicht betrachteten Aspekte der Technologiestrategie werden im nachfolgenden Kapitel 3 näher betrachtet.*

inzwischen Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebstrang in ihrer Modellpalette an. Der Anteil dieser Fahrzeuge an der Gesamtproduktion liegt gegenwärtig bei ca. 3 % (vgl. Thielmann et al. 2014).

Wie sich dieser Anteil zukünftig verändert, hängt stark davon ab, wie sich die Rahmenbedingungen für die Elektromobilität entwickeln. Diese könnten dabei Aspekte beinhalten, die als Treiber oder auch als Hemmnis fungieren (vgl. Abbildung 2). In den folgenden Kapiteln wird auf die relevanten Rahmenbedingungen und deren zentrale Aspekte detaillierter eingegangen. Zu beachten ist hierbei, dass die unterschiedlichen Treiber bzw. Hemmnisse nicht isoliert voneinander zu betrachten sind, sondern sich überschneiden und gegenseitig beeinflussen.

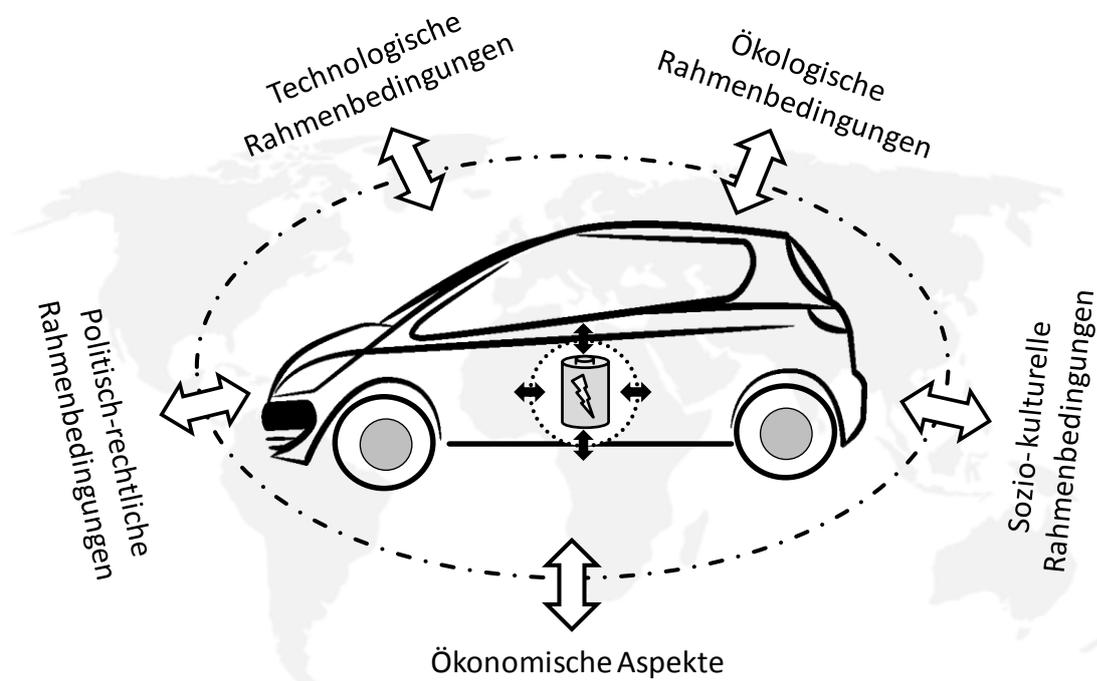


Abbildung 2: Die LiB im Spannungsfeld von Elektromobilität und externen Rahmenbedingungen

2.1.1 Sozio-kulturelle Rahmenbedingungen

Ein bedeutender Megatrend, der sich in den kommenden Jahren weiter verschärfen wird, ist die Urbanisierung. Bereits heute leben 54 % der Weltbevölkerung in Städten, und deren Anteil wird bis zum Jahr 2050 auf ca. 66 % ansteigen. Darüber hinaus wächst die Anzahl sogenannter Megacities¹⁴ von derzeit 28 auf geschätzte 41 im Jahr 2030 (vgl. UN 2014). Neben der Anzahl und Verteilung der Bevölkerung steigt zugleich deren Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein weiter an. Die Bewohner urbaner Regionen

¹⁴ Als Megacity bezeichnet man Städte mit einer Einwohnerzahl von größer 10 Mio..

verlangen nach qualitativ hochwertigem Lebensraum, der nicht durch lokale Emissionen wie Lärm, Feinstaub und weitere Luftschadstoffe¹⁵ beeinträchtigt wird (vgl. Hüttl et al. 2010). Da diese Art der Emissionen zu einem relevanten Anteil auf den Verkehrssektor zurückzuführen ist, stellt dieser einen wichtigen Stellhebel zur Schaffung eines qualitativ hochwertigen Lebens- und Wohnraums dar. Zwar ist es in der Vergangenheit bereits gelungen, über technische und regulatorische Maßnahmen an konventionell betriebenen Fahrzeugen die emittierten Luftschadstoffe deutlich zu reduzieren,¹⁶ jedoch konnte bei der Feinstaubbelastung und der Emission des Treibhausgases (THG) CO₂ keine Verbesserung festgestellt werden.

Aufgrund des Verzichts auf die Verbrennung fossiler Energieträger bieten Elektrofahrzeuge den Vorteil geringerer Feinstaubbelastung sowie geringerer Lärmentstehung (vgl. Peters et al. 2013). Die Europäische Kommission hat sich daher das Ziel gesetzt bis zum Jahr 2030 den Anteil von konventionellen Fahrzeugen in Städten um 50 % zu reduzieren. Bis zum Jahr 2050 sollen nur noch emissionsfreie Fahrzeuge zugelassen werden (vgl. EK 2011). Weiterhin spielt für die zukünftige Diffusion von Elektrofahrzeugen die Akzeptanz des Produkts „Elektrofahrzeug“ bei den Endkunden eine entscheidende Rolle. Einen großen Einfluss auf die Nutzerakzeptanz besitzen die im Vergleich zu konventionellen Antrieben höheren Anschaffungskosten und die geringere Reichweite (vgl. Peters, A., Hoffmann, J. 2011; Jochem et al. 2014).¹⁷

2.1.2 Ökologische Rahmenbedingungen

Im Gegensatz zu lokal wirkenden Luftschadstoffen, sind die global wirkenden THG-Emissionen nur schwer mit technischen Mitteln einzudämmen. Vor dem Hintergrund des stetig voranschreitenden Klimawandels ist jedoch eine Reduzierung dieser Emissionen von großer Bedeutung. Eine prominente Rolle unter den THG nimmt dabei das Kohlenstoffdioxid (CO₂) ein. Allein 50 % der anthropogen induzierten Erderwärmung werden auf dieses THG zurückgeführt (vgl. Climate Change Secretariat 2007). Auf globaler Ebene beträgt der verkehrsinduzierte Anteil an CO₂ in etwa 13 % der gesamten CO₂-Emissionen (vgl. Bernstein et al. 2008).¹⁸ Laut Europäischer Kommission entfallen dabei ca. 15 % der europäischen CO₂-Emissionen (vgl. EK 2012) auf leichte Nutzfahrzeuge.¹⁹ Damit der Klimawandel abgefedert und die Erderwärmung in diesem Jahrhundert nicht

¹⁵ Z. B. Kohlenmonoxyd (CO), Stickstoffoxyd (NO_x) oder volatile organic compounds (VOC).

¹⁶ In Europa wurde dies vorrangig durch die EU-Abgasnormen erreicht, die seit 1990 die sukzessive Verringerung der Luftschadstoffemissionen regeln (vgl. hierzu EU 2007).

¹⁷ Auf die genannten Hemmnisse wird bei der Betrachtung der ökonomischen und technologischen Rahmenbedingungen nochmals genauer eingegangen.

¹⁸ Dieser Anteil kann jedoch regional stark variieren. In Deutschland liegt der Anteil mit 19 % etwas höher, während er auf europäischer Ebene sogar bei 26 % liegt (vgl. VDA 2009).

¹⁹ Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht kleiner als 3,5 t.

mehr als 2°C ansteigt,²⁰ ist eine Reduktion der CO₂-Emissionen von 50 % über alle Sektoren hinweg notwendig. Der Verkehrssektor stellt folglich einen wichtigen, wenn auch nicht den zentralen Hebel zur Verlangsamung des Klimawandels dar (vgl. EK 2011).

Neben dem Klimawandel wird auch die zukünftige Verfügbarkeit von natürlichen Ressourcen als Treiber bzw. Hemmnis der Elektromobilität diskutiert. Insbesondere die Ölförderung und der damit einhergehende Ölpreis sind zentraler Gegenstand der Diskussion. Erdöl ist weltweit der wichtigste Energieträger und macht ca. ein Drittel des gesamten Primärenergieverbrauchs aus. Im Jahr 2013 wurde mit einer Fördermenge von 4.202 Mio. t ein neuer Rekord erreicht. Zu den förderstärksten Länder gehörten neben Russland und Saudi-Arabien auch die USA, die ihre Förderung von Erdöl aus dichten Gesteinen²¹ nochmals um 12 % gegenüber dem Jahr 2012 auf 485 Mio. t steigern konnten und weiter steigern. Der Ölpreis verweilte dagegen im Jahr 2013 aufgrund des resultierenden Überangebots auf einem konstanten Wert, fiel im Jahr 2014 deutlich und unterschritt im Januar 2015 die Marke von 50 US \$ (vgl. finanzen.net 2015). Stand 2013 sind 44,5 % (ca. 175 Mrd. t Erdöl) der ursprünglichen Rohölreserven²² aufgebraucht. Der Förderrekord täuscht ein wenig darüber hinweg, dass die Förderung von konventionellem Erdöl stetig zurückgeht. Sowohl die Internationale Energieagentur als auch die Energy Watch Group (vgl. Zittel et al. 2013) gehen davon aus, dass der Peak Oil für konventionelle Erdöle im Jahr 2008 erreicht wurde. Trotzdem wird in weiten Teilen der Welt, insbesondere in den Schwellenländern, die Nachfrage auch in den kommenden Jahren weiter steigen. Diese müsste dann über unkonventionelles Erdöl bedient werden. Würde der Ölpreis jedoch über längere Zeit auf seinem derzeitigen Niveau verharren, hätte dies einen negativen Einfluss auf Investitionsentscheidungen für technisch und geografisch herausfordernde Explorationsvorhaben, die notwendig wären, um diesen steigenden Bedarf langfristig zu decken (vgl. Andruleit et al. 2014). Der Transportsektor stellte im Jahr 2011 mit einem Bedarf von 46 mb/d und somit mehr als 50 % des gesamten Ölbedarfs den energieintensivsten Sektor dar²³. Den größten Anteil daran hatte der PKW-Verkehr mit ca. 19 mb/d. Entsprechend der IEA könnte dieser bis zum Jahr 2035 auf 24 mb/d anwachsen und würde so 40 % des gesamten Transportsektors ausmachen (vgl. IEA 2012). Allein in den USA beträgt der Benzinverbrauch pro Jahr durch PKW und Kleintransporter rund 570 Milliarden Liter (vgl. Ketterer et al. 2009). Der PKW-Verkehr stellt folglich bei der Verringerung des zukünftigen Erdölbedarfs einen zentralen Ansatzpunkt dar.

²⁰ Im Vergleich zur Durchschnittstemperatur von 1980 bis 1999.

²¹ Man bezeichnet dieses Öl als unkonventionelles Erdöl. Es ist teures, technisch nur aufwändig förderbares Erdöl. Es wird z. B. aus Ölsand, Ölschiefer oder in der Tiefsee gefördert.

²² Kumulierte Förderung und Reserven.

²³ Die IEA erwartet bis 2035 eine Steigerung auf 60 mb/d. Dies entspräche dann einem Anteil von 60 %.

Damit eine eindimensionale Diskussion des Themas Ressourcenverknappung vermieden wird, ist es unumgänglich, neben der Endlichkeit des Erdöls als Treiber für die Elektromobilität, auch kritische Rohstoffe zu betrachten die ein Hemmnis für die Diffusion der Elektromobilität darstellen können. In einem Elektrofahrzeug sind im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug zusätzlich potentiell kritische Rohstoffe verbaut. In diesem Kontext zu nennen ist Lithium sowie abhängig vom verwendeten Batterietyp Nickel, Mangan und Kobalt. Zusätzlich wird für den Elektromotor Neodym und Dysprosium benötigt, wie auch große Mengen an Kupfer für den Motor und die Stromleitungen. Während für Lithium und Kupfer kein Versorgungsengpass zu erwarten ist, wohl aber eine deutliche Preissteigerung bis 2030 (vgl. Peters et al. 2013), kann es bei seltenen Erden wie z. B. Dysprosium kurz- bis mittelfristig zu einer Verknappung kommen (vgl. Hoenderdaal et al. 2013). Dem Recycling dieser Materialien wird daher zukünftig eine essentielle Rolle zukommen.

2.1.3 Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen

Die politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen stehen in besonders starkem Bezug zu anderen Rahmenbedingungen. Der Legislativen stehen zahlreiche Instrumente zur Verfügung, direkt oder indirekt auf die Rahmenbedingungen einzuwirken. Dies kann durch hemmende Instrumente, wie etwa restriktive Gesetze oder Verordnungen geschehen oder durch fördernde Instrumente, wie direkte Subventionen.²⁴

Bei den sozio-kulturellen Rahmenbedingungen wurde neben der begrenzten Reichweite der hohe Anschaffungspreis von Elektrofahrzeugen als Hemmnis identifiziert. Um diese Hemmschwelle aus regulatorischer Sicht zu senken, haben verschiedene Länder Subventionen für den privaten Erwerb von Elektrofahrzeugen eingeführt. Tabelle 1²⁵ zeigt eine Auswahl solcher Maßnahmen in unterschiedlichen Ländern. In Deutschland sind bis Ende 2015 keine Subventionen für den privaten Gebrauch verfügbar.

Als weiterer sozio-kultureller Treiber wurde in Kapitel 2.1.1 die Reduktion von Luftschadstoffen genannt. Zur Reduzierung der Treibhausgase wurde auf globaler Ebene mit dem Kyoto-Protokoll eine Verringerung der Emissionen im Zeitraum von 2008 bis 2012 um 5 % im Vergleich zum Niveau von 1990 beschlossen (vgl. UNFCCC 1997). Zudem gibt es auch auf regionaler Ebene Anstrengungen zur Reduktion von Treibhausgasen. Um eine entsprechende Verbesserung der Luftqualität zu erreichen, wurden von der EU sukzessive verschärfte Abgasnormen eingeführt, mit dem Ziel die lokalen Schadstoffemissionen zu senken.

²⁴ Aufgrund der Fülle der weltweit bestehenden Maßnahmen werden im Folgenden vorrangig solche erläutert, die sich auf Deutschland bzw. die EU fokussieren.

²⁵ Bei einem Kurs von 1 US-Dollar = 0,78 Euro.

Tabelle 1: Subventionsprogramme ausgewählter Länder (vgl. Thielmann et al. 2014)

Land	Subventionszeitraum	Max. Subventionshöhe [€]
China	2009–2015	15.000
USA	2009–2014	1.950–5.850
	seit 2014	7.800
Korea	2012–2015	16.000
	nach 2014	7.000
Frankreich	bis 2012	5.000
	ab 2013	7.000

Die Europäische Union hat mit der Verordnung 443/2009 ambitionierte Flottengrenzwerte für neu zugelassene Fahrzeuge in der EU definiert.²⁶ Diese sind herstellerspezifisch und werden von 2012 bis 2020 stetig verschärft (vgl. EU 2009).²⁷ Bei einer Überschreitung des spezifischen Grenzwertes drohen den Automobilherstellern Strafzahlungen. Entsprechend der Grenzwerte werden auch die Strafzahlungen kontinuierlich erhöht. Von 2012 bis 2020 werden bei einer Überschreitung für das erste Gramm CO₂ 5 € pro Fahrzeug, für das zweite Gramm 15 € und für das dritte 25 € berechnet. Jedes weitere darüber hinausgehende Gramm wird mit 95 € veranschlagt. Dieser Betrag gilt auch für alle Neuzulassungen ab dem Jahr 2019 (vgl. EU 2009). Die aktuellen Grenzwerte und der zugehörige Flottenausstoß sind in Abbildung 3 dargestellt.

Es lässt sich festhalten, dass fast alle Automobilhersteller bereits die Emissions-Vorgaben für das Jahr 2015 erfüllen. Das Ziel wurde im Wesentlichen durch die Optimierung der konventionellen Fahrzeuge erreicht. Diese Zielerreichung ging jedoch ebenso zulasten einer entsprechenden Kostensteigerung auf Seiten des Fahrzeugs. Eine weitere Absenkung des Grenzwertes auf 95 g CO₂/km, wie er für das Jahr 2020 vorgesehen ist, kann mit konventionellen Fahrzeugen kaum oder nur durch überproportional große Mehrkosten erreicht werden (vgl. Jochem et al. 2013).²⁸ Im Gegenzug drohen jedoch Strafzahlungen, falls die Reduktionsziele verfehlt werden. Wie stark die einzelnen Her-

²⁶ Neben einem positiven Effekt auf die CO₂-Emissionen erwartet man als weiteren positiven Nebeneffekt auch eine Verringerung der Energieabhängigkeit und eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit aufgrund des Erfordernisses technischer Innovationen, die zur Reduzierung der Emissionen notwendig sind.

²⁷ Ähnliche Bestrebungen lassen sich auch in anderen außereuropäischen Ländern beobachten. So sollen etwa die CO₂-Emissionen in Japan auf 130 g/km (bis 2014), in Korea auf 140 g/km (bis 2015) und in den USA auf 155 g/km (bis 2016) reduziert werden (vgl. Thielmann et al. 2014).

²⁸ Für detaillierte Angaben zu den einzelnen Mehrkosten, die mit einzelnen Verbesserungsmaßnahmen einhergehen, vergleiche Tabelle 2.

steller davon betroffen wären, ist in Abbildung 3 exemplarisch für das Jahr 2020 dargestellt.²⁹

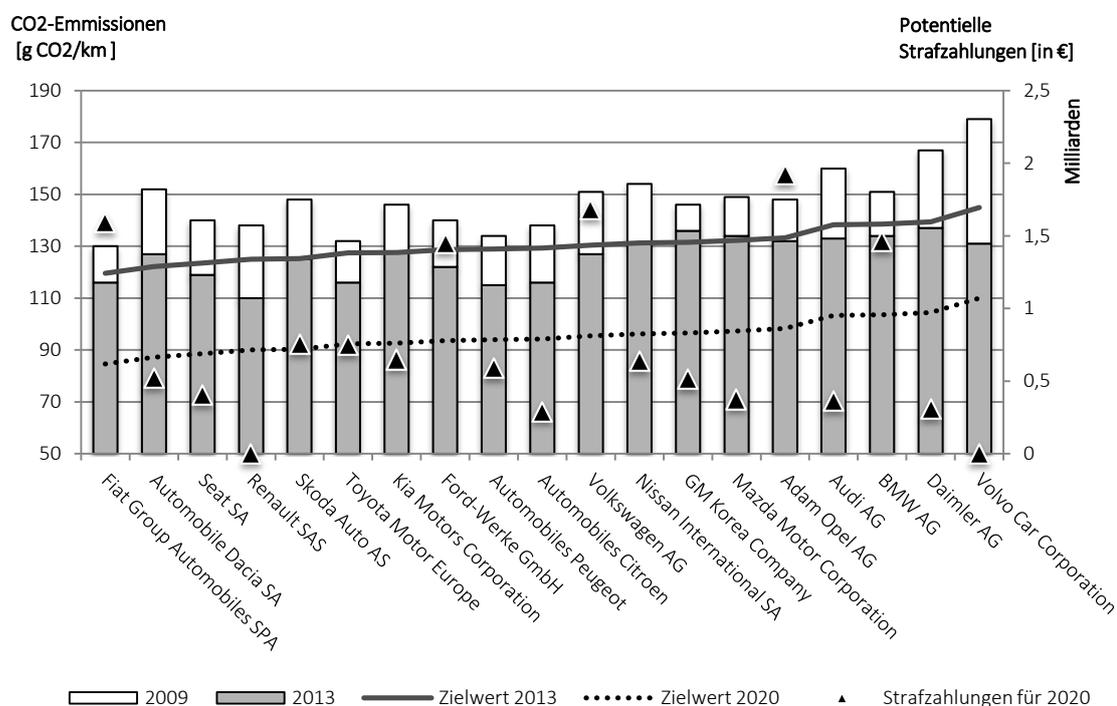


Abbildung 3: Herstellerspezifische Flottenemissionen und potentielle Strafzahlungen³⁰

Gerade für absatzstarke OEM können die Zahlungen empfindliche Größen von über 1,5 Mrd. € erreichen. Elektrofahrzeuge wirken sich aufgrund ihrer Eigenschaft als „zero emission“-Fahrzeuge³¹ positiv auf die Berechnung der Flottenemissionen aus und werden bis zum Jahr 2020 zusätzlich mit einem Faktor von 1,5 berücksichtigt (vgl. EU 2009).³² Es ist daher davon auszugehen, dass Elektrofahrzeugen zukünftig bei der Reduzierung der verkehrsinduzierten CO₂-Emissionen und der Vermeidung von Strafzahlungen eine wichtige Rolle zukommen wird.

²⁹ Zur Berechnung der Strafzahlungen wurden das herstellerspezifische Flottengewicht sowie die Absatzzahlen aus dem Jahr 2013 übernommen. Zudem wurde angenommen, dass sich die jährliche CO₂-Reduktionsrate bis 2020 entsprechend den Jahren von 2009-2013 fortsetzt.

³⁰ Eigene Berechnung auf Basis von Informationen des KBA und aus (Pastorello und Mellios 2014).

³¹ Vorausgesetzt wird, dass das Fahrzeug mit Ökostrom betrieben wird.

³² Diese Boni werden als „super credits“ bezeichnet.

2.1.4 Ökonomische Rahmenbedingungen

Bei der Betrachtung der politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen wurden bereits einige ökonomische Aspekte aufgegriffen, soweit diese von Seiten der Legislative initiiert wurden. Dabei handelte es sich zum einen um Strafzahlungen für Flottenemissionen, aber auch um etwaige Boni oder Kaufanreize für den Erwerb von Elektrofahrzeugen. Im Folgenden soll das Augenmerk deshalb verstärkt auf ökonomische Aspekte gelegt werden, die global eine ähnliche Ausprägung besitzen und nicht direkt von den politisch-rechtlichen oder ökologischen Rahmenbedingungen beeinflusst werden können. Im Fokus der Betrachtung stehen die Wirtschaftlichkeit für den Nutzer eines Elektrofahrzeugs, die ökonomischen Implikationen auf die Wertschöpfungskette und etwaige volkswirtschaftliche Effekte durch neue Komponenten im elektrischen Antriebsstrang. Eine Diffusion von Elektrofahrzeugen im großen Maßstab lässt sich derzeit nicht erkennen. Von den 62,8 Mio. verkauften PKW im Jahr 2013 (vgl. OICA 2014), waren lediglich 2,8 % Elektrofahrzeuge (vgl. MarkLines 2014). Ein Grund dafür liegt vermutlich in den höheren Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge. Diese liegen bei einem kleinen batterieelektrischen Fahrzeug (BEV) ungefähr um den Faktor 1,5 höher als bei konventionellen Fahrzeugen.³³ In Abbildung 4 ist die Kostenstruktur eines BEV nach Fahrzeuggröße für die Jahre 2011 und 2020 dargestellt.

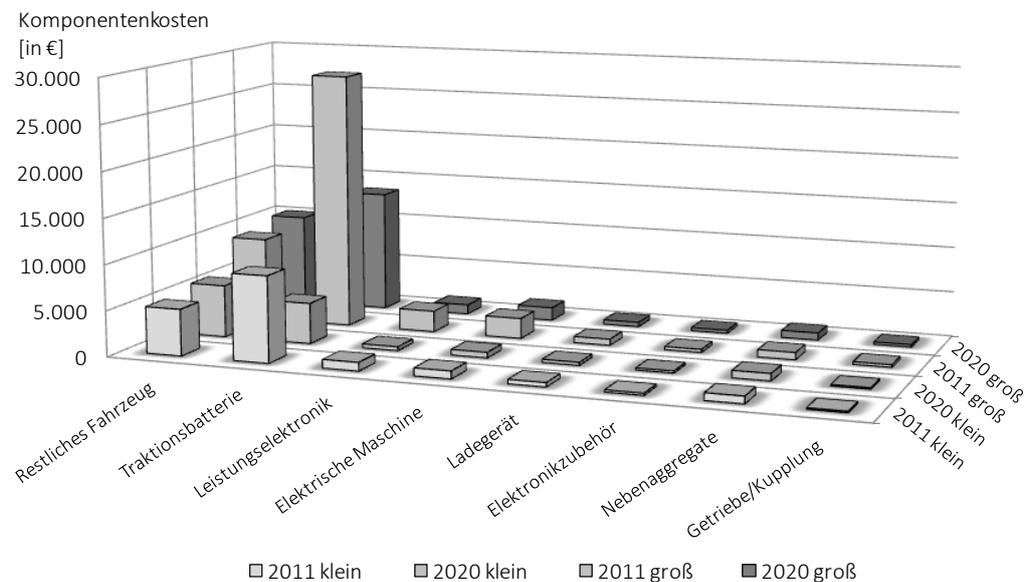


Abbildung 4: Kostenstruktur eines BEV³⁴

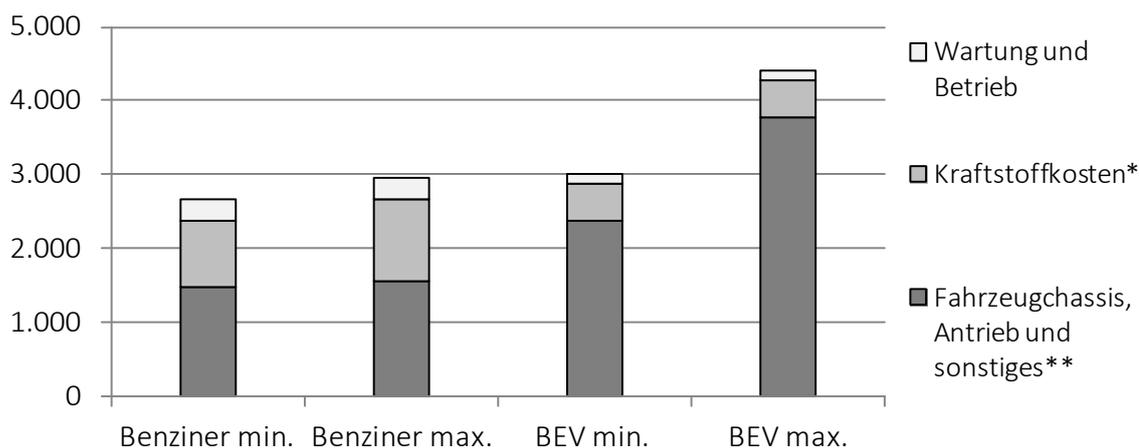
³³ Der Faktor basiert auf dem Vergleich eines konventionellen „smart fortwo“ und einem elektrischen „smart fortwo de“ in der jeweiligen Standardausführung bei einer Motorleistung von 71 PS bzw. 75 PS (vgl. smart 2015a, 2015b).

³⁴ Eigene Darstellung basierend auf Spath, D. et al. 2011; ähnliche Werte können aus Hellgren 2007; Wallentowitz und Freialdenhoven 2011; Biere et al. 2009; Kley 2011 entnommen werden.

Abbildung 4 verdeutlicht zum einen, dass im Jahr 2011 die Traktionsbatterie die Komponente eines BEV mit dem größten Anteil an den Herstellungskosten darstellt und zum anderen, dass dieser Anteil mit zunehmender Fahrzeuggröße entsprechend weiter ansteigt. Bis zum Jahr 2020 wird sich dieser Anteil zwar etwas verringern, jedoch wird die Batterie auch weiterhin mit einem Anteil von 35 % bzw. 48 % maßgeblich die Herstellungskosten eines BEV beeinflussen.

Neben den Anschaffungskosten spielen für eine rationale Kaufentscheidung im Sinne eines „Homo oeconomicus“ die Fahrzeughaltungskosten eine entscheidende Rolle. In Abbildung 5 sind die Haltungskosten pro km für ein konventionelles sowie ein rein batteriebetriebenes Fahrzeug aufgezeigt.

Beim konventionellen Fahrzeug liegen die Kraftstoffkosten verglichen mit dem BEV deutlich höher. Im Gegenzug sind die reinen Anschaffungskosten auf Seiten des BEV deutlich höher. In Summe sind die Fahrzeughaltungskosten eines BEV im Vergleich teurer, wobei mit Batteriekosten von 250 €/kWh nahezu identische Fahrzeughaltungskosten erreicht werden.



*Minimale 80 \$/Barrel bzw. Strommix, maximale 160 \$/Barrel bzw. Windstrom

**Minimale Batteriekosten 250 €/kWh, maximale Batteriekosten 400 €/kWh & Batteriewechsel

Abbildung 5: Vergleich der Haltungskosten pro km eines BEV mit denen eines konventionellen PKW (Wietschel et al. 2012)

Für die zukünftige Entwicklung der Fahrzeugpreise ist auch zu beachten, dass die Fahrzeughersteller in den vergangenen Jahren große Mühen unternommen haben, um ihre Flottenemissionen zu reduzieren, damit entsprechende Regulierungsziele erreicht werden konnten. Die hierzu notwendigen technischen Anstrengungen gehen mit entsprechenden Mehrkosten für die CO₂-reduzierenden Komponenten einher. Welchen Nutzen unterschiedliche Maßnahmen hierbei bringen und wie hoch der notwendige monetäre Aufwand ist, wird in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: *Komponentenbasiertes Potential zur Senkung der CO₂-Emissionen sowie deren Kosten (vgl. Wallentowitz et al. 2009)*

Komponente	CO₂-Einsparung [in %]	Geschätzte Kosten [in €]
<i>Motor:</i>		
Einspritzsystem	15-20	700-1.000
Ventilsteuerung	10-15	250
Turboaufladung (down-sizing)	25	+20 % Motorkosten
Alternative Kraftstoffe	10-19	1.500
<i>Energiemanagement:</i>		
Zusatzsysteme	1-2	50
Starter/Generator	6-30	1.000
<i>Antriebsstrang:</i>		
Getriebekonzept	3-18	260-900
Antriebsstrang Automation	3-15	100
<i>Karosserie/Fahrwerk:</i>		
Optimierung der Aerodynamik	4	1.500
Optimierung des Rollwiderstandes	2	100
Kompaktes Design	4-7	1.600

Es zeigt sich, dass insbesondere im Bereich des Verbrennungsmotors wie auch des Antriebsstrangs großes Potential besteht. So gibt es wie im Beispiel der Ventilsteuerung relativ kostengünstige Lösungen, die einen hohen Effekt erzielen. Jedoch bedingen die meisten Maßnahmen Mehrkosten von bis zu 1.500 € und mehr. Zur Erreichung der von der Europäischen Kommission veranschlagten CO₂-Standards von 130 g/km für das Jahr 2015, waren in etwa Mehrkosten von 200 € notwendig (vgl. Kollamthodi 2014).³⁵ Für einen Ausstoß von 95 g/km, wie er für das Jahr 2020 vorgeschrieben wurde, werden die Mehrkosten auf weitere 1.000 € (vgl. Mock 2013) bis 2.000 € (vgl. IKA 2012) geschätzt. Entsprechend einer Studie für die Europäischen Kommission zur Auslotung einer weiteren Verringerung des Flottenausstoßes innerhalb eines Zielkorridors von 68 g bis 78 g CO₂/km für Pkw, zeigt sich, dass mit konventionellen Technologien unter günstigen Rahmenbedingungen lediglich der obere Grenzwert zu Mehrkosten von ca. 3.000 € realisierbar wäre. Eine weitere Senkung wäre nur über eine Verwendung von Hybridtechnologien machbar (vgl. Ernst et al. 2014). Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die Fahrzeughaltungskosten eines Elektrofahrzeugs im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug derzeit nicht vorteilhafter sind, sich dieser Umstand jedoch in den kommenden Jahren aufgrund sinkender Batteriepreise, der CO₂-Gesetzgebung und der

³⁵ Die folgenden Angaben beziehen sich jeweils auf das Basisjahr 2010 mit einem CO₂-Ausstoß von 140 g/km.

damit einhergehenden steigenden Herstellkosten zugunsten elektrischer Fahrzeuge ändern kann.

Als abschließendes Element der Betrachtung ökonomischer Rahmenbedingungen wird im Folgenden noch auf die volkswirtschaftlichen Effekte der Elektromobilität eingegangen. Für Industrienationen wie Deutschland, in denen die Automobilindustrie eine tragende volkswirtschaftliche Säule darstellt, ist die zukünftige Entwicklung dieses Wirtschaftszweigs von fundamentaler Bedeutung. Da sich Elektrofahrzeuge und deren Antriebsstrang, je nach Grad der Elektrifizierung, mitunter essentiell von konventionellen Fahrzeugen unterscheiden, kommt es hierdurch zu Verschiebungen innerhalb der automobilen Wertschöpfungskette. Neue Komponenten gewinnen an Bedeutung, während andere an Bedeutung verlieren oder komplett obsolet werden. In Abbildung 6 ist die Entwicklung der Wertschöpfung automobiler Komponenten für die Jahre 2020 und 2030 in Abhängigkeit unterschiedlicher Diffusionsszenarien abgebildet. Auf der Sekundärachse ist zusätzlich die jährliche Wachstumsrate bzw. Compound Annual Growth Rate (CAGR) der Komponenten dargestellt.

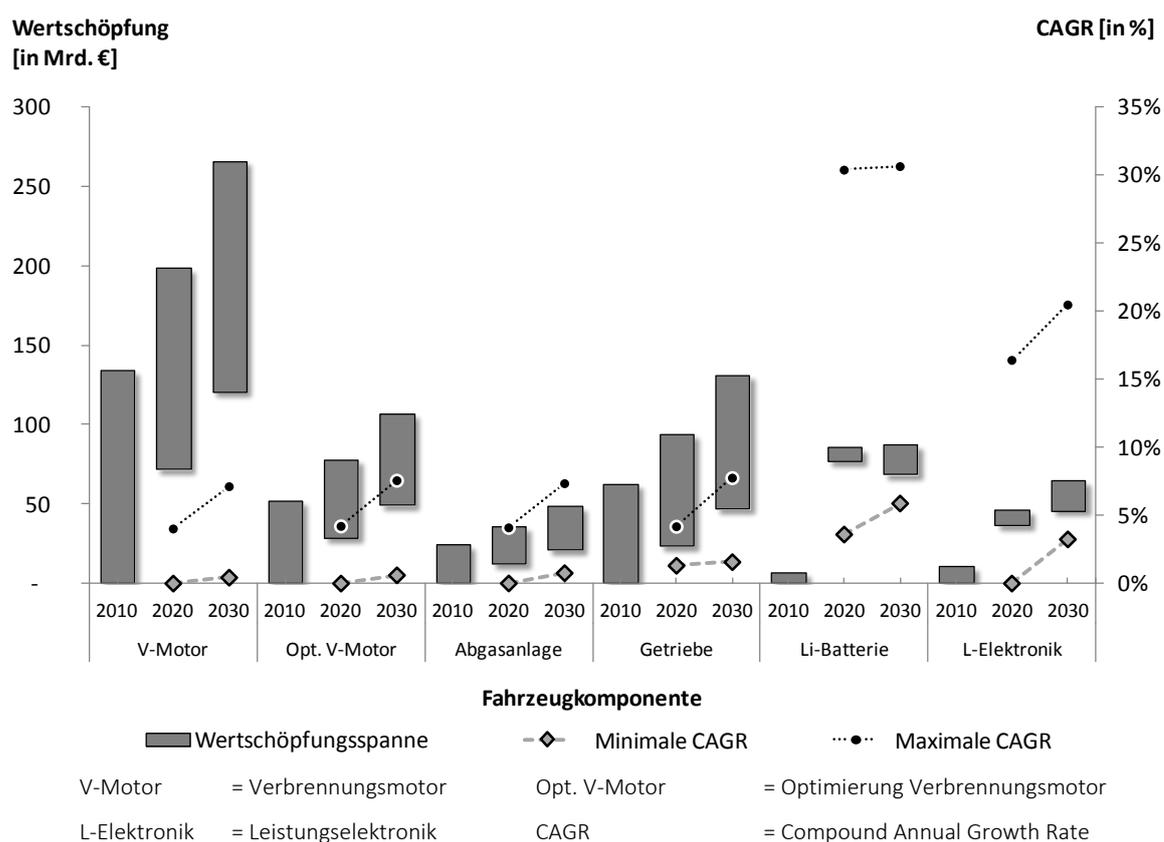


Abbildung 6: Veränderung der Wertschöpfung automobiler Komponenten bis zum Jahr 2030³⁶

³⁶ Eigene Berechnung basierend auf Werten aus Schade et al. 2014.

Die Betrachtung der zukünftigen Wertschöpfung zeigt, dass der Verbrennungsmotor auch in Zukunft die größte Wertschöpfung aufweist. Das Wachstum begründet sich mit dem insgesamt stetig weiter wachsenden globalen Absatz von PKW. Entsprechend steigt auch die Wertschöpfung damit verbundener Komponenten. Ab dem Jahr 2020 gewinnt die LiB stark an Wertschöpfung hinzu und kann im Jahr 2020 unter günstigen Rahmenbedingungen für Elektrofahrzeuge sogar einen höheren Wert als der Verbrennungsmotor erreichen. Betrachtet man die Komponenten in Bezug auf Ihre CAGR zeigt sich, dass trotz des steigenden globalen Absatzes die konventionellen Komponenten nur schwach zulegen bzw. beinahe stagnieren, während bei den elektromobilen Komponenten, wie im Fall der LiB, eine CAGR von ca. 30 % erreicht wird. Selbst im pessimistischen Szenario liegt die minimale CAGR in etwa auf der gleichen Höhe wie die maximale CAGR bei den konventionellen Komponenten. Es lässt sich also festhalten, dass auch in Zukunft den konventionellen Komponenten ein hoher Stellenwert zukommt, diese jedoch gerade mit dem Blick auf die CAGR, im Vergleich zu elektromobilen Komponenten an Bedeutung verlieren. Insbesondere die LiB besitzt dabei ein hohes Wertschöpfungs- und Wachstumspotential.

2.1.5 Technologische Rahmenbedingungen

Kernstück der technologischen Rahmenbedingungen der Elektromobilität stellt die Entwicklung des Elektrofahrzeugs bzw. des elektrifizierten Antriebstrangs³⁷ dar. Je nach Grad der Elektrifizierung werden Elektrofahrzeuge in Hybridfahrzeuge (HEV, PHEV) und batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) unterteilt. Mit der Elektrifizierung einher gehen auch mitunter weitreichende konstruktive Eingriffe in die Fahrzeugarchitektur. In Tabelle 3 sind die konstruktiven Veränderungen nach unterschiedlichen alternativen Antriebsformen im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (ICT) aufgelistet.

Je nach Antriebsform kommen neue Fahrzeugkomponenten hinzu, während andere entfallen. Der Antriebsstrang des batterieelektrischen Fahrzeugs unterscheidet sich schließlich radikal vom dem des konventionellen Fahrzeugs. Entsprechend unterschiedlich sind auch die eigentlichen Antriebskonzepte und die daraus resultierenden technischen Eigenschaften des Antriebstrangs. Die technischen Eigenschaften verschiedener Antriebsarten sind in Abbildung 7 zusammengefasst. Allen Antriebskonzepten gemein ist, dass sie mindestens einen Energiespeicher und einen Motor besitzen, der die Energie in die notwendige Traktion umwandelt.

³⁷ In dieser Arbeit umfasst der Begriff „Elektromobilität“ Fahrzeuge für den motorisierten Individualverkehr, für deren Antrieb ein Elektromotor verwendet wird und eine relevante Menge an elektrischer Energie in Batterien gespeichert wird.

Tabelle 3: Auswirkungen der Antriebsform auf relevante Fahrzeugkomponenten

Hauptmodul	Komponenten	ICE	Hybrid	PHEV	BEV
Konventioneller Motor	Verbrennungsmotor	°	°	°	†
	Starter & Lichtmaschine	°	°	°	†
	Abgasanlage	°	°	°	†
	Kraftstoffversorgung	°	°	°	†
Elektroantrieb	Elektromaschine	-	*	*	*
Antriebsstrang	Getriebe	°	°	°	†
	Traktionsbatterie	-	*	*	*
Elektronik	Ladegerät	-	*	*	*
	Leistungselektronik	-	*	*	*

- Nicht vorhanden; * kommt neu hinzu; ° keine Veränderung; † entfällt;

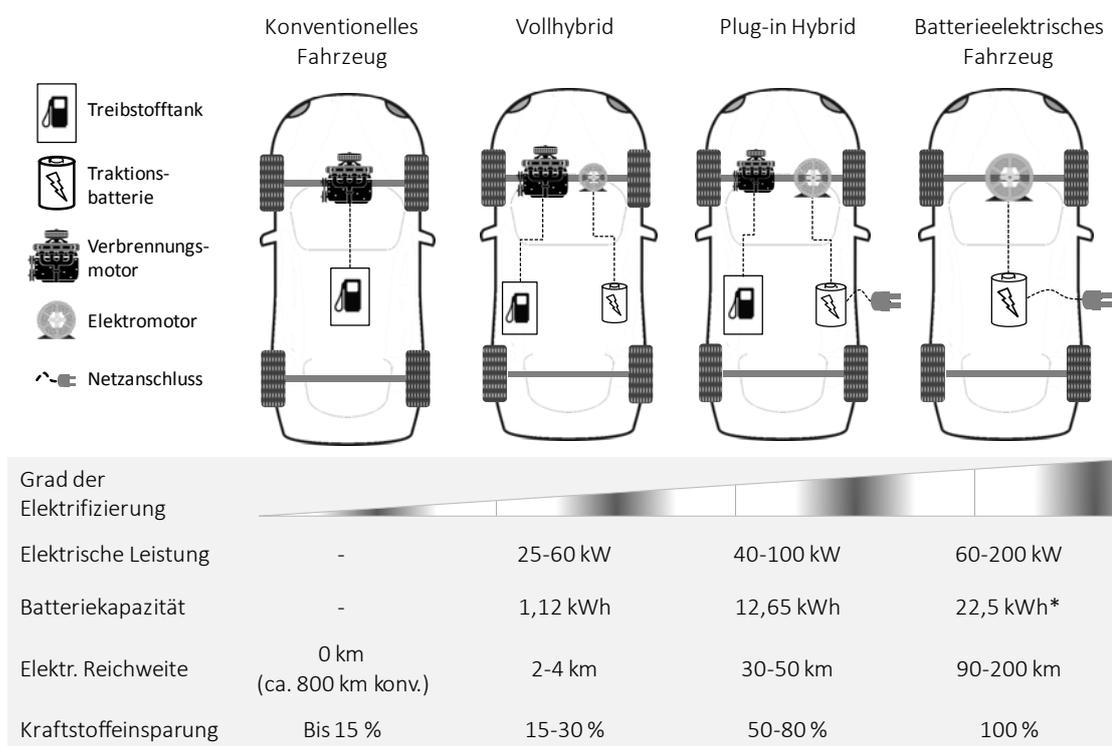


Abbildung 7: Antriebsarten und deren technische Spezifikationen

Im Fall des konventionellen Fahrzeugs dient der Kraftstofftank als Energiespeicher für die fossilen Brennstoffe. Der Verbrennungsmotor als Energiewandler setzt diesen durch

Verbrennung in Bewegungsenergie um. Eine ähnliche Architektur des Antriebstrangs weisen auch die Micro-Hybrid-Fahrzeuge auf, die das konventionelle Fahrzeug um eine Start-Stopp-Automatik ergänzen. Dies gilt ebenso für Mild-Hybrid-Fahrzeuge, die den Verbrennungsmotor durch eine E-Maschine mit zusätzlichem Drehmoment unterstützen können. Die Kraftstoffeinsparung liegt hierbei zwischen 5-10 % bzw. bis zu 15 %³⁸ (vgl. Reif 2010). Obwohl diese beiden Hybridarten eine gewisse Elektrifizierung aufweisen, ist die Batteriekapazität sehr gering und ein rein elektrisches Fahren nicht möglich. Sie stellen daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit keinen weiteren Gegenstand der Betrachtung dar.

Im Gegensatz hierzu ist ein rein elektrisches Fahren beim Vollhybrid in geringem Umfang machbar. Er stellt einen Mittelweg zwischen konventionellem und batterieelektrischem Fahrzeug dar. Der Verbrennungsmotor wird durch einen Elektromotor ergänzt, der ebenfalls mit der Antriebsachse verbunden ist. Somit ist sowohl ein simultaner als auch ein separater Antrieb möglich. Die Leistungsüberlagerung der beiden Motoren kann dabei entweder über Drehmoment- oder Drehzahladdition erfolgen. Die Batteriekapazität ist mit durchschnittlich 1 kWh relativ gering, weshalb eine rein batterieelektrische Fahrt lediglich für 2 bis 4 km möglich ist. Durch die Nutzung des Elektromotors als Generator kann per Rekuperation die Batterie während der Fahrt wieder aufgeladen werden. Der Kraftstoffverbrauch kann im Vergleich zum ICT um 15-30 % verringert werden (vgl. Stan 2012; Reif 2010).

Der Plug-in-Hybrid stellt eine Weiterentwicklung des Vollhybrid dar und ist zwischen diesem und dem rein batterieelektrischen Fahrzeug anzusiedeln. Der Plug-in-Hybrid besitzt nach wie vor einen Verbrennungsmotor, der konventionelles Fahren ermöglicht. Zusätzlich ermöglicht der elektrische Antriebsstrang im sogenannten „charge depleting“-Modus ein batterieelektrisches Fahren von 30-50 km. Entsprechend größer ist auch die Kapazität der LiB dimensioniert. Im Vergleich zum Vollhybrid ist sie mit ungefähr 12 kWh mehr als zehnmal so groß. Über einen externen Netzanschluss kann sie an entsprechenden Ladesäulen oder am Hausnetz aufgeladen werden. Ist die Batteriekapazität erschöpft, übernimmt sie im „charge sustaining“-Modus die gleiche Funktion wie im Vollhybrid (vgl. Ketterer et al. 2009; Reif 2010; Stan 2012).

Die rein batterieelektrischen Fahrzeuge weisen schließlich im Gegensatz zu den Hybrid-Fahrzeugen keinen Verbrennungsmotor mehr auf. Die elektrische Energie, die von der Traktionsbatterie bereitgestellt wird, wird von einem Elektromotor in mechanische Bewegungsenergie umgesetzt. Entsprechend groß ausgelegt ist die LiB mit Kapazitäten um 20 kWh und mehr. Primär wird sie über einen externen Netzanschluss aufgeladen. Der Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur ist somit zur Sicherstellung einer lückenlosen Mobilität von großer Bedeutung. Bis zur Mitte des Jahres 2014 waren dabei deutschlandweit ca. 4.800 Ladesäulen installiert (vgl. Pfahl 2013; Reif 2010; Stan 2012).

³⁸ *Nach neuem Europäischen Fahrzyklus (NEFC).*

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass es mehrere Ausprägungen bzw. Stufen eines elektrifizierten Antriebsstrangs gibt. Je nach Grad der Elektrifizierung sind Einsparungen von fossilen Kraftstoffen von bis zu 100 % möglich, was sich positiv auf Schadstoffemissionen und die Verfügbarkeit von Ressourcen auswirkt. Mit steigendem Elektrifizierungsgrad steigt auch die Kapazität der installierten Traktionsbatterie und somit die rein elektrisch erzielbare Reichweite des Fahrzeugs. Diese liegt im Fall eines BEV mit bis zu 200 km und mehr zwar weit über dem alltäglichen Bedarf,³⁹ ist jedoch im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug deutlich geringer. Hieraus resultiert neben den hohen Anschaffungskosten ein weiteres großes Hemmnis für die Diffusion der Elektromobilität, die sogenannte „range anxiety“, die Sorge um den Verlust an Reichweitenflexibilität. Hybridfahrzeuge mit ihrem integrierten Verbrennungsmotor bieten hierbei eine Option zur Überbrückung dieser Bedenken. Durch den zusätzlich notwendigen Antriebsstrang erhöht sich jedoch die Fahrzeugmasse, was sich wiederum negativ auf den Kraftstoffverbrauch und die erzielbare Reichweite auswirkt. Schließlich steigen aufgrund der zusätzlichen Komponenten die Anschaffungskosten, was sich wiederum negativ auf die Diffusion dieses Fahrzeugtyps auswirkt. Aufgrund der geschilderten Komplexität und nichtlinearen Vernetzung der kausalen Zusammenhänge, zeichnen gängige Prognosen zur Marktpenetration von neuzugelassenen E-PKW ein recht heterogenes Bild. Der zukünftige Marktanteil der einzelnen Antriebsarten an den globalen Neuzulassungen ist in Abbildung 8 als Aggregation verschiedener Prognosen zusammengefasst.⁴⁰ Es zeigt sich, dass sich die Prognosen zwar teilweise deutlich voneinander unterscheiden,⁴¹ im Kern gehen sie jedoch von einem steigenden Anteil an xEV (xEV umfasst HEV, PHEV und BEV) aus. Dabei bilden die HEV um das Jahr 2020 noch das Gros an xEV, während für das Jahr 2030 auch die PHEV und BEV stark an Marktanteilen hinzugewinnen.

³⁹ In Europa liegen durchschnittlich 80 % der täglich zurückgelegten Strecken bei einer Distanz von unter 50 km (vgl. Braess 2013).

⁴⁰ Doppelnennungen bei den Quellen resultieren aus der Berücksichtigung unterschiedlicher Szenarien.

⁴¹ Ein Faktor hierbei ist, dass den Prognosen unterschiedliche Szenarien zugrunde liegen und diese entsprechend optimistischer bzw. pessimistischer in ihren Annahmen sind.

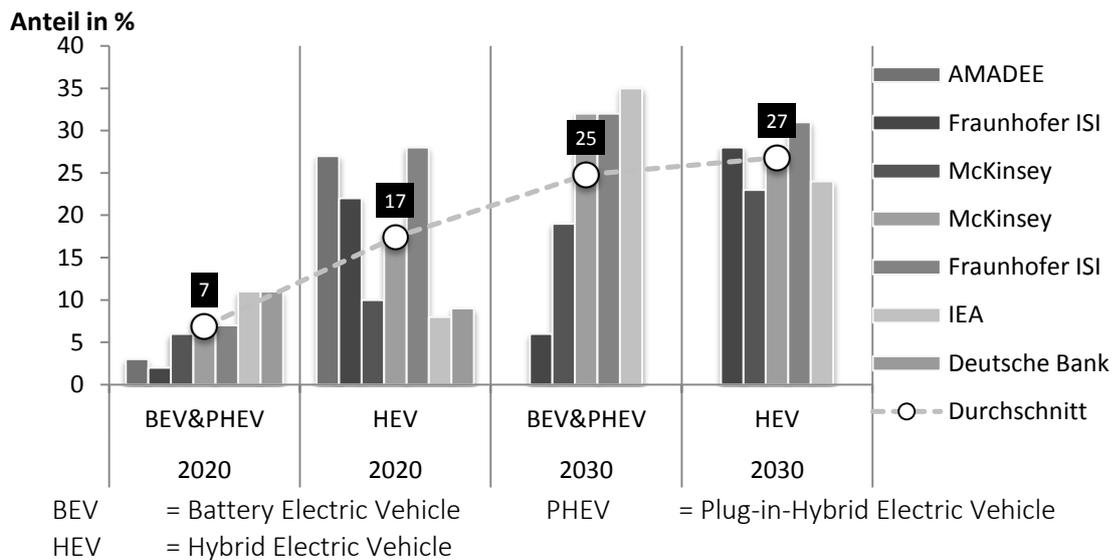


Abbildung 8: Anteil der weltweit neuzugelassenen Elektrofahrzeuge nach Antriebsarten

2.2 Branchenstruktur und -dynamik im jungen Markt der LiB

Dieses Unterkapitel befasst sich mit der Struktur und Dynamik des Marktes für LiB. Vorab werden die Eigenschaften und Spezifika von jungen Märkten beschrieben sowie erläutert, welche Art von Eintrittsbarrieren für Unternehmen existieren, die auf solchen aktiv werden wollen. Danach erfolgt eine Betrachtung, wie der Markt für LiB und dessen Akteure derzeit strukturell beschaffen sind.⁴²

2.2.1 Eigenschaften von jungen Märkten

Märkte, die sich in der Lebenszyklusphase der Einführung bzw. des schnellen Wachstums befinden, werden auch als junge Märkte bezeichnet. Diese Phasen sind gekennzeichnet durch ein langsames Umsatzwachstum, das noch vor dem eigentlichen „Take-off“ steht (vgl. Levitt 1985). Eine branchenübergreifende Charakteristik von jungen Märkten aus strategischer Perspektive stellt der Mangel an Erfahrungen dar, weshalb noch keine gemeinsamen Spielregeln für den Wettbewerb bestehen (vgl. Höft 1992; Porter 2013; Meffert 1988). Zudem weisen junge Märkte noch weitere spezielle strukturelle Gegebenheiten auf, mit denen sich Unternehmen, die auf diesem Markt agieren möchten, auseinandersetzen müssen. Sie sind in der Regel durch eine hohe technologische Turbulenz und Unsicherheiten gekennzeichnet. Zu diesem frühen Zeitpunkt konnte sich noch kein dominantes Design etablieren, und es kristallisiert sich noch keine Strategie als die Richtige heraus. Die Wettbewerber verfolgen und testen daher eine Vielzahl unterschiedlicher Strategien (vgl. Höft 1992; Porter 2013; Meffert 1988).

⁴² Aufgrund des thematischen Schwerpunkts dieser Arbeit liegt der Fokus hierbei vorrangig auf produktionsrelevanten Aspekten.

Das Marktpotential ist zu diesem Zeitpunkt noch schwer einzuschätzen, jedoch ist in diesen frühen Phasen mit hohen Wachstumsraten zu rechnen. Entsprechend attraktiv ist der Markt, und es konkurrieren eine Vielzahl an Wettbewerbern, darunter ein hoher Anteil an neugegründeten Unternehmen mit teils unterschiedlichen Produkten. Die anfänglich noch hohen Kosten gehen stark zurück. Weiterhin können Marktanteile noch relativ schnell hinzugewonnen werden, da die Kundentreue noch nicht stark ausgeprägt ist. Der Lebenszyklus des jungen Marktes umfasst im Vergleich zur Phase der Reife nur einen relativ kurzen Zeithorizont (vgl. Höft 1992; Porter 2013). Im Sinne der Timing-Strategie kommen daher lediglich die Pionier- oder die Frühe-Folger-Strategie in Frage (vgl. Meffert 1988).

Tabelle 4: Kriterien und deren Ausprägung während unterschiedlicher Lebenszyklusphasen (vgl. Servatius 1985)

Kriterium	Entstehung	Wachstum	Reife	Alter
Wachstumsrate	Unbestimmt	Hoch	Gering	Null
Marktpotential	Unklar	Klarer	Überschaubar	Bekannt
Produktsortiment	Klein	Rasche Erweiterung	Langsame / keine Erweiterung	Bereinigung
Anzahl der Wettbewerber	Klein	Erreicht den Höchstwert	Konsolidierung	Weitere Verringerung
Verteilung der Marktanteile	Nicht abschätzbar	Konzentration	Weitere Konzentration	Weitere Konzentration
Stabilität der Marktanteile	Gering	Höher	Hoch	Hoch
Kundentreue	Gering	Höher	Abnehmend	Höher
Eintrittsmöglichkeiten	Gut	Noch gut	Geringer	Meist uninteressant
Reife der Technologie	Hoher Einfluss	Hoher Einfluss	Herstellverfahren rationalisieren	Technologie ist verbreitet

Entscheidet sich ein Unternehmen letztlich, in einen Markt einzutreten, muss es bestehende Markteintrittsbarrieren überwinden. In jungen Märkten sind die Eintrittsmöglichkeiten noch relativ gut, da Markteintrittsbarrieren vorrangig erst zu einem späteren Zeitpunkt des Lebenszyklus massiv aufgebaut werden (vgl. Höft 1992). Jedoch existiert auch in jungen Märkten kein „vollkommener Wettbewerb“,⁴³ und potentielle Neuangebote

⁴³ „Vollkommener Wettbewerb“ kennzeichnet eine Wettbewerbssituation, in der der Markteintritt quasi frei ist, die etablierten Unternehmen keine Marktmacht besitzen und vollkommene Information herrscht (vgl. Welge und Al-Laham 2011).

ter müssen die bereits bestehenden Markteintrittsbarrieren überwinden. Diese stellen für die Bewertung der Attraktivität eines Marktes ein wichtiges Kriterium dar (vgl. Porter 2013). Markteintrittsbarrieren können von struktureller oder strategischer Natur sein. Die strukturellen Markteintrittsbarrieren entstehen durch etablierte Akteure, ohne dass diese direkt als solche gedacht sind.

Im Wesentlichen lassen sich Markteintrittsbarrieren auf folgende Ursachen zurückführen (vgl. Minderlein 1990; Porter 2013):

- Betriebsgrößenvorteile bzw. „economies of scale“
- Produktdifferenzierungsvorteile durch bestehende Käuferloyalität
- Hoher Kapitalbedarf beim Markteinstieg
- Umstellungskosten für die Abnehmer durch den Produktwechsel
- Ein erschwerter Zugang zu Vertriebskanälen
- Staatliche Politik im Sinne von Subventionen, aber auch Restriktionen durch z. B. Zugang zu wichtigen Rohstoffen
- Absolute und größenunabhängige Kostenvorteile durch z. B. produktionsspezifisches Know-how, erfahrungsbedingte Kostendegression etc.
- Versunkene Kosten bzw. „sunk costs“ beschreiben irreversible vordisponierte Kosten und könnten in diesem Kontext vorrangig als Austrittsbarrieren aufgefasst werden. Mit dem Wissen, dass diese in Zukunft anfallen könnten, fungieren sie jedoch gleichzeitig auch als Eintrittsbarrieren.

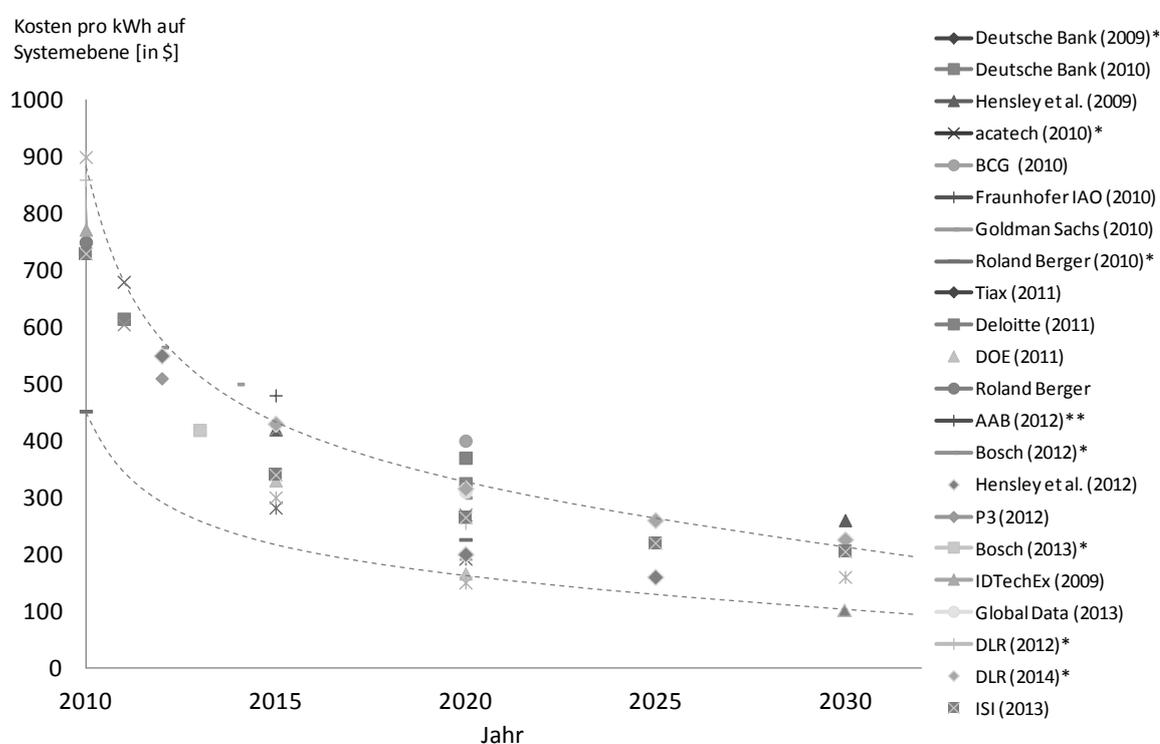
Neben diesen strukturellen Barrieren existieren auch solche, die von den Unternehmen bewusst im Zuge von strategischen Maßnahmen errichtet werden, und die ein gewisses Abschreckungspotential entfalten sollen (vgl. Minderlein 1989). Gängige Mittel hierbei sind (vgl. Porter 2013):

- Die Limitpreisstrategie, bei der der Angebotspreis so weit reduziert wird, dass ein kostendeckender Markteintritt nicht möglich ist.
- Die Überkapazitätsstrategie, mit der die zukünftige Nachfrage schneller und kostengünstiger bedient werden soll.
- Die Produktdifferenzierungsstrategie, die darauf abzielt, möglichst viele Produktnischen bereits zu belegen.

Die Entscheidung, ob ein Unternehmen auf einem jungen Markt aktiv werden soll, hängt somit nicht nur allein von der Rentabilität oder strategischen Bedeutung eines Marktes ab, sondern ebenso in hohem Maße davon, ob das Unternehmen fähig ist, die bestehenden Markteintrittsbarrieren zu überwinden.

2.2.2 Der Markt für LiB

Dem Markt für Lithium-Ionen-Batterien für automobiler Anwendungen wird ein enormes Potential zugesprochen.⁴⁴ Inwiefern sich dieses Potential letztlich erschließen lässt, hängt in erster Linie von der Diffusion der Elektromobilität ab. Die Rahmenbedingungen hierfür wurden bereits zu Beginn von Kapitel 2 ausführlich erläutert. Durch eine schnelle und breite Diffusion könnten u.a. bei der Produktion der Batterien Skaleneffekte realisiert werden,⁴⁵ die zu einer schnellen Reduktion der Batteriekosten notwendig sind. Entsprechend spiegeln sich die Unsicherheiten der Elektrofahrzeugproduktion auch in der Batterieproduktion wider. Konkrete Aussagen über die zukünftige Kostenentwicklung von Batteriesystemen lassen sich daher kaum treffen, weshalb eine Vielzahl unterschiedlicher Einschätzungen über deren Entwicklung existiert. In Abbildung 9 wurden einige der geläufigsten zusammengetragen.



* Angaben in Euro wurden zum tagesaktuellen Kurs von 1 € = 1,13 \$ umgerechnet (Stand 23.02.2015)

** Angaben auf Zellebene. Zur Umrechnung auf Packebene wurden folgende Faktoren verwendet: 1,4 (Jahre 2010-2014); 1,3 (Jahre 2015-2020) und 1,2 (Jahre 2020-2030);

Abbildung 9: Einschätzungen der Kostenentwicklung von LiB

⁴⁴ Pillot beziffert das Marktpotential für den LiB-Markt für Elektroautos im Jahr 2020 auf ca. 11 Mrd. \$. Einen ähnlichen Wert nennt auch Anderman mit 9,2 Mrd. \$. Davon entfallen auf den Zellmarkt ca. 7,2 Mrd. \$ bzw. 6,2 Mrd. \$ (vgl. Pillot 2013; Anderman 2013).

⁴⁵ Vergleiche hierzu Kapitel 3.2.6.

2.2.3 Produktionsstandorte von LiB

In der Automobilbranche hat es sich mittlerweile etabliert, dass die Zulieferer sich in Nähe der OEM ansiedeln. Eine solche Entwicklung hat im Bereich der LiB, vermutlich aufgrund des noch geringen Produktionsvolumens, bisher noch nicht in großem Maße stattgefunden.

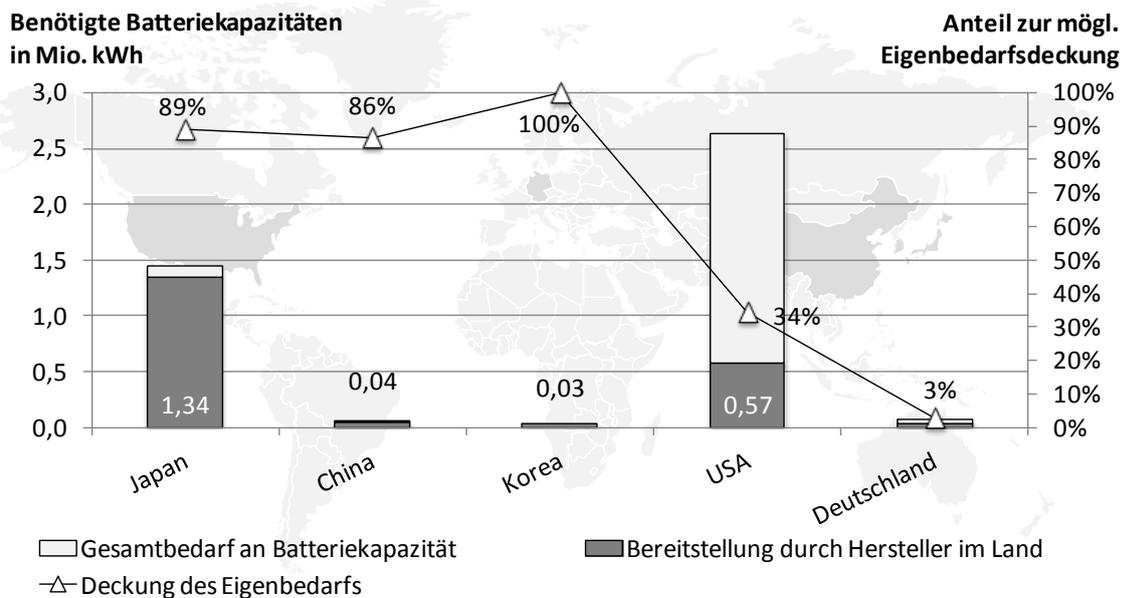


Abbildung 10: Kapazitätsbedarf und -abdeckung an LiB-Zellen im Jahr 2013 (vgl. Thielmann et al. 2014)

Aufgrund der langjährigen Erfahrung im Bereich der Consumer-Zellen ist ein Großteil der Batterie- und Zellproduktion derzeit im asiatischen Raum lokalisiert. Dort haben sich in dieser Zeit bereits feste Lieferantenbeziehungen bzw. -verflechtungen herausgebildet. Im Jahr 2013 waren ca. 75 % der globalen Produktionskapazitäten für Batteriezellen in Japan, Korea und China installiert, während der größte Bedarf an Batterien mit großem Abstand in den USA bestand. Inwiefern sich der inländische Bedarf mit dem inländischen Angebot deckt, ist aus Abbildung 10 ersichtlich. Die Abbildung zeigt, dass eine große Diskrepanz zwischen dem Ort des Angebots und dem Ort des eigentlichen Bedarfs an LiB-Zellen existiert. Zudem zeigt sich, dass gerade die nicht-asiatischen Länder stark auf den Import von Zellen angewiesen sind.⁴⁶ Im Gegenzug werden stetig neue Fahrzeugmodelle mit elektrischem Fahrzeugstrang eingeführt, sodass davon auszugehen ist, dass diese zentralisierte Produktion der LiB sich mittelfristig der globalen Nachfrage anpassen wird.

⁴⁶ Die geschilderte Diskrepanz könnte sich in Zukunft, insbesondere in den USA, relativieren, wenn Tesla den angekündigten Bau seiner „Gigafactory“ vollständig beendet hat, die eine Produktionskapazität von 35 GWh besitzt (vgl. Tesla Motors 2014b).

Abgesehen von der hier beschriebenen und eher historisch bedingten Markt-Nachfrage-Relation, finden auch lokale Standortfaktoren Beachtung (vgl. Kapitel 4.1.3.4). Vorrangig spielen hierbei wirtschaftliche Aspekte, die sich auf die Produktionskosten auswirken, eine Rolle.⁴⁷ Hierbei können zu den landesinternen Rahmenbedingungen noch weitere finanzielle Vergünstigungen bzw. Förderungen hinzukommen. Solche staatlichen Fördermaßnahmen wurden für die Elektromobilität bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben. Aufgrund des im vorherigen Kapitel geschilderten volkswirtschaftlichen Potentials der LiB wurden von staatlicher Seite auch gezielt Projekte gefördert, die eine inländische Batterieproduktion forcieren. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist der „American Recovery and Reinvestment Act of 2009 (ARRA)“, der noch bis zum Jahr 2019 läuft und auf ein Gesamtinvestitionsvolumen von ca. 821 Mrd. \$ beziffert wird. In diesem Kontext stehen für die Forschung und Entwicklung (FuE), Produktion und das Recycling von Batterien rund 1,5 Mrd. \$ bereit (vgl. Fan et al. 2013). Als ein weiterer kritischer Standortfaktor hat sich die Mitarbeiterverfügbarkeit und -qualifikation herauskristallisiert (vgl. NPE 2010a). Während diese beiden Aspekte für Länder wie Deutschland ausreichend sind, kommen in anderen Ländern, wie etwa China, noch weitere relevante Faktoren hinzu. Die Mitarbeiterfluktuation liegt dort beispielsweise zwischen 17 % und 30 %. Somit leiden die Unternehmen nicht nur unter dem Wissensabfluss, sondern auch darunter, dass dieser mit den „Köpfen“ zu einem neuen Arbeitgeber bzw. Konkurrenten wechselt. Zudem wird in China, insbesondere in der Automobilindustrie, von ausländischen Firmen oftmals erwartet, dass sie Joint Ventures mit einheimischen Unternehmen eingehen. Dem Schutz des geistigen Eigentums kommt somit auch eine zentrale Rolle zu (vgl. Waldkirch 2009; Fan et al. 2013; Kleine und Kinkel 2013).

2.2.4 Produktionskapazitäten

Die globale Verteilung von Produktionskapazitäten für Lithium-Ionen-Batteriezellen für Traktionsbatterien ist noch stark auf den asiatischen Raum konzentriert (vgl. Abbildung 11). Dort vereinigen sich insgesamt mehr als 80 % der globalen Kapazitäten. Allein die größten Unternehmen, LG Chem und AESC besitzen mit jeweils 17 % die gleichen Kapazitäten, wie sie in den gesamten USA installiert sind.⁴⁸

⁴⁷ Auch der Aspekt Lohnkosten stellt hierbei einen wichtigen Faktor dar. In der Batterieproduktion verliert dieser jedoch an Gewicht. Zudem steigen in China die Lohnkosten in den vergangenen Jahren stetig um ca. 10 %/a an (vgl. Zenglein 2014).

⁴⁸ Der einzige deutsche Vertreter, Li-Tec, wird seine Produktion voraussichtlich bis zum Jahr 2016 schließen (vgl. Freitag 2014).

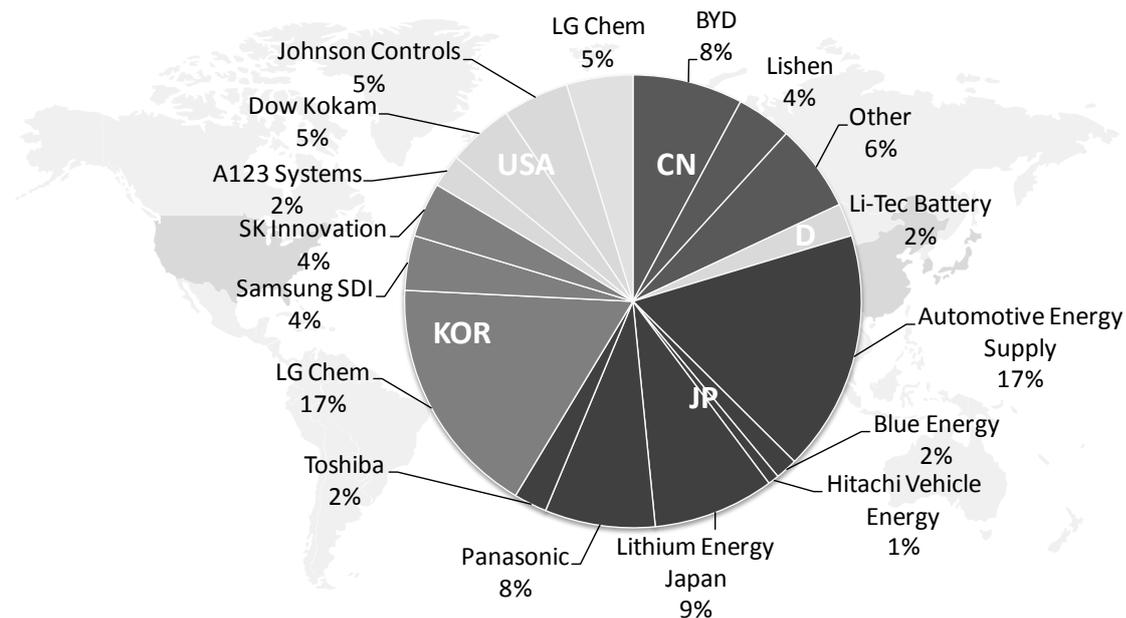


Abbildung 11: Globale Verteilung der Produktionskapazitäten für LiB-Zellen (vgl. Thielmann et al. 2014)

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Abbildung 10 lässt sich für Japan schlussfolgern, dass die dort bestehenden Produktionskapazitäten vorrangig für die Befriedigung der Nachfrage im eigenen Land dienen. Die großen Kapazitäten in Korea werden durch einheimische OEM nur bedingt ausgeschöpft und sind somit primär für den Export bestimmt. Die USA stellen aufgrund ihrer hohen Produktionsmenge an xEV einen starken Nachfragemarkt dar, weshalb dort zunehmend Kapazitäten aufgebaut werden. China wird aufgrund der Marktgröße und dortiger Produktionskosten ein großes Potential für die LiB-Produktion bescheinigt. Bisher sind die dortigen Kapazitäten für elektro-mobiler Batteriesysteme jedoch im globalen Vergleich noch relativ gering (vgl. Thielmann et al. 2014; Fan et al. 2013).

Für eine wettbewerbsfähige Produktion sind Skaleneffekte von hoher Bedeutung. In diesem Kontext spielen die verfügbaren Produktionskapazitäten eine große Rolle (vgl. Jung 1988). Für eine wirtschaftliche Produktion ist jedoch nicht nur die potentiell mögliche Produktionsmenge von Bedeutung, sondern vorrangig die tatsächlich produzierte Menge. Als Maß hierfür dient die Kapazitätsauslastung bzw. im Umkehrschluss die nicht ausgelasteten Kapazitäten, die auch als Überkapazitäten bezeichnet werden. Diese spiegeln sich in Form erhöhter Fixkosten wider und mindern somit die preisorientierte Wettbewerbsfähigkeit (vgl. Welge und Al-Laham 2011). Die bestehenden Produktionskapazitäten sowie deren Auslastung im Jahr 2013 sind in Abbildung 12 dargestellt.

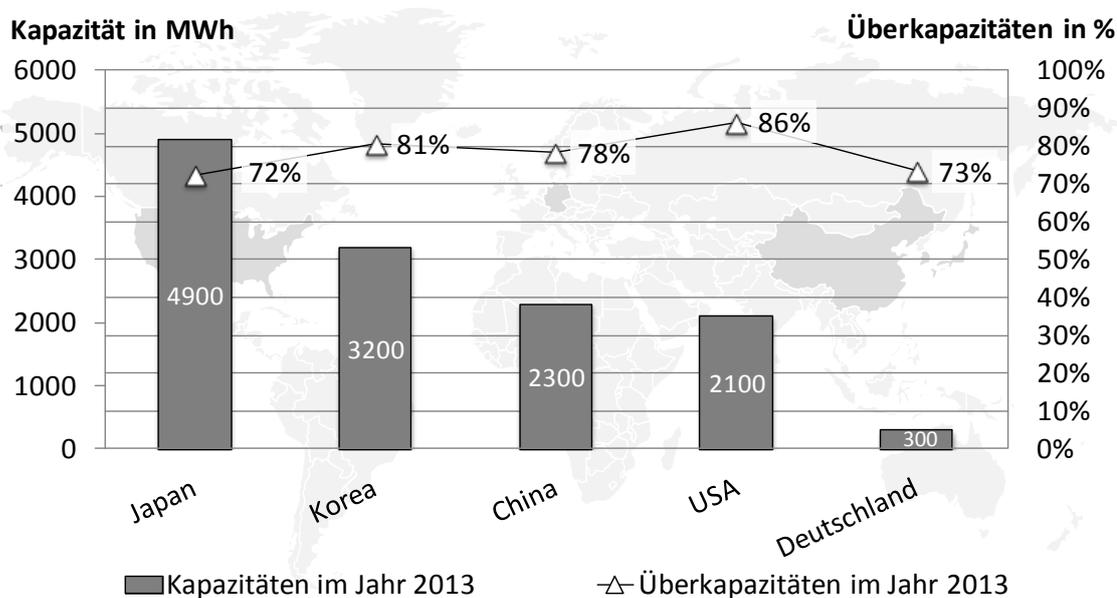


Abbildung 12: Globale Produktionskapazitäten und deren Auslastung (vgl. Thielmann et al. 2014)

Die globalen Überkapazitäten lagen weltweit über einem Wert von 70 % und stellen somit für die Unternehmen eine beachtliche Belastung durch nicht gedeckte Fixkosten dar. Der Hauptgrund für die enormen Überkapazitäten dürfte in der zu optimistischen Einschätzung der Entwicklung des Marktes für xEV liegen. Auffällig hoch sind die Überkapazitäten in den USA. Ein Grund dafür ist vermutlich in den staatlichen Fördermitteln im Rahmen des ARRA zu finden. Durch die Fördermittel konnte in einzelnen Fällen zwischen 50 % und 80 % der Konstruktionskosten einer neuen Fabrik abgedeckt werden. Unternehmen wie A123 Systems und Ener1 hatten jedoch, abgesehen von den Fördermitteln, kaum andere Einkommensquellen, weshalb sie schließlich auch Konkurs anmelden mussten (vgl. Anderman 2013).

2.2.5 Produzierte Produkttechnologie

Die im vorherigen Unterkapitel erläuterten Produktionskapazitäten werden verwendet, um unterschiedliche Produktkonfigurationen herzustellen. Zelltechnologien unterscheiden sich im Wesentlichen anhand ihrer Zellgeometrie und der verwendeten Zellchemie, welche wiederum die technischen Eigenschaften der Zelle stark beeinflussen (vgl. Pistoia 2014; Ketterer et al. 2009). Die Kombination dieser beiden Konfigurationsalternativen unterscheidet sich dabei von Hersteller zu Hersteller. In der nachfolgenden Tabelle 5 ist eine Auswahl an Herstellern sowie deren Zellkonfigurationen dargestellt.

Tabelle 5: Hersteller und deren Produktkonfigurationen von Li-Ionenzellen für BEV (vgl. Anderman 2013)

Hersteller	Zellchemie	Kapazität	Konfiguration	Spannung	Spezifische Energiedichte
	Anode/Kathode	Ah	Zellgeometrie	V	Wh/kg
AESC	G/LMO-NCA	33	Pouch	3,75	155
LG Chem	G/LMO-NMC	36	Pouch	3,75	157
Li Tec	G/NMC	52	Pouch	3,65	152
Li Energy Japan	G/LMO-NMC	50	Prismatisch	3,7	109
Samsung	G/LMO-NMC	64	Prismatisch	3,7	132
Lishen Tianjin	G-LFP	16	Prismatisch	3,25	116
Toshiba	LTO-NMC	20	Prismatisch	2,3	89
Panasonic	G/NCA	3,1	Zylindrisch	3,6	248

Eine detaillierte Erläuterung von Aufbau und Funktion der Li-Ionenzelle erfolgt in Kapitel 3.1 und soll an dieser Stelle nicht Gegenstand der Betrachtung sein. Vielmehr soll das Augenmerk auf die unterschiedliche Ausgestaltung der Zellen gelenkt werden. Bis auf die Unternehmen „Li Energy Japan“ und „Samsung“, deren Zellen sich jedoch in ihrer Kapazität unterscheiden, besitzt kein Unternehmen zu einem Wettbewerber eine identische Zellchemie und -geometrie.

2.2.6 Ausgestaltung der Wertschöpfungstiefe

In den vorangegangenen Kapiteln wurde erläutert, wo und in welcher Menge LiB zurzeit produziert werden. Der Frage, welche Wertschöpfungstiefe bzw. welche Kooperationsformen dabei dominant sind, widmet sich nun dieser Teilabschnitt. Zu diesem Zweck wurden Unternehmen, die in unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen im Bereich der LiB-Produktion aktiv sind, sind in nachfolgender Grafik aufgelistet.

Es zeigt sich, dass eine große Heterogenität bei Unternehmen bezüglich deren Wertschöpfungstiefe und deren Kooperationsformen herrscht.

Die gängigste Variante ist, dass Unternehmen die Wertschöpfungsaktivitäten wahrnehmen, die ihre traditionelle Wertschöpfungsstufe betreffen. Ein Beispiel hierfür ist, dass Panasonic als Zellhersteller seine Zellen an Delphi als Tier1-Zulieferer liefert. Der verbaut diese zu Batteriesystemen und liefert die Systeme an Hyundai, von denen sie in ein xEV eingebaut werden.

Zellhersteller	Tier 1	OEM
Samsung Panasonic Saft	Delphi Denso Magna	BMW Hyundai
Bosch Johnson Controls A123 Systems (ab 2012 zu Wanxiang) Dow Kokam		Audi GM
SK Continental E-Motion (2013-2014) Sk Innovation Continental		Renault
SB Li Motive (2008-2012) Samsung Bosch		Daimler
Johnson Controls-Saft APS (2006-2011) Saft Johnson Controls		
Blue Energy Co. Ltd.		
GS Yusa		Honda
Lithium Energy Japan		
GS Yusa		Mitsubishi
VOLKSWAGEN VARTA Microbattery Forschungsgesellschaft		
Varta		VW
Automotive Energy Supply Corp. (AESC)		
NEC		Nissan
Primearth EV Energy (PEVE)		
Panasonic		Toyota
Shanghai Advanced Traction Battery Systems (ATBS)		
A123 Systems		SAIC
Lithium Energy and Power		
GS Yusa	Bosch	Mitsubishi
BYD		

Abbildung 13: Kooperationsformen und Wertschöpfungstiefen im Bereich der LiB (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)⁴⁹

Eine weitere Form bilden Joint Venture (JV) zwischen OEM und Zellherstellern. Diese Art der Kooperation ist vor allem in Japan stark verbreitet. Darin dürfte auch die Erklärung für die, in Abbildung 10 gezeigte hohe Abdeckung der inländischen Nachfrage liegen. Solche Joint Venture bieten eine gewisse Sicherheit für die Zellhersteller und erleichtern deren Produktions- und Investitionsplanung (vgl. Hettesheimer et al. 2013).

In der Vergangenheit gab es auch einige Joint Ventures zwischen Zellherstellern und Tier1-Zulieferern. Von den drei seit 2006 geschlossenen JV besteht aktuell jedoch keines

⁴⁹ Grafik erstellt auf Basis diverser Pressemitteilungen, mit Informationen aus Pillot 2013 und Hettesheimer et al. 2013.

mehr. Die Gründe hierfür sind von unterschiedlicher Natur. Obwohl gerade diese Zusammenarbeit als sehr fruchtbar erscheint, hat sich diese Kooperationsform bisher offenbar nicht bewährt.

Manche Tier1-Zulieferer haben ihre Wertschöpfungsaktivitäten auch auf den Bereich der Zellherstellung ausgeweitet (bspw. Bosch) oder umfassten als Neugründung direkt beide Wertschöpfungsstufen. Ein solcher Schritt scheint für die Tier1-Zulieferer mit Blick auf das hohe Wertschöpfungspotential bei der Zellherstellung attraktiv zu sein.

Abgesehen von den bereits geschilderten Kooperationen gibt es noch seltenere Wertschöpfungsformen. Das chinesische Unternehmen BYD deckt alle Wertschöpfungsstufen von der Zellherstellung bis zur Integration des Batteriesystems ins Fahrzeug selbst ab. Ebenso interessant ist die Konstellation zwischen dem Zellhersteller GS Yusa und dem OEM Mitsubishi,⁵⁰ die zusammen mit dem deutschen Tier1-Zulieferer Bosch ein weiteres Joint Venture mit dem Namen Lithium Energy and Power gegründet haben.

2.2.7 Zwischenfazit

Die vorangegangene Beschreibung der Rahmenbedingungen verdeutlicht im Kern zwei Sachverhalte: Zum einen, dass die Entwicklung des Marktes für LiB sehr stark von der Entwicklung des Marktes von Elektrofahrzeugen abhängig ist. Der Markt wird wiederum von einer Vielzahl an externen Rahmenbedingungen beeinflusst, die nicht isoliert voneinander wirken, sondern als zusammenhängendes komplexes System interagieren. Zum anderen zeigt sich, dass viele dieser Rahmenbedingungen direkt durch die LiB beeinflusst werden und somit eine Rückkopplung von dieser auf den Markt für Elektromobile besteht. Die nachfolgende Abbildung 14 soll bestehende Interdependenzen und Rückkopplungen zwischen LiB und Elektromobilität nochmals beispielhaft verdeutlichen.

Als nicht-fossiler Energiespeicher ermöglicht sie eine CO₂-freie Fortbewegung und die Schonung von fossilen Brennstoffen. Der Verzicht bzw. die Reduzierung des Verbrennungsmotors verringert die Luft- und Schallemissionen. Für die Politik ist die LiB aufgrund ihrer hohen Wertschöpfung und dem damit einhergehenden volkswirtschaftlichen Potential von großem Interesse. Zuletzt adressiert die LiB auch die zwei prominentesten Hemmnisse für die Diffusion von Elektrofahrzeugen. So werden die Herstellkosten und damit auch die Anschaffungskosten für den Endkunden maßgeblich durch die Batterie bestimmt, ebenso wie die potentielle Reichweite eines Elektrofahrzeugs. Aufgrund des geschilderten eminenten Einflusses auf eine erfolgreiche Diffusion der Elektromobilität wird die LiB auch als Schlüsselkomponente der Elektromobilität bezeichnet. Die bestehenden Wechselwirkungen und Rückkopplungen führen somit dazu, dass der junge Markt für LiB durch eine sehr hohe Komplexität und Unsicherheit geprägt ist.

⁵⁰ Zusammen bilden beide auch das Joint Venture Lithium Energy Japan.

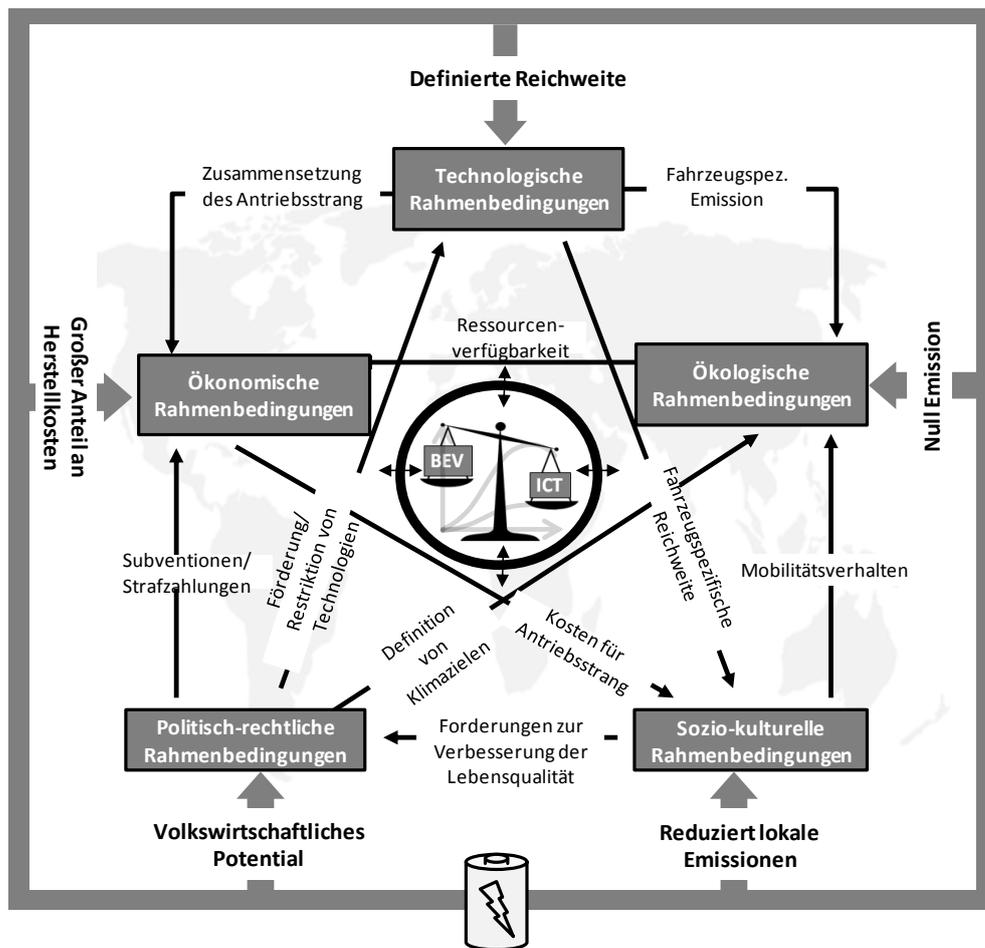


Abbildung 14: Die LiB im komplexen Spannungsfeld der Elektromobilität

Die im globalen Umfeld vorherrschende Unsicherheit spiegelt sich auch im Verhalten der Akteure im Markt für LiB wider. Die Erwartungen über die zukünftige Entwicklung des Marktes und die Entwicklung der Kosten (vgl. Abbildung 9) zeigen eine große Erwartungsspanne auf. Der überwiegende Anteil an Produktionskapazitäten ist derzeit in Japan und Korea installiert. Dies ist jedoch weniger auf einschlägige Standortvorteile in diesen Ländern zurückzuführen, sondern vielmehr historisch bedingt durch die Produktion der Zellen für den Konsumgüterbereich. Mit Blick auf die global installierten Produktionskapazitäten lässt sich festhalten, dass zum Zeitpunkt der Betrachtung massive Überkapazitäten bestehen. Der Grund dafür dürfte weniger darin liegen, dass diese als strategische Markteintrittsbarriere fungieren, sondern vielmehr auf einer Fehleinschätzung der Marktentwicklung beruhen. Die von den Unternehmen produzierten Zellkonfigurationen sind sehr heterogen, sodass sich daraus folgern lässt, dass derzeit noch kein dominantes Design existiert. Ebenso heterogen wie die Konfiguration der Zellen stellt sich die Konfiguration der Wertschöpfungsbeziehungen dar. Es wird derzeit eine Vielzahl unterschiedlicher Kombinationen getestet, wobei sich noch keine als dominant herauskristallisiert hat. Der Anschein wird erweckt, dass sich OEM auch weiterhin auf ihr Kerngeschäft konzentrieren werden und mit Ausnahme im Rahmen von Joint Ventu-

res keine eigene Zellproduktion anstreben. Aufgrund des bisherigen Scheiterns scheinen Joint Ventures zwischen Zellherstellern und Tier1-Zulieferern offenbar keine langfristig tragfähige Option darzustellen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Markt für LiB eine große Dynamik aufweist. Die Unsicherheit im Umfeld und unklare zukünftige Markt- und Technologieentwicklungen führen dazu, dass sich derzeit noch keine klaren Strategien herausbilden. Vielmehr verfolgen Unternehmen sehr unterschiedliche Strategien, die teilweise auch relativ schnell wieder verworfen werden.

3 Stand der Technik

Derzeit gilt die Lithium-Ionen-Batterie als aussichtsreiche Schlüsselkomponente zur Substitution des fossilen Antriebsstrangs. Dieses Kapitel bietet einen Überblick über das Produkt sowie den Markt der LiB. Das Produkt LiB wird bezüglich des Aufbaus, der Funktion und zukünftiger technologischer Entwicklung genauer beschrieben. Anschließend wird der Fokus auf den Herstellprozess der LiB gelegt. Dieser ist mitunter ausschlaggebend für die späteren Batterieeigenschaften und beeinflusst somit den Markterfolg der LiB in kritischer Weise. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung des industriellen Status quo des jungen Marktes für LiB.

3.1 Stand der Produkttechnik

3.1.1 Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen Batterie

Die Energie, die ein elektrischer Antriebsstrang zur Traktion benötigt, muss in diesem gespeichert und in elektrischer Form bereitgestellt werden. Prinzipiell kann die Speicherung von elektrischer Energie anhand unterschiedlicher Technologien erfolgen, z. B. durch einen Kondensator, Schwungräder, Druckluftspeicher, Wasserstoff oder Batterien. Für die Elektromobilität spielt vor allem die Batterie eine entscheidende Rolle, daneben wird als wesentliches zweites alternatives Konzept für Elektroautos die direkte Verstromung von Brennstoffen wie Wasserstoff oder Methan in Brennstoffzellen diskutiert (vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven 2011). Als Batterie werden elektrochemische Energiespeicher bezeichnet, die aus mehreren galvanischen Zellen aufgebaut sind. In einer galvanischen Zelle laufen spontane chemische Reaktionen ab, durch die elektrischer Strom erzeugt wird. Batterien können in unterschiedliche Klassen eingeteilt werden: Im Fall sogenannter Primärbatterien werden die Reaktionsstoffe innerhalb der Zelle bei der Entladung verbraucht. Die Sekundärbatterien, auch Akkumulatoren genannt, unterscheiden sich von den Primärbatterien durch ihre Fähigkeit, nach der Entladung durch die Zuführung von Energie wieder aufgeladen werden zu können. Für die Verwendung als Traktionsbatterie im Fahrzeug sind daher nur Sekundärbatterien relevant (vgl. Kiehne 2000; Ketterer et al. 2009). Die Funktionsweise und der Aufbau einer Sekundärzelle ist in Abbildung 15 am Beispiel einer Lithium-Ionen-Zelle dargestellt.

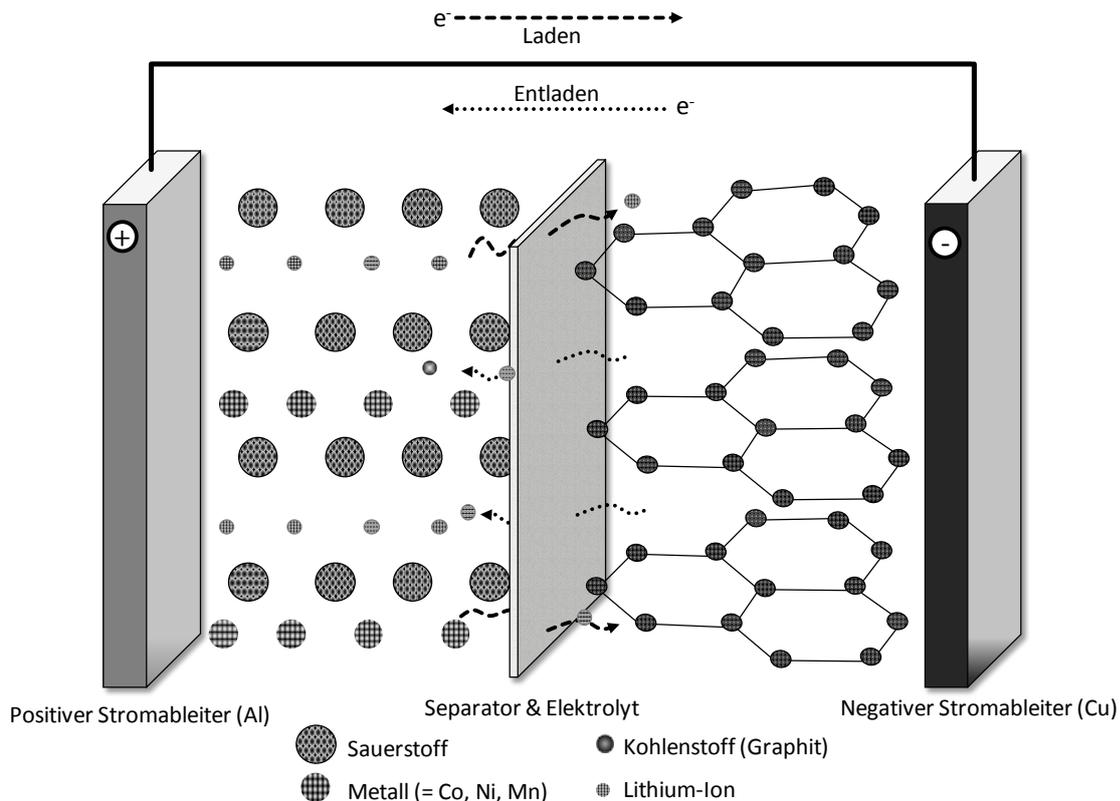


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Li-Ionen Zelle

Die Zelle besteht aus einer Aluminiumelektrode sowie einer Kupferelektrode, die über einen ionenleitenden Elektrolyten miteinander verbunden sind. Der Elektrolyt ist dabei so zu wählen, dass er den Stofftransport der Ionen nicht behindert. In der Regel wird hierzu ein Leitsalz wie Hexafluorophosphat (LiPF_6) und ein hochreines organisches Lösungsmittel verwendet.⁵¹ Die Kathode setzt sich in der Regel aus einem Lithium-Metalloxid zusammen,⁵² während die Anode zumeist aus Graphit besteht. Sie wird vor dem Eindringen des Elektrolyten durch einen dünnen Film geschützt. Diese Grenzschicht bezeichnet man als „Solid Electrolyte Interphase“ (SEI). Sie entsteht während des Herstellungsprozesses durch eine partielle Zersetzungsreaktion des Elektrolyten, hervorgerufen durch das Lithium. Isoliert voneinander werden die Elektroden durch den Separator. Dieser besteht typischerweise aus einem Thermoplasten wie Polyethylen oder Polypropylen. Die Separator-Membran erfüllt dabei den Zweck, einen Kurzschluss zu verhindern und aufgrund seiner für Ionen permeablen Eigenschaft deren Austausch zu ermöglichen.

⁵¹ Neben den flüssigen Elektrolyten werden auch zusätzlich Polymer- und Keramikelektrolyte angewendet (vgl. Daniel 2008)

⁵² Je nachdem welches Metall hierbei verwendet wird, charakterisiert dies die spezifischen Zelleigenschaften in hohem Maße

Die Energiespeicherung im Fall der gezeigten Lithium-Ionen Zelle beruht auf dem Stofftransport der positiv geladenen Li-Ionen. Diese werden beim Aufladeprozess von der Kathode zur Anode transportiert und lagern sich dort im Kristallgitter der Anode ein. Dabei entsteht jedoch keine feste chemische Verbindung. Bei der Entladung werden die Ionen wiederum von der Anode zur Kathode transportiert, wobei am Lastkreis ein Elektronenfluss induziert wird (vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven 2011; Ketterer et al. 2009; Daniel 2008).

3.1.2 Batterietechnologien und deren Eignung für die Elektromobilität

Für die Verwendung von Traktionsbatterien im elektromobilen Umfeld bestehen unterschiedliche Anforderungen an die Leistungseigenschaften der Batterien, entsprechend ihres Einsatzes in hybrid- oder vollelektrischen Fahrzeugen. Für die BEV stellt die Energiedichte eine zentrale Zelleigenschaft dar. Sie bestimmt weitestgehend, wie viel Energie in einer Zelle bzw. Batterie gespeichert werden kann und somit die erzielbare Reichweite des Fahrzeugs. Zwar kann durch den Einsatz von mehr Zellen mit gegebenem Energieinhalt die Reichweite weiter erhöht werden, jedoch steigen hierdurch gleichzeitig das Batterie- und somit auch das Fahrzeuggewicht, wodurch die Reichweite wiederum eingeschränkt wird. Für Hybridfahrzeuge kann die Energiedichte geringer dimensioniert sein, da die benötigte Energie primär über den Verbrennungsmotor generiert wird. Der Fokus liegt hier vorrangig auf der Leistungsdichte, die als Maß für die Energie dient, die für unterschiedliche Fahrmodi zur Verfügung steht. Die potentiell verfügbare Leistung charakterisiert zusammen mit dem Elektromotor, der diese in Traktion umsetzt, die Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeugs. Entsprechend ihres gedachten Einsatzbereichs spricht man auch von Hochenergie- oder Hochleistungszellen. Von konstruktiver Seite aus unterscheiden sie sich vorrangig durch die Elektrodendicke. Während diese bei den Hochenergiezellen bis zu 200 μm betragen kann, liegt sie bei Hochleistungszellen bei lediglich 30 μm . Die geringe Dicke und Porosität der Elektrode soll eine schnelle Li-Ionen-Diffusion und somit Bereitstellung von Leistung ermöglichen. Neben den genannten Designaspekten kommt auch dem verwendeten Elektrodenmaterial eine ausschlaggebende Rolle bei der anwendungsorientierten Auslegung einer Traktionsbatterie zu (vgl. Gaines und Cuenca 2000; Wallentowitz und Freialdenhoven 2011; Anderman 2013; Ketterer et al. 2009).

Die aktuell verfügbaren Sekundärbatterien sind in Abbildung 16 entsprechend ihrer spezifischen Leistung und gravimetrischen Energiedichte dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die verfügbare Batterietechnologie sich teilweise sowohl in Bezug auf ihre Leistungs- als auch in Bezug auf ihre Energiedichte drastisch unterscheiden.

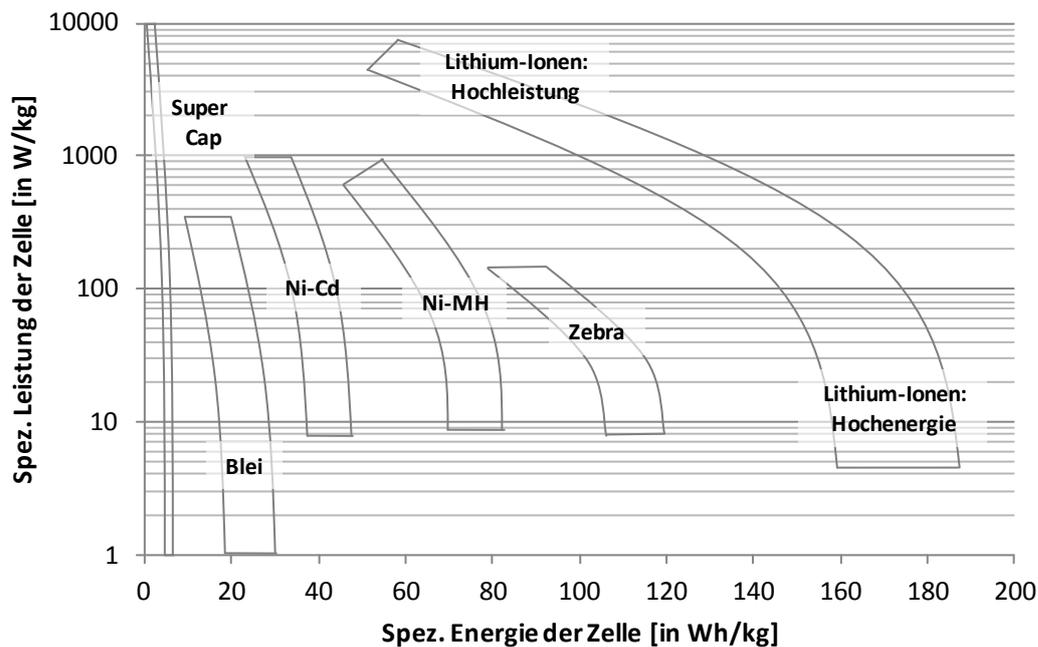


Abbildung 16: Spezifische Leistung und Energie unterschiedlicher Batterietechnologien (vgl. Kalhammer et al. 2007)

Die klassische Autobatterie stellt die Blei-Säure Batterie dar. Sie findet im Fahrzeug primär Einsatz als konventionelle Starterbatterie. Es handelt sich dabei um eine bewährte und relativ kostengünstige Technologie.⁵³ Als nachteilig gelten die geringe Energiedichte und die geringe Anzahl an möglichen Tiefenentladungen, wodurch sich auch eine eingeschränkte Lebensdauer ergibt. Ein weiteres Manko stellt die Entsorgung bzw. das Recycling der Batterie aufgrund ihres hohen Bleianteils dar (vgl. Anderman et al. 2000; Wallentowitz und Freialdenhoven 2011).

Neben den Bleibatterien bilden die nickelbasierten Batterien eine weitere relevante Gruppe von Sekundärbatterien. Die Nickel-Cadmium (Ni-Cd) Batterie besitzt im Vergleich zur Bleibatterie eine höhere spezifische Leistungsdichte und mit ca. 40-60 Wh/kg eine in etwa doppelt so hohe Energiedichte. Die Technik ist bereits seit Jahren etabliert und hat sich als Traktionsbatterie bewährt.⁵⁴ Demgegenüber stehen jedoch, abgesehen von der Verwendung des als umwelt- und gesundheitsschädlich geltenden Schwermetalls Cadmium, das Eintreten des sogenannten „Memory-Effekts“. Dabei handelt es sich um einen bei häufiger Teilentladung auftretenden Kapazitätsverlust der Zelle.

⁵³ Der Preis schwankt in Abhängigkeit des Bleipreises zwischen 40-70 \$/kWh (vgl. Anderman 2013).

⁵⁴ In Frankreich wurden um 1995 bereits 10.000 Elektrofahrzeuge, vorrangig für den Flotteneinsatz bei der Electricité de France, mit Ni-Cd Batterien produziert (vgl. Kalhammer et al. 2007).

Eine vergleichbare Leistungsdichte, bei jedoch merklich höherer Energiedichte, zeichnet die Nickel-Metallhydrid (NiMH) Batterie aus. Sie stellt eine gängige Technik für Traktionsbatterien im Hybridbereich dar und wird u.a. im Toyota Prius eingesetzt.⁵⁵ Sie gilt als sehr sicher, umweltverträglich und hat eine lange Lebensdauer. Nachteilig sind die im Vergleich zu den bereits genannten Batterien hohen Kosten. Es zeichnen sich auch nur beschränkte Möglichkeiten zur weiteren Kostenreduktion ab. Zudem weist sie eine relativ hohe Selbstentladungsrate auf. Ebenfalls ist aus technologischer Sicht das Potential der NiMH-Batterie nahezu ausgeschöpft. In Bezug auf ihre Leistungsdichte sind die zuvor genannten Technologien für den Einsatz in Hybridfahrzeugen durchaus geeignet. Ein rein elektrisches Fahren, das mit den alltäglichen Mobilitätsanforderungen konform geht, ist durch diese jedoch nicht zu realisieren. Eine Alternative würde die Natrium-Nickelchlorid-Batterie (auch Zebra-Batterie genannt) darstellen. Sie besitzt eine hohe Lebensdauer und erreicht eine Energiedichte von bis zu 120 Wh/kg⁵⁶. Zudem sind die Materialien voll recyclingfähig. Bei der Zebra-Batterie handelt es sich um eine Hochtemperatur-Batterie. Dies bedeutet, dass erst ab einer Betriebstemperatur von ca. 300 °C Energie zur Verfügung gestellt werden kann. Dieser Umstand bedingt eine permanente Heizung der Batterie, damit diese auf dem entsprechenden Temperaturniveau gehalten werden kann. Im Ruhezustand des Fahrzeugs führt dies zu einer relativ schnellen Entladung der Batterie. Auch wenn die Zebra-Batterie bereits in Flottenversuchen untersucht und im Modell „TH!NK city“ des Unternehmens „Think“ eingesetzt wurde, konnte sie sich im Bereich der Traktionsbatterien nicht durchsetzen (vgl. Anderman 2013; Ketterer et al. 2009; Wallentowitz und Freialdenhoven 2011; Mock 2010).

3.1.3 Die Lithium-Ionen-Batterie: Zellchemie, -geometrie und Ausblick

Lithium-Ionen-Batterien stellen kurz- bis mittelfristig für eine rein elektrische Alltagsmobilität die zukunftsreichste Technologiealternative dar. Bei dem Element Lithium handelt es sich nicht nur um das leichteste Metall, sondern ebenfalls um das elektronegativste im Periodensystem. Die LiB verfügt aufgrund dieser Eigenschaften über eine ca. 30 % höhere Energiedichte als die NiMH-Batterie und ist zudem um 50 % leichter. Die unterschiedlichen technischen Ausprägungen der Batteriesysteme sind in Tabelle 6 für die Anwendung in einem HEV beispielhaft zusammengefasst.

⁵⁵ Ni-MH Batterien wurden bis zur 3. Generation des Prius verwendet.

⁵⁶ Der Wert bezieht sich auf die Energiedichte des im Fahrzeug verbauten Batterie-Packs.

Tabelle 6: Technische Eigenschaften unterschiedlicher Batterietypen (vgl. Anderman 2013)

Kriterium	Bleisäure	NiMH	Li-Ionen
Energiedichte (Wh/kg)*	35	60	120
Zellspannung (V)	2	1,2	3,65
Zyklusbeständigkeit	4.500	2.000	3.500
Kosten (\$/kWh)*	130	950	1500

*Auf Systemebene

Die geringe Atomgröße ermöglicht den Li-Ionen innerhalb der Zelle eine hohe Beweglichkeit, wodurch kurze Ladezeiten und eine lange Lebensdauer erreicht werden. Die Nachteile der LiB lagen lange Zeit in der hohen Reaktivität des Lithium mit Wasser oder anderen Lösungsmitteln. Für heutige Zellen spielt dies aufgrund verbesserter Zellgestaltung keine kritische Rolle mehr. Als größeres Hindernis wird der hohe Preis der Batterien von ca. 1500 \$/kWh (im Jahr 2013) wahrgenommen.⁵⁷ Im Vergleich zu den NiMH Batterien, bietet sich jedoch noch großes Potential zur Kostenreduktion. Die Höhe des letztendlich resultierenden Zellpreises sowie deren genauen technischen Eigenschaften hängen stark von der Wahl der für die Kathode verwendeten Li-Metalloxide ab (vgl. Anderman 2013; Mock 2010; Kalhammer et al. 2007; Wallentowitz und Freialdenhoven 2011). Derzeit werden vorrangig folgende Kathodenmaterialien für Traktionsbatterien eingesetzt, die zu den Batteriekonzepten der zweiten Generation gezählt werden:⁵⁸

Die Manganspinell-Oxide (LiMn_2O_4 , kurz LMO) zeichnen sich durch eine hohe Sicherheit bei Überladung, eine hohe thermische Stabilität und geringe Materialkosten aus. Ihre Kapazität liegt bei etwa 120 mAh/g. Schwierigkeiten ergeben sich durch ungewünschte Nebenreaktionen, die zu einer Reduzierung der Lebensdauer führen.

Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (LiNiCoAlO_2 , kurz NCA) besitzen sowohl eine hohe Leistungsdichte und hohe Lebensdauer als auch eine hohe spezifische Kapazität von 160-180 mAh/g. Von Nachteil sind die geringe thermische Stabilität sowie hohe Materialkosten, wobei je nach Entwicklung der Nickel- und Kobaltpreise noch Preissenkungspotential besteht.

Das Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (LiNiMnCo_2 , kurz NMC) zeichnet sich im Vergleich zum NCA durch eine höhere thermische Stabilität und geringere Kosten aus, während die Energiedichte mit 150 mAh/g etwas geringer ausfällt.

⁵⁷ Die Kosten (jeweils auf Systemebene) für Bleisäurebatterien betragen ca. 130 \$/kWh und für NiMH Batterien liegen sie bei 950 \$/kWh (vgl. Anderman 2013)

⁵⁸ Batteriekonzepte erster Generation nutzen Lithium-Kobaltdioxid (LiCoO_2 , kurz LCO) als Elektrodenmaterial. Hauptanwendungsgebiet hierfür ist der Consumer-Bereich (vgl. Peters et al. 2013).

Die Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LiFePO₄, kurz LFP) verfügen im Unterschied zu den Oxiden über eine höhere chemische Stabilität. Dadurch lassen sich eine hohe Lebensdauer und Sicherheit realisieren. Zudem ist sie umweltverträglich und relativ günstig. Die Kapazität beträgt ca. 160 mAh/g und entspricht somit in etwa der von NMC (vgl. Anderman 2013; Mock 2010; Kalhammer et al. 2007; Wallentowitz und Freialdenhoven 2011; Peters et al. 2013).

Mittelfristig werden Batteriekonzepte der dritten Generation zur Verfügung stehen⁵⁹. Insgesamt soll die vornehmlich anhand der Kathodenmaterialien vorgenommene Einteilung von LiB-Generationen auf die Weiterentwicklung der Technologie hin zu Hochenergie-/Hochleistungsbatterien hinweisen. FuE Arbeiten sowie die Validierung der LiB durch OEM, haben in den letzten Jahren zu der Einschätzung geführt, dass LiB auf Basis von Hochenergie-NMC-Kathoden mit reduziertem Co-Anteil und erhöhtem Ni-Anteil bis zum Jahr 2020 sowie in Ergänzung mit Hochkapazitätsanoden⁶⁰ auch nach 2020 zu weiteren Energiedichteerhöhungen führen können. Die Forschung konzentriert sich dabei zudem auf großformatige Zellen (z. B. gegenüber den 18650er oder 21700er⁶¹ Zellen von Panasonic mit > 250 Wh/kg, welche in BEV von Tesla eingesetzt werden) (vgl. Thielmann et al. 2015).

Langfristig werden durch Batterien der vierten Generation (i.d.R. Synonym zu „post-LiB“) gänzlich neue Möglichkeiten für die Elektromobilität eröffnet werden. Große Hoffnungen werden hierbei insbesondere in die Lithium-Schwefel-Batterie (LiS), Li-Luft Batterie (LiO) oder weitere Metall-Luft Systeme sowie Feststoff (All-Solid-State-Ansätze) gesetzt (vgl. Thielmann et al. 2015). Aufgrund ihrer hohen Energiedichte könnte langfristig durch ihren Einsatz in Elektroautos eine deutliche Reichweitensteigerung realisiert werden.

Die Anode der LiS Batterie wird aus Schwefel hergestellt. Wegen der relativ geringen Dichte können theoretisch Energiedichten erreicht werden, die um den Faktor 3 bis 4 höher liegen als die derzeitiger LiB. Diese Werte wurden bis dato jedoch nicht annähernd erreicht. Zudem führen zahlreiche Nebenreaktionen zu kapazitäts- und lebensdauerreduzierenden Effekten. Im Laborumfeld ließen sich bisher einige hundert Ladezyklen verwirklichen.⁶² Zudem lässt sich die kalendarische Lebenszeit einer LiS-Zelle derzeit nur schwer einschätzen. Die erwarteten Kosten liegen bei etwa 250 €/kWh auf Systemebene. Mit einer Einführung von LiS-basierten Systemen in elektromobilen Fahrzeugen wird nicht vor dem Jahr 2030 zu rechnen sein. Andere Ansätze, wie etwa Li-

⁵⁹ Für Elektroautos auch weiter optimierte LiB.

⁶⁰ Auf Si-C-Komposit, statt Graphit-Basis.

⁶¹ Die Bezeichnung 18650 bezieht sich auf die Maße der zylindrischen Zellen. Sie besitzt in der Regel einen Durchmesser von ca. 18 mm und eine Höhe von ca. 65 mm.

⁶² Eine LiB besitzt eine Beständigkeit von ca. 2500-3500 Zyklen (vgl. Thielmann et al. 2012; Pistoia 2014).

Feststoff-Batterien, kämen für eine Anwendung im Elektromobil ebenfalls erst um das Jahr 2030 in Frage (vgl. Thielmann et al. 2012; Peters et al. 2013; Thielmann et al. 2015).

Die Lithium-Luft-Batterie zeichnet sich durch eine extrem hohe Energiedichte aus, die um den Faktor 7-10 größer ist als die heutiger Systeme. Diese als Optimum für lithiumbasierte Systeme erachtete Energiedichte wird dadurch ermöglicht, dass die Luft direkt aus der Umgebung verwendet werden kann und die Kapazität somit allein von der Anodengröße bestimmt wird. Derzeit existiert noch kein über eine nennenswerte Anzahl an Zyklen funktionsfähiger Prototyp. Mit einem Einsatz in Elektromobilen ist daher auch in diesem Fall nicht vor 2030 zu rechnen. Gleiches gilt für nicht-lithiumbasierte Zellen, wie die Aluminium- oder Magnesium-Luft-Batterie. Lediglich die Zink-Luft-Batterie könnte bereits um 2020 verfügbar sein.

Als Zwischenfazit lässt sich somit festhalten, dass radikale Konzepte erst um das Jahr 2030 in elektrischen Fahrzeugen zum Einsatz kommen werden. Bis dahin ist mit einer stetigen Weiterentwicklung der Li-Ionen-Batterie in Richtung Hochenergie und Hochvolt zu rechnen. Die optimierte Lithium-Ionen-Batterie wird also mittelfristig noch den Status-quo der Batterietechnik darstellen (vgl. Thielmann et al. 2012; Peters et al. 2013).

Li-Ionen-Zellen können nicht nur bezüglich der verwendeten Zellchemie unterschieden werden, sondern auch entsprechend ihrer Zellgeometrie. Gegenwärtig finden drei unterschiedliche Formen in der Praxis Verwendung: die zylindrische Zelle, die Flachzelle und die prismatische Zelle.

Ausgangspunkt jedweder Zellgeometrie stellen die bereits in Abbildung 15 beschriebenen Grundelemente einer Zelle dar. Je nachdem, welche Form das Zellgehäuse hat, wird die Zelle bei dem Produktionsschritt der Zellausbaueinheit unterschiedlich in das Gehäuse eingebracht. Während Flachzellen sowohl gestapelt als auch gewickelt werden können, werden die zylindrischen und prismatischen Zellen in der Regel gewickelt. Die unterschiedlichen Zellformen sowie ein Querschnitt der jeweiligen Zellen sind in Abbildung 17 beispielhaft abgebildet.

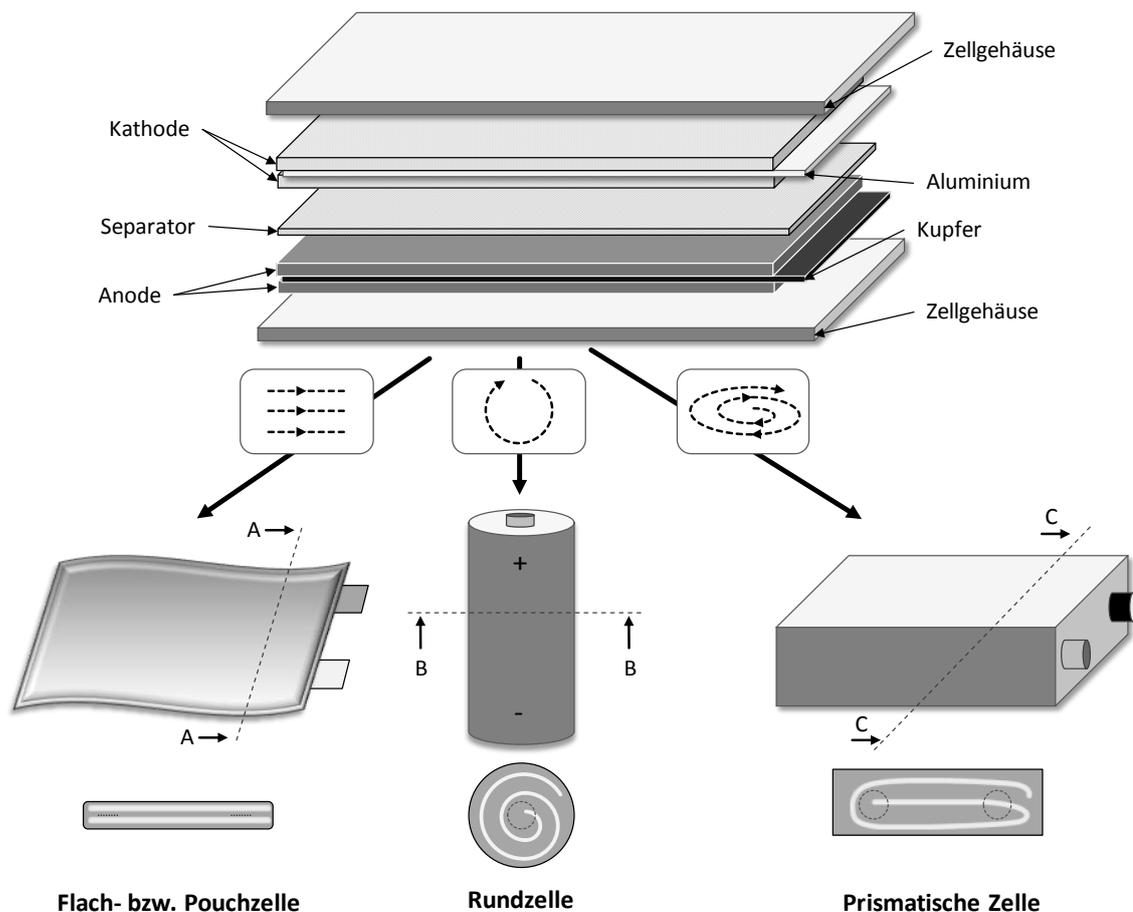


Abbildung 17: Übersicht gängiger Zellgeometrien

Je nach verwendeter Geometrie weisen die Zellen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf, welche in Tabelle 7 zusammengefasst sind.

Tabelle 7: Eigenschaften unterschiedlicher Zellformen

	Zellform		
	Zylindrisch	Prismatisch	Pouch
Mech. Stabilität	↑	→	↓
Raumausnutzung	↓	↑	↑
Durckbeständigkeit	↑	↑	↓
Thermische Eigenschaften	↓	→	↑

Wird für eine Zelle ein flüssiger Elektrolyt verwendet, wird die Zelle zumeist in zylindrischer oder prismatischer Bauform produziert. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Dichtigkeit sind die Zellgehäuse dabei aus Metall und relativ starr. Durch diese Bauform besitzen sie eine hohe mechanische Stabilität und Druckbeständigkeit. Hierbei sind zylindrische Zellen den prismatischen leicht überlegen. Diese wiederum können jedoch aufgrund ihrer Bauform besser gestapelt werden und können den vorhandenen

Bauraum effizienter ausnutzen. Die größere Zellgehäusefläche ermöglicht zudem eine bessere Wärmeabfuhr aus der Zelle. Diese Eigenschaft ist auf Seiten der Flachzellen nochmals besser ausgeprägt. Durch die Verwendung einer Polymer-Matrix kann hier auf einen flüssigen Elektrolyten und die Verwendung eines starren metallischen Gehäuses zugunsten von z. B. Aluminiumverbundfolien verzichtet werden. Durch den daraus resultierenden dünnen flexiblen Aufbau weisen sie die beste Raumausnutzung auf. Gleichzeitig ergeben sich aus diesem Design auch Nachteile, wie etwa die schlechtere Beständigkeit gegen Druck oder mechanisches Einwirken. Daher wird ein Teil des eingesparten Gewichts auf Systemebene wieder eingebüßt, um die Zelle gegen derlei Einflüsse zu schützen. Zudem ist eine hermetische Abdichtung der Flachzelle für einen Zeitraum von 10-15 Jahren kaum zu realisieren und es werden hohe Anforderungen an die Reinheit von Materialien und die Prozessqualität gestellt, um eine zellinterne Gasentwicklung zu unterbinden (vgl. Anderman 2013; Harrop und Das 2010; Ketterer et al. 2009; Hettesheimer et al. 2013).

3.1.4 Aufbau und zentrale Komponenten eines Batteriesystems

Die Energie einer einzelnen Zelle ist bei weitem nicht ausreichend, um ein Fahrzeug anzutreiben. Aus diesem Grund werden mehrere Zellen parallel oder seriell zu Modulen zusammengeschaltet. Die einzelnen Module werden dann wiederum zu einem Batteriesystem zusammengefasst. Anzahl und Art der verschalteten Zellen und Module richtet sich letztendlich nach der angestrebten Betriebsart des Fahrzeugs (vgl. Ketterer et al. 2009).

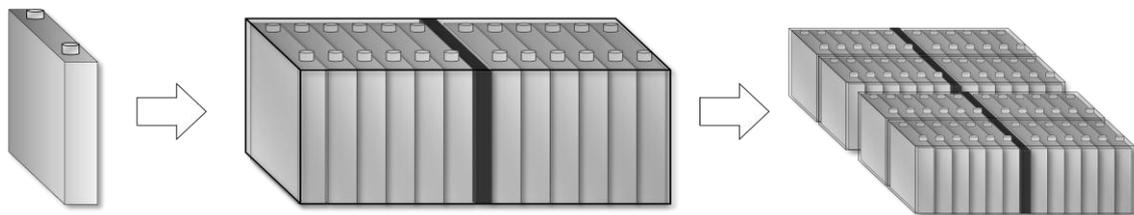


Abbildung 18: Zusammensetzung eines Batteriesystems

Damit die Zelle bzw. das Batteriesystem die ihm zugedachte Funktion sicher und bestmöglich erfüllen kann, sind noch weitere ergänzende Komponenten notwendig. Diese werden unter dem Batteriemanagementsystem (BMS) zusammengefasst. Dessen Aufgabe liegt im intelligenten und optimierten Betrieb der Batterie, wodurch Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Batteriesystems erhöht werden. Aus diesem Grund sind in den einzelnen Modulen diverse Sensoren zur Temperatur-, Spannungs- oder Strommessung eingebracht. Daraus lässt sich der aktuelle Batteriezustand ableiten, der auch als „State-of-Charge“ (SOC) bezeichnet wird. Und es können z. B. Rückschlüsse über die verbleibende Reichweite gezogen werden. Eine weitere bedeutende Aufgabe des BMS liegt in der Lade- und Entladesteuerung, da es bei den jeweiligen Vorgängen ohne eine gezielte Steuerung zu extremen Ungleichgewichten zwischen den Zellladezuständen kommen könnte, wodurch etwa ein weiteres Laden der

seriell nachfolgenden Zellen nicht mehr möglich wäre. Für eine optimale Lebensdauer und einen optimalen Betrieb ist daher ein Ausgleich zwischen den Zellen notwendig. Im Rahmen des Sicherheitsmanagements werden Kurzschlüsse detektiert und der Batteriebetrieb durch einen Sicherheitsschaltkreis unterbunden. Letztlich obliegen auch der Betrieb der Batterie in ihrem optimalen Temperaturbereich und das damit einhergehende Thermomanagement dem Batteriemanagementsystem. Derzeitige Kühlsysteme werden entweder mit Luft, Kühlmittel oder Kältemittel betrieben. Dem BMS kommt nicht nur die Steuerung des Batteriesystems zu, sondern es fungiert gleichzeitig als Kommunikationsschnittstelle mit externen Systemen wie der Motorsteuerung oder dem Diagnosegerät (vgl. Friel 2010, 2014; Ketterer et al. 2009). In Abbildung 19 ist das gesamte Batteriesystem mit den zuvor beschriebenen Komponenten abgebildet.

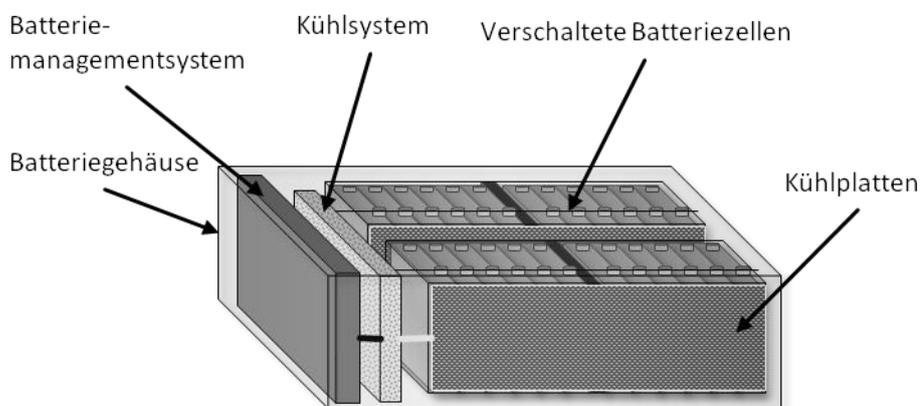


Abbildung 19: Schematische Abbildung des kompletten Batteriesystem

3.2 Stand der Prozesstechnik

Während im vorangegangenen Unterkapitel der Fokus auf das Produkt Lithium-Ionen-Batterie gelegt wurde, wird im nachfolgenden der zu deren Herstellung notwendige Produktionsprozess genauer erläutert.

3.2.1 Herstellungsprozess einer LiB

Der Herstellungsprozess einer LiB kann in etwa in vier Teilbereiche unterteilt werden: Elektrodenfertigung, Zellausbaueinrichtung, Modulmontage und Batteriesystemmontage. Jeder dieser Teilbereiche umfasst dabei eine Reihe von Produktionsschritten, die je nach der angestrebten Zellgeometrie und dem Verwendungszweck des Batteriesystems leicht divergieren können. Im Wesentlichen handelt es sich jedoch um die in Abbildung 20 dargestellten Prozessschritte.

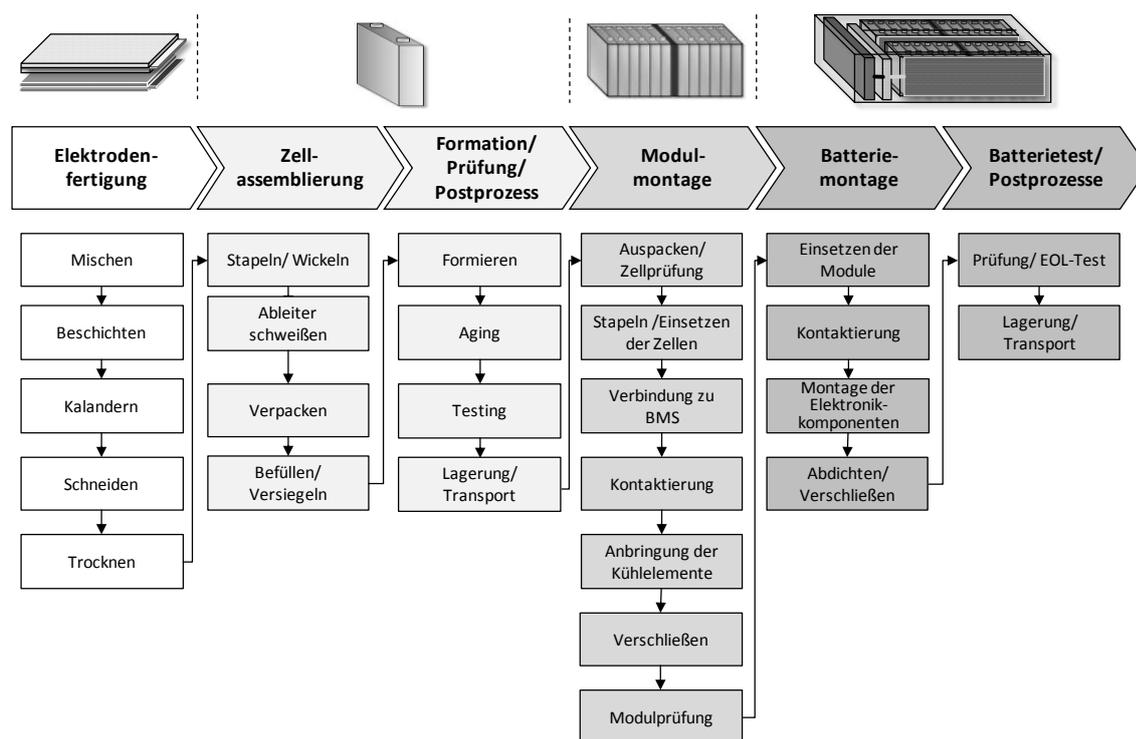


Abbildung 20: Herstellungsprozess einer Lithium-Ionen-Batterie (vgl. Hetteshheimer et al. 2013)

Die einzelnen Prozessschritte sollen im Folgenden im Detail erläutert werden. Um darüber hinaus ein möglichst plastisches Bild von dem hierzu notwendigen Produktionssystem zu vermitteln, werden zusätzlich die damit einhergehenden Investitionen, Personal- sowie Platzbedarfe der technischen Anlagen, die zur Produktion eines Batteriesystems benötigt werden aufgeführt. Die derzeit verfügbaren Informationen, insbesondere in Bezug auf die Investitionen für Produktionsanlagen, sind entweder kaum existent oder weisen eine hohe Heterogenität auf und sind daher kaum miteinander zu vergleichen. So wird in der Literatur teilweise die zu fertigende Batterie nicht ausreichend spezifiziert, um Rückschlüsse über die Anzahl der zu fertigenden Zellen ziehen zu können.⁶³ Oder Informationen zu den Investitionen werden nicht in der notwendigen Auflösung dargestellt.⁶⁴ Ein Ansatz, der die geschilderten Informationen in der geforderten Detaillierung bietet ist das „Battery Performance and Cost model“ (BatPaC), das vom Argonne National Laboratory entwickelt wurde. Das Microsoft Excel-basierte Bottom-up-Kostenmodell erlaubt es dem Anwender, eine LiB im Detail von der Wahl der Zellchemie (z. B. Elektrodenmaterialien und -dicke) bis hin zum konkreten Batteriedesign (z. B.

⁶³ Schlick et al. 2011 setzen die Investitionen in Relation zu einer hochautomatisierten Fertigung von ca. 100.000 EV-Äquivalenten mit einer Kapazität von je 20 kWh.

⁶⁴ Kampker et al. 2012 geben teilweise technische Spezifikationen für die einzelnen Prozesse an sowie Eigenschaften und Anzahl der produzierten Zellen. Angaben bezüglich der notwendigen Investitionen werden jedoch nur für den gesamten Teilbereich gegeben.

Anzahl, Eigenschaft und Schaltung der Zellen, Kühlsystem etc.) selbst zu konfigurieren. Auf Basis des erstellten Batteriesystems und der angestrebten Produktionsmenge werden die in einem Produktionsschritt benötigten Anlagenkapazitäten sowie die notwendige Produktionsinfrastruktur bestimmt. Über die daraus resultierenden Gesamtkosten können die Herstellkosten eines spezifischen Batteriesystems bestimmt werden. Einen wesentlichen Vorteil des Modells stellt dessen Transparenz und Validität dar. Die zugrundeliegenden Daten und Zusammenhänge können dem Excel-Modell detailliert entnommen werden. Zudem wurde das Modell mit entsprechenden Experten aus Industrie und Forschung umfassend validiert (vgl. ANL 2012). Im Folgenden wird die Produktion eines Batteriesystems bestehend aus 60 Batteriezellen mit einer Energiekapazität von 40 Ah beispielhaft beschrieben. Von dem Batteriesystem mit einer Kapazität von 8,7 kWh werden 100.000 Stück pro Jahr produziert. Bei der Zellchemie handelt es sich um NCA und Graphit⁶⁵.

3.2.2 Elektrodenfertigung

3.2.2.1 Mischen

Ausgangspunkt jeglicher Zellproduktion ist die Herstellung der Elektroden. Hierzu werden die chemischen Komponenten der Elektrodenbeschichtung mit Binde-⁶⁶ und Lösungsmitteln⁶⁷ sowie Additiven⁶⁸ zu einer Paste vermischt. Der Prozess des Mischens kann dabei auf unterschiedliche Weise durch Mischen und Dispergieren erfolgen. Die Schwierigkeit in diesem Prozessschritt liegt darin, trotz der dispersen Feststoffe eine hohe Homogenität zu erreichen und diese auch bis zum Trocknungsprozess zu wahren, ohne dass es zur Bildung von Agglomerationen kommt (vgl. Hettesheimer et al. 2013; Heimes 2014).

Zur Produktion der 100.000 Batteriesysteme mit einer Gesamtkapazität von 870.000 kWh werden entsprechend dem Modell 1.700.000 kg/a positives Aktivmaterial zur Herstellung der Kathoden und 1.210.000 kg/a negatives Aktivmaterial zur Herstellung der Anoden benötigt. Zur Produktion des positiven Aktivmaterials bedarf es je 3 Tanks zum Mixen und zum Speichern mit je 1.000 l positivem und mit je 900 l negati-

⁶⁵ Angaben im BatPaC-Modell sind in US-Dollar und beziehen sich auf eine ausgereifte Fertigung im Jahr 2020. Die resultierenden Kosten werden von ANL jedoch inflationsbereinigt auf das Jahr 2010 zurückgerechnet.

⁶⁶ Das Bindemittel dient einem verbesserten Zusammenhalt der Elektrodenstruktur sowie der Steigerung der Haftfähigkeit auf der Trägerfolie (vgl. Porcher et al. 2010).

⁶⁷ Lösungsmittel dienen der Erreichung einer optimalen Viskosität (vgl. Heimes 2014).

⁶⁸ Additive wie z. B. Ruß-Partikel sollen die Leitfähigkeit steigern (vgl. Hettesheimer et al. 2013; Heimes 2014).

vem Elektrodenmix.⁶⁹ Die Arbeit erfolgt im Drei-Schichtbetrieb. Die notwendigen Anlageninvestitionen liegen für positives und negatives Material bei jeweils 2 Mio. \$ (vgl. ANL 2012).⁷⁰

3.2.2.2 Beschichten

Die Beschichtungspaste (auch „Slurry“ genannt) wird in diesem Prozess beidseitig auf die Trägerfolien aufgetragen. Dabei handelt es sich im Fall der Kathode um Aluminium, während die Trägerfolie der Anode meist aus Kupfer besteht. Die Folien werden auf einer Breite von etwa 1300 mm mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 30 m/min beschichtet.⁷¹ Die Schichtdicke ist dabei abhängig von dem beabsichtigten Einsatzbereich der Zelle⁷² und liegt zwischen 20 µm und 250 µm. Die Herausforderung besteht in der Schaffung einer homogenen Schichtdicke über die gesamte Bahnbreite hinweg. Unmittelbar an den Beschichtungsprozess schließt sich die Trocknungsphase an. Die Dauer des Trocknens korreliert dabei direkt mit der Bandgeschwindigkeit des Beschichtungsvorgangs und der Beschichtungsdicke. In der Regel sind die Öfen zwischen 30 m und 50 m lang. Durch die Trocknung wird nicht nur der Feuchtegrad des Slurry reduziert, sondern auch die zuvor zugefügten Lösungsmittel verdampft und entweder wieder zurückgewonnen oder thermisch verwertet (vgl. Hetteshaimer et al. 2013; Heimes 2014).

Für die definierte Batteriemenge muss für die positive und negative Elektrode eine Zellfläche von 8.170.000 m²/a beschichtet werden. Die maximale Rate einer hierfür installierten Anlage wird auf 13.000.000 m²/a geschätzt. Die überschüssigen Kapazitäten dienen zum einen wiederum als Reserve, zum anderen wird jedoch auch aus konstruktiven Gründen nicht die komplette Zellfläche beschichtet. Für die Beschichtungsanlagen (bei einer Schichtdicke von 100 µm) sind Investitionen von ca. 8 Mio. \$ für die positive und 8 Mio. \$ für die negative Elektrode notwendig. Zudem fallen weitere 3 Mio. \$ zur Rückgewinnung von 1.527.000 kg Lösungsmittel an (vgl. ANL 2012).

3.2.2.3 Kalandern

Nach der Trocknung wird das Elektrodenmaterial zu sogenannten „Coils“ aufgewickelt. Beim anschließenden Kalandern werden diese nach dem Transport wieder abgewickelt und die Elektrodendicke durch rotierende Walzen bei Drücken von um die 1.500 N/mm² verdichtet, bis eine vordefinierte Porosität erreicht wird. Anschließend werden die

⁶⁹ Die überschüssigen Kapazitäten (ca. 25 %) dienen als Reserve bei ungeplantem Stillstand. Solche Sicherheitsfaktoren finden sich auch in den nachfolgenden Prozessen wieder und werden daher nicht mehr explizit genannt.

⁷⁰ Gesamtkosten inklusive der Anlageninstallation.

⁷¹ Bis zum Jahr 2030 sollen Geschwindigkeiten von 100 m/min und Beschichtungsbreiten von ca 2 m erreicht werden (vgl. Maiser et al. 2014).

⁷² Vgl. Kapitel 3.1.2

Folien wieder zu Coils aufgerollt. Wichtig ist dabei wiederum eine homogene Schichtdicke, weshalb zumeist druckgesteuerte Kalandrierer eingesetzt werden, um eventuelle Unebenheiten durch entsprechende Variation des Drucks auszugleichen (vgl. Hettesheimer et al. 2013; Heimes 2014).

Die Kalandrierer müssen eine mit der Beschichtungsanlage vergleichbare Produktionsrate aufweisen, damit eine kontinuierliche Produktion realisiert werden kann. Die Investitionen sind jedoch mit 1 Mio. \$ deutlich geringer.

3.2.2.4 Schneiden

Die Coils weisen nach dem Kalandrieren noch eine der Beschichtungsanlage entsprechende Breite auf. Beim Schneiden werden sie dann mittels Rollmesser oder Laserstrahl in 100 mm bis 300 mm breite Folienstreifen zerteilt und entweder anschließend wieder zu Coils aufgewickelt oder nochmals weiter in einzelne Sheets unterteilt. Erfolgt der Schnitt durch ein Rollmesser, besteht die Gefahr eines Abplatzens des Aktivmaterials, während bei einem Laserschnitt ein Wärmeeintrag in das Aktivmaterial erfolgt und metallurgische Prozesse initiieren kann (vgl. Hettesheimer et al. 2013; Heimes 2014). Eine Anlage zum Schneiden schlägt mit Investitionen von ca. 2 Mio. \$ zu Buche (vgl. ANL 2012).

3.2.2.5 Trocknen

Die spätere Zellqualität und -lebensdauer steht in engem Zusammenhang mit der Restfeuchte der Elektroden bei der Zellaufbauung. Aus diesem Grund werden die Elektroden nach dem Schneiden separiert, nach Polarität in Stapeln über mehrere Stunden in Vakuumöfen getrocknet und erst wieder im Trockenraum zur Zellaufbauung entnommen (vgl. ANL 2012).

Die Anzahl der Vakuumöfen richtet sich nach der Menge an Elektrodenmaterial, die es zu trocknen gilt. Für die insgesamt 2.950.000 kg/a werden 8 Trockner mit je 600 kg Kapazität benötigt. Die Investitionen liegen bei ca. 1.6 Mio. \$ (vgl. ANL 2012).

3.2.3 Zellaufbauung

Die zuvor beschriebenen Schritte der Elektrodenherstellung sind im Wesentlichen unabhängig von der späteren Zellgeometrie. Dies ändert sich jedoch in der Phase der Zellaufbauung. Die Zellen liegen nach dem Schneiden entweder einzeln vor und werden anschließend gestapelt oder sie liegen als Bahn vor und werden gewickelt. Die daran anschließenden Phasen des Verpackens und die des Befüllens/Einbringens in das Gehäuse sind im Wesentlichen wiederum für alle Zellgeometrien gleich. Im Folgenden wird der Fokus auf die Aufbauung einer prismatischen Zelle gelegt.⁷³ Der gesamte

⁷³ Eine genaue Beschreibung der Zellaufbauung für andere Zellgeometrien findet sich in Kampker 2014

Prozess der Zellassemblierung findet aus Gründen der Korrelation von Feuchtigkeit in der Zelle mit der Lebensdauer und Leistung der Batterie im Trockenraum statt (vgl. Hettesheimer et al. 2013; Heimes 2014).

3.2.3.1 Stapeln

Zunächst werden die im vorangegangenen Prozess aus der Rolle geschnittenen Sheets übereinander gestapelt. Es werden somit mehrere Schichten bestehend aus Anode, Separator, Kathode, Separator, Anode usw. gebildet. Der Separator wird oftmals als Rollenware nach jedem aufgelegten Sheet gefaltet, sodass die einzelnen Sheets jeweils separat von der Seite eingeführt werden, der Separator jedoch an einem Stück bleibt, bis die gewünschte Zelldicke erreicht ist. Bei dem Prozess handelt es sich um eine typische Pick & Place-Anwendung, wobei hohe Anforderungen an die Stapelgenauigkeit gestellt werden (+/- 0,2 mm) (vgl. Kampker 2014; Heimes 2014).

Die Stapelgeschwindigkeit für die definierte Zelle beträgt ca. 5 Zellen pro Minute. Damit die geforderte Zellmenge von 6.320.000 Zellen/a⁷⁴ erreicht wird, werden somit 4 Stapelheiten a 1 Mio. \$ benötigt (vgl. ANL 2012).

3.2.3.2 Zelleiter schweißen

Die Ableiter der Elektroden werden in diesem Prozessschritt mittels Ultraschallschweißen an die korrespondierenden Kontaktfahnen geschweißt. Dabei werden aufgrund der Schmelztemperatur, identische Werkstoffpaarungen verwendet. Das Ultraschallschweißen bietet den Vorteil eines vergleichsweise geringen Wärmeeintrags und erlaubt es, den durch die Verbindung verursachten Übergangswiderstand möglichst gering zu halten (vgl. Kampker 2014; Heimes 2014; ANL 2012).

Die Anforderungen an eine Anlage zum Ultraschallschweißen ergeben sich aus denen des vorangegangenen Stapelprozesses, wobei die Leistung ähnlich hoch ist. Es können ca. fünf Zellen pro Minute und Anlage verschweißt werden. Daraus ergibt sich der Bedarf von ebenfalls vier Anlagen,⁷⁵ die mit 1 Mio. \$ pro Stück identische Investitionen aufweisen (vgl. ANL 2012).

3.2.3.3 Verpacken, Elektrolytbefüllung und Versiegeln

Das Verpacken beschreibt den Prozess des Einbringens des Elektrodenstapels in die dafür vorgesehene Verpackung. Während es sich im Falle von Flachzellen um eine Aluminiumfolie handelt, kommen bei der betrachteten primatischen Zelle steife Zellcontainer zum Einsatz. Nachdem der Stapel eingeführt ist, wird die Zelle teilweise für den nachfolgenden Befüllungsprozess verschlossen. Hauptanforderung an die Zellverpa-

⁷⁴ Bei einer veranschlagten Maximalrate von 8.640.000 Zellen/a.

⁷⁵ Ebenfalls bei einer veranschlagten Maximalrate von 8.640.000 Zellen/a.

ckung, die in der Regel ein Zukaufteil darstellt, ist die über die gesamte Lebensdauer hinweg bestehende Undurchlässigkeit gegenüber Wasserdampfdiffusion. Das Befüllen der Zelle mit dem Elektrolyten findet unter Vakuum statt. Die genaue Dosierung des Elektrolyten und die sich daraus ableitende vollständige Benetzung der Elektroden und des Separators sind bei diesem Prozess von großer Bedeutung und werden durch Gewichtskontrolle sichergestellt. Anschließend wird die Zelle temporär versiegelt (vgl. ANL 2012; Hettesheimer et al. 2013; Heimes 2014).

Die Anlagen zum Verpacken und zum Befüllen/Versiegeln weisen wiederum die gleichen Spezifikationen wie die bereits genannten zum Schweißen und Stapeln auf. Lediglich bezüglich der Investitionen unterscheiden sie sich. Die Anlagen zum Verpacken sind mit einer Gesamtinvestition von 3 Mio. \$ günstiger, während die zum Befüllen und Versiegeln mit insgesamt 5 Mio. \$ etwas teurer sind (vgl. ANL 2012).

3.2.3.4 Formation, Aging und Test

Nachdem die Zelle versiegelt wurde, können die Formation und alle nachfolgenden Prozessschritte wieder außerhalb des Trockenraums stattfinden. Bisher war die Zelle ungeladen. Dies ändert sich nun durch den Anstoß der elektrochemischen Reaktion. Die Lithium-Ionen beginnen, sich in dem Graphit der Anode einzulagern und es entsteht die Solid Electrolyt Interphase (SEI). Die Formation findet dabei in sogenannten Formationsregalen statt, in denen die Zellen permanent überwacht werden. Die Kontaktierung der Zelle kann sowohl manuell als auch automatisch erfolgen, wobei die Zelle mehrfach gelad und entladen wird. Je nach Zellhersteller variieren dabei Stromstärke und die dazwischenliegenden Ruhephasen. Die Formation ist relativ zeit- und kapitalintensiv. In dem hier zugrundeliegenden Beispiel wird davon ausgegangen, dass in den Formationsregalen 500 Zellen gleichzeitig formiert, getestet und gegebenenfalls aussortiert werden können. Die finale Zellversiegelung erfolgt nach der letzten Formierung. Danach werden die Zellen beim Prozess des „Aging“ noch über einen längeren Zeitraum⁷⁶ gelagert und bezüglich ihrer Selbstentladung getestet (vgl. ANL 2012; Hettesheimer et al. 2013; Heimes 2014).⁷⁷

Um die geplante jährliche Batteriemenge zu erreichen, sind 35 Formationsregale für je 500 Zellen notwendig. Die Formation und das Testen dauern in etwa 16 Stunden. Die Gesamtinvestition für die Regale betragen ca. 30 Mio. \$. Für die Anlagen zum finalen Versiegeln sind Investitionen in Höhe von 2 Mio. \$ notwendig sowie weitere 4,75 Mio. \$ für die Anlagen zum Testen der Selbstentladung (vgl. ANL 2012).

⁷⁶ In diesem konkreten Beispiel 14 Tage.

⁷⁷ In dem Beispiel wird von einem Ausschuss in Höhe von 5 % in dieser Phase ausgegangen.

3.2.4 Modulfertigung

Die fertigen Zellen werden im weiteren Prozess zu Modulen zusammengeschaltet. Die Modulassemblierung ist stark von Montageprozessen geprägt. Diese werden im Folgenden beschrieben. Da es sich dabei eher um typische Montagetätigkeiten handelt, werden diese jedoch nicht im Detail erläutert. Der erste Schritt der Modulmontage besteht in der Verankerung der Zellen im Modul sowie der Kontaktierung der Kontaktfahnen. Dies geschieht in der Regel durch Laserstrahl- oder Ultraschallschweißen oder durch mechanische Arretierung mittels einer Federmechanik. Anschließend werden weitere elektronische Bauteile zur Überwachung des Moduls ergänzt. Im letzten Schritt der Modulmontage werden Wärmeleiter am Modul angebracht, um die beim Betrieb entstehende Wärme abzuführen. Abschließend wird das Modul verschlossen und einer Qualitätsprüfung unterzogen (vgl. ANL 2012; Kampker 2014).

Die einzelnen Prozesse werden an vier automatisierten Anlagen durchgeführt, wobei jede eine Kapazität von 280 Zellen pro Stunde besitzt. Die Investitionen hierfür belaufen sich auf 6 Mio. \$ (vgl. ANL 2012).

3.2.5 Batteriesystemfertigung

Alle Module, die die Qualitätsprüfung erfolgreich absolviert haben, werden im Anschluss zu Batteriesystemen oder auch Batteriepacks zusammengesetzt. Hierzu werden die Module in einer vorgefertigte Batterieuhle, je nach Batteriedesign, entweder in einer Reihe oder in parallelen Reihen verankert. Anschließend werden die einzelnen Module wiederum kontaktiert (z. B. durch eine Kontaktschiene). Zusätzlich werden Batteriemanagementsystem und Kühlsystem eingebracht und verkabelt. Abschließend wird das fertige Batteriesystem verschlossen und getestet (vgl. ANL 2012; Hettseheimer et al. 2013).

Für die Montage von 4 Modulen pro Batteriesystem bei einer Montagegeschwindigkeit von ca. 6 Systemen pro Stunde und Station, ergibt sich ein Gesamtbedarf von 3 Anlagen. Die Kosten hierfür liegen bei ca. 3 Mio. \$.

Für die geschilderte Produktionsmenge sind somit über alle Prozessschritte hinweg Investitionen in Höhe von ca. 130 Mio. \$ notwendig.⁷⁸ Dabei betragen die Kosten für die Modul- und Batteriesystemmontage lediglich jeweils 6 Mio. \$. Der größte Anteil der Investitionen entfällt somit auf die vorgelagerten Prozesse.

⁷⁸ Anderman gibt für eine Produktion von 125.000 Batteriesystemen mit einer Kapazität von je 8 kWh eine Investitionssumme von 172 Mio. \$ für Anlagen zur Zellfertigung (also exklusive Modul- und Batteriesystemmontage) an. Bezogen auf eine identische Produktionsmenge von 100.000 Batteriepacks kommt Anderman auf eine Summe von ca. 137 Mio. \$ und somit auf eine ähnlich hohe Summe, wie die in obigem Beispiel (vgl. Anderman 2013).

3.2.6 Einfluss von Batteriegröße und Produktionsmenge auf die Investitionen

Die Höhe der Gesamtinvestitionen für Produktionsanlagen ist im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängig: Der eigentlichen Batteriekapazität und der zu produzierenden Stückzahl. Wie sich eine Veränderung der Kapazität bzw. Stückzahl auf die Anlagenkosten auswirkt, ist in Abbildung 21 anhand von drei alternativen Konfigurationen dargestellt: Der bereits beschriebenen Basiskonfiguration, einer Batterie mit höherer Kapazität (20 kWh) und einer Batterie mit höherer Kapazität und erhöhter Produktionsmenge (500.000 Stück/a).⁷⁹

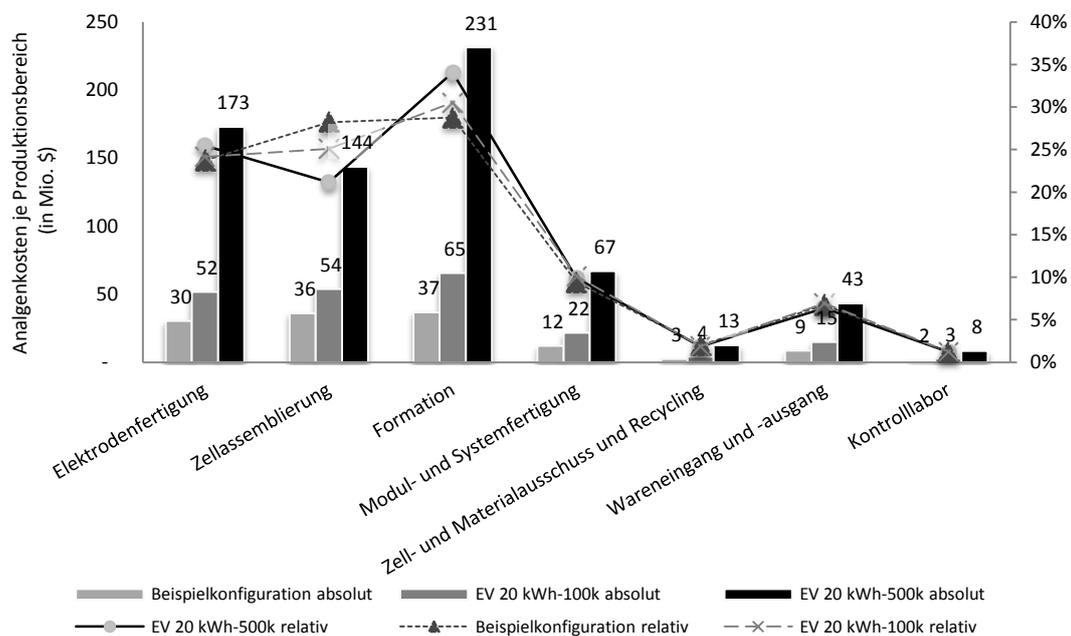


Abbildung 21: Investitionen für Produktionsanlagen unter alternativen Konfigurationen

Aus dem direkten Vergleich der Konfigurationen wird ersichtlich, dass die Investitionen nicht linear mit den Produktionsmengen ansteigen. Der Grund hierfür ist in Erfahrungskurveneffekten zu finden, die sowohl auf dynamische⁸⁰ als auch auf statische⁸¹ Skaleneffekte zurückzuführen sind. Auch wenn die Erfahrungseffekte alle Produktionsbereiche betreffen, sind sie unterschiedlich stark ausgeprägt. Dies spiegelt sich an einer Verände-

⁷⁹ Die jeweiligen Konfigurationen wurden mit Hilfe des BatPac-Modells untersucht.

⁸⁰ Dynamische Skaleneffekte entstehen durch eine über den Zeitablauf kumulierte Produktionsmenge. Es handelt sich somit um die Lernerfahrungen der Mitarbeiter oder um eine höhere Effizienz durch Automatisierung, Rationalisierung oder technischen Fortschritt (vgl. Mussnig 2001).

⁸¹ Statische Skaleneffekte beziehen sich im Gegensatz zu den dynamischen nicht auf die kumulierte- sondern auf die eigentliche Ausbringungsmenge pro Jahr. Es handelt sich somit um Fixkostendegression und Betriebsgrößeneffekte (vgl. Mussnig 2001).

zung des Anteils an den Gesamtinvestitionen wider. Während dieser Anteil bei den meisten Produktionsanlagen gleich bleibt, sinkt er bei der Zellfertigung mit zunehmender Produktionsmenge merklich. Dies liegt an dem großen Potential zur Automatisierung und Effizienzsteigerung in diesem Bereich. Im Gegensatz dazu steigt der Anteil der Formation, die auch bereits die größten Investitionen verursacht, noch weiter an. Skaleneffekte lassen sich in diesem Bereich nur schwer realisieren.

Nach der Betrachtung, wie sich die Investitionen in Produktionsanlagen mit zunehmender Produktionsmenge verändern, wird im Folgenden untersucht, wie sich eine Steigerung der Produktionsmenge auf die Kostenstruktur eines Batteriesystems auswirkt. Zu diesem Zweck werden zum Vergleich wiederum die Beispielkonfigurationen aus dem vorherigen Beispiel herangezogen.

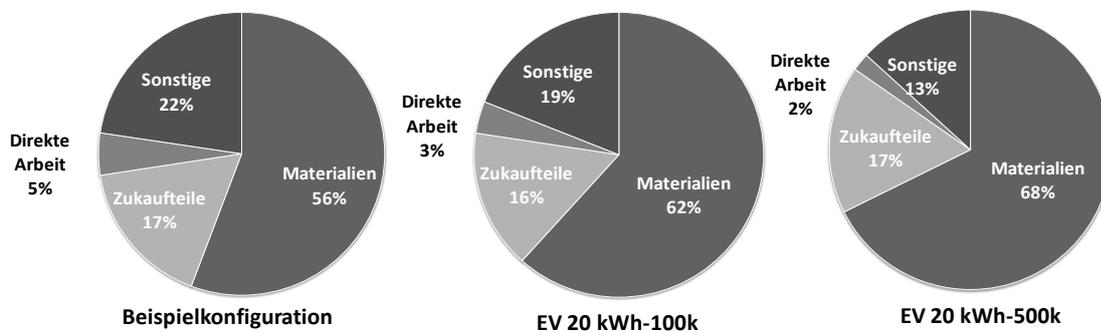


Abbildung 22: Entwicklung der Kostenanteile unter alternativen Konfigurationen

Es zeigt sich, dass mit steigender Produktionsmenge der Anteil der Materialkosten am Batteriesystem zunehmend dominant wird. Während Faktoren wie Lohnkosten oder der Bereich Sonstige, in dem vorrangig indirekte Kosten zusammengefasst sind, zunehmend in den Hintergrund treten.

4 Grundlagen der strategischen Produktionsplanung

Sich verändernde externe Rahmenbedingungen wirken sich nicht nur auf eine Branche oder einen Markt aus, sondern ebenso auf darin agierende Unternehmen. Die Dynamik des Umfelds kann dabei die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens sowohl positiv als auch negativ beeinflussen.

Die betriebliche Leistungserstellung stellt dabei einen der zentralen funktionalen Unternehmensbereiche dar, um auf sich ergebende Chancen und Risiken, etwa durch eine steigende Nachfrage oder neue Wettbewerber, zu reagieren. Sie verursacht oftmals 70 bis 90 Prozent der gesamten Kosten in einem Unternehmen und bestimmt gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der Produktion, womit sie unabdingbar für den Unternehmenserfolg ist (vgl. Zäpfel 2000a).

Dieses Kapitel widmet sich daher dem Produktionssystem als Kern eines produzierenden Unternehmens sowie der strategischen Produktionsplanung als Mittel zu dessen effizienter Gestaltung, zum Umgang mit dynamischen Umweltveränderungen und zur langfristigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit. Den Abschluss des Kapitels und das Ende von Teil A dieser Arbeit bildet eine Synthese der Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln. Diese verfolgt das Ziel, Defizite bei der Anwendung des konventionellen Planungsprozesses ausfindig zu machen und Implikationen für die strategische Planung der Produktion im jungen Markt für Li-Ionen-Traktionsbatterien abzuleiten.

4.1 Die Produktion aus systemischer Sicht

In der Literatur wird die Auffassung der Produktion als zentrale Aufgabe eines produzierenden Unternehmens weitestgehend einstimmig vertreten (vgl. Russell und Taylor 2000). Jedoch hat sich bis dato keine einheitliche Definition für den Begriff etabliert. Vielmehr gibt es eine Vielzahl an Definitionen, die sich auf eine Aussage zusammenfassen lassen: Die Produktion wird als eine zielgerichtete und systematisch gelenkte Transformation bezeichnet, bei der eine Nutzenerhöhung oder auch Wertschöpfung stattfindet. Der für eine Transformation benötigte Input wird als Produktionsfaktoren bezeichnet, während es sich bei dem angestrebten Output sowohl um Konsum- oder Investitionsgüter als auch um Dienstleistungen oder Informationen handeln kann. Entstehen neben dem angestrebten Output noch weitere Produkte, was in der Industrie die Regel darstellt, wird auch der Begriff der Kuppelproduktion verwendet⁸² (vgl. Dyckhoff und Spengler 2010; Zäpfel 2000a; Schultmann 2003).

⁸² Für eine detaillierte Beschreibung und einen Überblick der hierzu relevanten Literatur siehe Schultmann 2003.

Als Synonym zur „Produktion“ wird oftmals auch der Begriff „Produktionssystem“ verwendet. Die mit dem Systembegriff einhergehende ganzheitliche Sichtweise auf das Unternehmen und den Produktionsbereich soll das Verständnis über darin herrschende kausale Wirkungszusammenhänge verbessern. Bei Entscheidungen unter Komplexität und Dynamik stellt eine systemische Betrachtungsweise in Bezug auf die Entscheidungsqualität einen wesentlichen Mehrwert im Vergleich zu den rein auf analytischer Sicht beruhenden linearen und monokausalen Ansätzen dar (vgl. Bleicher 1999; Zahn 1996). Es besteht daher die Forderung, dass – um die richtigen strategischen Entscheidungen treffen zu können – ein Unternehmen stets mit all seinen internen und externen Vernetzungen erfasst werden sollte. In diesem Kontext hat sich die Systemtheorie bereits bewährt. Ihr Anspruch ist es, als ganzheitlicher Forschungsansatz die monodisziplinären Forschungsgrenzen zu überwinden (vgl. Kunath 2009).

Aus systemtheoretischer Sicht wird ein System durch eine Reihe wesentlicher Eigenschaften charakterisiert, die sich auch in den gängigen Definitionen von Produktionssystemen wiederfinden lassen. In obiger Definition der Produktion wurden bereits zwei Aspekte eines Systems implizit berücksichtigt: Die Interaktion mit dem Umfeld (Offenheit) sowie die Ziel- bzw. Zweckorientierung. Sowohl Corsten als auch Wildemann greifen mit ihrer Definition die Eigenschaften „Ganzheit und Teil“ sowie „Vernetzung“ auf (vgl. Corsten 2007; Wildemann 2004). Demnach handelt es sich bei einem Produktionssystem um ein Subsystem (Teil) des übergeordneten Systems „Unternehmung“ (Ganzheit). Das Produktionssystem weist hierbei eine spezifische Systemstruktur auf, die durch Art und Anzahl der in ihm enthaltenen Systemelemente und deren Beziehungen untereinander charakterisiert ist. Ein Systemelement stellt den kleinsten Teil eines Systems dar, der nicht weiter aufgeteilt werden kann oder soll. Die Zusammenstellung und Ausprägung der Elemente können dabei durch Rahmenbedingungen und Restriktionen beeinflusst werden. Die Systemelemente stehen untereinander in Wechselwirkung, wodurch zirkuläre Wirkbeziehungen bzw. Rückkopplungen bestehen können und somit Subsysteme oder Systemelemente auf sich selbst rückwirken können (Vernetzung). Diese zirkulären Beziehungen induzieren im System eine Dynamik durch die innersystemische Prozesse, die – abhängig von ihrem zeitlichem Zusammenspiel – unterschiedliche Ausprägungen annehmen oder auch erst zeitverzögert eintreten können (Forrester 1972; Gomez und Probst, G. J. B. 1989; Bleicher 1999). Das Zusammenspiel der genannten Eigenschaften führt letztendlich dazu, dass für ein System auch die Komplexität eine zentrale Eigenheit darstellt. Die Komplexität wird dadurch charakterisiert, dass Systeme innerhalb kürzester Zeit eine große Anzahl an Zuständen einnehmen können. Folglich kann ein System und dessen Verhalten nicht eindeutig prognostiziert werden (vgl. Milling 1981; Sydow 1992). Aus den genannten Gründen wird auch ersichtlich, weshalb sich bei einer Analyse des Systems dessen Verhalten nicht aus der Betrachtung und Addition einzelner Subsysteme oder Systemelemente ergeben kann. Stattdessen ist für eine gezielte Änderung des Verhaltens auch eine gezielte Änderung der Systemstruktur notwendig. Während sich komplexe Systeme in der Natur selbst im Gleichgewicht halten, müssen komplexe sozio-technische Systeme wie die Produktion vom Menschen gestaltet und gelenkt werden. Solche Lenkungsprozesse sind zum Funk-

tionieren des Systems notwendig und stellen Prozesse der Informationsaufnahme, -verarbeitung und -übermittlung dar (Dörner 2000; Ulrich und Probst, G. J. B. 1991).

Bei der Darstellung des Produktionssystems unter Berücksichtigung der genannten systemischen Eigenschaften ergibt sich folgendes Bild (vgl. Abbildung 23):

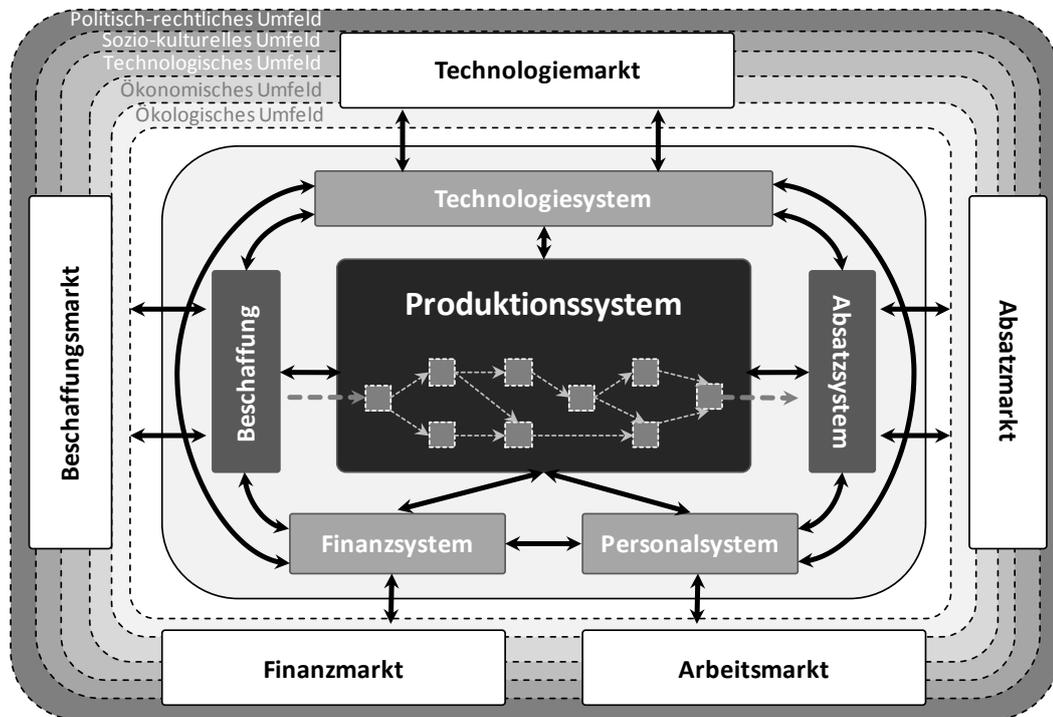


Abbildung 23: Das Produktionssystem als Subsystem des Unternehmens in Anlehnung an Corsten 2007

Das Produktionssystem ist in Abbildung 23 als Subsystem des Unternehmens dargestellt. Das Unternehmen ist eingebettet in ein dynamisches und komplexes Umfeld, mit dem es sich in direktem Austausch befindet. Im Gegensatz hierzu kann das Produktionssystem in der Regel nur indirekt mit der Umwelt interagieren. Somit wirken sich Veränderungen der Umwelt nur durch die mit der Umwelt vernetzten unternehmensspezifischen Subsysteme (z. B. Finanz- oder Personalsystem) auf das Produktionssystem aus (vgl. Corsten 2007). Diese funktionalen Subsysteme werden auch als Funktionsbereiche bezeichnet. Sie entstehen durch das Zusammenfassen von Systemelementen oder strukturellen Subsystemen, die an der Erfüllung einer Funktion beteiligt sind (vgl. Kirsch 1974).

Der Bereich der betrieblichen Leistungserstellung setzt sich aus den Funktionsbereichen Beschaffung und Produktion zusammen, wobei die Beschaffung die Versorgung der Produktion mit den notwendigen Produktionsfaktoren zur Aufgabe hat. Nachdem die Produktionsfaktoren im Bereich der Produktion zu Gütern oder Dienstleistungen kombiniert wurden, werden diese Endprodukte auf den Absatzmärkten verkauft. Dies ist

Aufgabe des Funktionsbereichs Absatz, der die Leistungsverwertung darstellt (vgl. Kienner 2009). Die Bereitstellung der notwendigen Finanzmittel zur Beschaffung der Produktionsfaktoren obliegt dem gleichnamigen Finanzsystem. Die zur Produktion notwendige Produktionstechnologie wird vom Technologiesystem bereitgestellt, während die für deren Betrieb benötigten Personalkapazitäten durch das Personalsystem akquiriert werden (vgl. Corsten 2007).

4.1.1 Die Rolle des Produktionsmanagements

Die Umwelt eines Unternehmens wird durch die in Abbildung 23 aufgelisteten Umfeldler beschrieben. Diese definieren die Rahmenbedingungen für das unternehmerische Handeln, wobei sie sich im Laufe der Zeit verändern können. Durch die Vernetzung des Unternehmens bzw. des Produktionssystems mit dessen Umwelt wirken sich die aus der Veränderung resultierenden Störgrößen auf das Produktionssystem aus. Dadurch wird dessen Zielerfüllung gefährdet oder die Zweckmäßigkeit des bestehenden Systems in Frage gestellt, woraus die Notwendigkeit einer Adaption des Produktionssystems an die neuen Gegebenheiten resultieren kann. Der informationsbearbeitende und -verarbeitende Prozess der zielkonformen Gestaltung sowie der Lenkung des Produktionssystems ist Aufgabe des dem Produktionssystem übergeordneten Führungssystems und wird durch das Produktionsmanagement operationalisiert⁸³. Das Führungssystem kann dabei im Sinne der Kybernetik⁸⁴ auch als „Regler“ für das physische Produktionssystem verstanden werden, das bei einer (absehbaren) Verfehlung der vorgegebenen Führungsgrößen geeignete Stellgrößen formuliert (vgl. Zäpfel 2000a).

Je nach Tragweite eines Planungs- und Entscheidungsproblems wird zwischen strategischem, taktischem und operativem Produktionsmanagement unterschieden. Die einzelnen Ebenen bestehen dabei nicht isoliert voneinander, sondern sind untereinander vernetzt. Die Führungsgrößen übergeordneter Ebenen werden an die unteren Ebenen als Sollwerte weitergegeben. Im konkreten Fall eines Entscheidungsproblems erfolgt somit mit abnehmender Ebene eine Dekomposition des Problems. Der resultierende Regelkreis des Produktionsmanagements weist daher eine hierarchische Struktur auf, deren Ebenen durch Rückkopplungen miteinander vernetzt sind (vgl. Hoitsch 1993; Zäpfel 2000a).

Die oberste Führungsgröße für das Produktionsmanagement und „Leitplanke“ für die nachfolgenden Prozesse sind die autorisierten Wertvorstellungen des Unternehmens.

⁸³ Andere Autoren sehen das Führungssystem auch als integrierten Bestandteil des Produktionssystems.

⁸⁴ Die Kybernetik wird auch als allgemeine formale Wissenschaft von Struktur, Relation und dem Verhalten dynamischer Systeme verstanden und baut auf der Regelungstheorie auf. Sie stellt einen Teilbereich der Systemtheorie dar (vgl. Milling 2001; Forrester 1961; Flechtner 1966).

Es handelt sich dabei um grundlegende Ziele und Leitbilder, wobei zumeist die Überlebensfähigkeit des Unternehmens als übergreifendes Ziel definiert ist (vgl. Dyckhoff 1998; Welge und Al-Laham 2011).

Die Kernaufgabe des **strategischen Produktionsmanagements** liegt darin, unter Beachtung der Entwicklung von Umweltfaktoren adäquate Ziele und Strategien zu formulieren, um das Produktionssystem entsprechend zu gestalten und zu lenken. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Schaffung und dem Erhalt einer leistungsfähigen Produktion. Der Aufbau von Erfolgspotentialen⁸⁵ in der Produktion leistet hierbei einen entscheidenden Beitrag zur langfristigen Sicherung der betrieblichen Wettbewerbsfähigkeit. Typische Aufgaben des strategischen Produktionsmanagements betreffen die Forschung und Entwicklung von Produkt- und Prozessinnovationen oder die Planung neuer Produktionsstandorte (vgl. Corsten 2007; Dyckhoff 1998; Zäpfel 2000a; Welge und Al-Laham 2011).

Das **taktische Produktionsmanagement** schließt an das strategische an. Es umfasst einen Planungshorizont von ca. ein bis fünf bis Jahren und widmet sich der inhaltlichen Konkretisierung und Ausgestaltung der zuvor entwickelten Strategien. Gegenstand sind Entscheidungen über die langfristige Gestaltung des Produktionsprogramms, die dafür langfristig benötigten Produktionsfaktoren sowie die langfristige Organisation des Produktionsprozesses (vgl. Hoitsch 1993; Schultmann 2003). Hierzu findet eine konkrete Planung des Produkt- und Produktionsprogramms sowie der angestrebten Fertigungstiefe, der benötigten Kapazitäten und der verwendeten Technologien statt (vgl. Corsten 2007; Dyckhoff 1998; Zäpfel 2000a; Schultmann 2003). Aufgrund der großen inhaltlichen Nähe und der schwierig zu realisierenden Differenzierung zwischen strategischem und taktischem Produktionsmanagement wird auch oftmals zusammenfassend der Begriff „strategisch-taktisch“ verwendet⁸⁶ (vgl. Hoitsch 1993; Fröhling 2006). Die Planungs- und Steuerungsaufgaben, die in beiden Ebenen verortet sind und einen mittel- bis langfristigen Charakter haben, werden als Gestaltungsaufgaben bezeichnet. Die in diesem Zusammenhang getroffenen Entscheidungen bilden die Rahmenbedingungen für das **operative Produktionsmanagement**. Dessen Planungshorizont umfasst eine Periode von bis ca. einem Jahr. Aufgrund der relativen Kurzfristigkeit der darin verorteten Aufgaben werden diese nicht mehr als Gestaltungs- sondern als Lenkungsarbeiten betitelt. Gegenstand dieser Ebene ist die kurzfristige Planung und Steuerung des Erzeugnisprogramms sowie der Materialwirtschaft und der Ablaufplanung (vgl. Dyckhoff und Spengler 2010).

⁸⁵ Als Erfolgspotentiale im Bereich der Produktion gelten Qualität, Zeit und Kosten aber auch Innovation oder Flexibilität (vgl. Zäpfel 1989, Neuner 2009).

⁸⁶ Im Folgenden wird anstatt von der strategisch-taktischen Ebene einheitlich von der strategischen Ebene gesprochen.

4.1.2 Prozess der strategischen Planung

Entsprechend der Einordnung aus dem vorherigen Abschnitt sind Entscheidungen zur Schaffung von produktionsspezifischen Erfolgspotentialen⁸⁷ strategische Entscheidungen. Sie dienen der langfristigen Sicherung des Erfolgs und der Wettbewerbsfähigkeit. In der Regel sind diese Entscheidungen dadurch geprägt, dass es sich um komplexe, offene und nur begrenzt strukturierbare Entscheidungsprobleme mit innovativem Charakter handelt. Die große Bindungswirkung, die große wirtschaftliche Bedeutung sowie die Irreversibilität der Entscheidungen wirken sich dabei langfristig und mitunter auch fundamental auf den Unternehmenserfolg aus. Aufgrund der geschilderten unternehmerischen Tragweite strategischer Entscheidungen bedarf es daher einer sorgfältigen und objektiven Entscheidungsvorbereitung. Die strategische Planung als rational und systematisch ablaufender Prozess bietet dabei für die betroffenen Planer eine Grundlage zur Lösung strategischer Entscheidungsprobleme (vgl. Milling 1981; Kunath 2009; Wilde 1989; Klein und Scholl 2011).

Oftmals werden in der Literatur die Begriffe „Planung“ und „Entscheidung“ synonym verwendet. Eine solche Gleichsetzung ist jedoch nicht korrekt (vgl. Laux et al. 2012). Beide Begriffe können insofern voneinander abgegrenzt werden, dass die Planung – im Sinne einer Planungsmethode bzw. eines Planungsmodells – als Instrument zur Entscheidungsstrukturierung und als Hilfsmittel zur Entwicklung und Auswahl von Entscheidungsalternativen interpretiert werden kann und somit der Entscheidung vorgelagert ist (vgl. Werner 1992).

Die eigentliche Schaffung und Bereitstellung von produktionsspezifischen Erfolgspotentialen erfolgt anhand von passfähigen Strategien. Die Entwicklung und Auswahl dieser Produktionsstrategien sind das Ergebnis des strategischen Planungsprozesses (vgl. Foschiani 1995; Zäpfel 2000a; Hammer 2009). Eine Strategie umfasst eine sequenzielle oder parallele Abfolge von problemspezifischen Handlungen bzw. Entscheidungen. Bei dem Prozess der strategischen Planung handelt es sich also um die gedankliche Vorwegnahme unterschiedlicher Entscheidungsmöglichkeiten bzw. Handlungsalternativen. Durch diesen realisierten Planungsprozess soll eine frühzeitige Risikoerkennung erreicht und das Risiko von Fehlentscheidungen reduziert werden. Zudem soll trotz hoher Komplexität, Dynamik und Unsicherheit eine zielgerichtete Zukunftsgestaltung ermöglicht werden, um den Zeitdruck strategischer Entscheidungsprozesse zu reduzieren und die Flexibilität beim Auftreten von Eventualitäten zu wahren. Letztlich können durch eine strategische Planung eine Reduktion der Entscheidungskomplexität erreicht sowie Synergieeffekte durch die Umsetzung von konsistenten und interdependenten Einzel-

⁸⁷ Erfolgspotentiale können dabei als „Vorsteuergrößen“ aufgefasst werden, die die Grundlage für den späteren Unternehmenserfolg darstellen und durch Erfolgsfaktoren weiter konkretisiert werden (vgl. Welge und Al-Laham 2011).

entscheidungen geschaffen werden (vgl. Dörrer 2000; Wilde 1989; Kunath 2009; Kleine 2013).

Der strategische Planungsprozess ist wesentlicher Bestandteil des strategischen Managements und hat die Rolle der Gestaltung des Produktionssystems inne. Er umfasst die Phasen der Zielplanung, Umwelt- und Unternehmensanalyse sowie der Strategieformulierung und -auswahl. Den daran anschließenden Phasen der Strategieimplementierung und des Strategiecontrollings kann entsprechend die Aufgabe der Lenkung des Produktionssystems zugeordnet werden (vgl. Welge und Al-Laham 2011). Die einzelnen Phasen des strategischen Planungsprozesses sowie die Abgrenzung zum strategischen Management sind in Abbildung 24 dargestellt.

In der Literatur lässt sich ebenso eine Vielzahl weiterer Prozessabläufe finden, die sich entsprechend dem Grad ihrer Detaillierung unterscheiden. So wird etwa die Phase der Problemfeststellung oder der Strategieimplementierung teilweise noch mit in den Planungsprozess eingeschlossen (vgl. Klein und Scholl 2011; Bea und Haas 2013). Der in Abbildung 24 abgebildete Prozess stellt dabei eines der gängigsten Modelle des strategischen Managements dar. Eine genaue sequentielle Anordnung der einzelnen Phasen lässt sich dabei bei den meisten Modellen in der Regel nicht ausmachen. Diese sind vielmehr als interdependent anzusehen und sind mittels Vor- und Rückkopplungen untereinander verbunden. Entsprechend kann der Auslöser für einen Planungsprozess aus unterschiedlichen Phasen resultieren (vgl. Bea und Haas 2013).

Der Anlass für eine strategische Planung ist meist das Vorliegen eines Systemzustands, der von einem Entscheider als verbesserungsfähig oder aufgrund von externen Vorgaben als nicht mehr akzeptabel erachtet wird. Solch eine Abweichung eines derzeitigen oder zu erwartenden Zustandes von einem angestrebten Zielzustand (z. B. aus einem Soll-Ist-Abgleich) wird auch als strategisches Problem bezeichnet. Es kann durch endogene (z. B. Qualitätsmängel in der Produktion) oder exogene Ursachen (z. B. veränderte Produktionstechnik der Konkurrenz) hervorgerufen werden. Auf Basis der Problemerkennung wird dieses genauer analysiert und dessen Ursache und Konsequenzen weiter spezifiziert. Die daran anschließende Problemformulierung beschreibt den angestrebten Zustand und die zu verfolgenden Ziele, die damit verbunden sind (vgl. Pfohl und Stölzle 1997; Klein und Scholl 2011).

In der Phase der strategischen Zielplanung werden strategische Ziele für die einzelnen Hierarchieebenen⁸⁸ definiert. Diese beinhalten Aussagen über zukünftige und als erstrebenswert erachteten Zustände, die durch Handlungen im Rahmen von Strategien realisiert werden sollen (vgl. Corsten 1994). Dies geschieht unter Beachtung der norma-

⁸⁸ Neben der übergeordneten Vision bzw. dem Leitbild eines Unternehmens lassen sich Ziele für das Unternehmen, für einzelne Geschäfts- sowie Funktionsbereiche, wie z. B. die Produktion, definieren.

tiv gegebenen Unternehmenspolitik sowie des Leitbildes⁸⁹. Auf Unternehmensebene lassen sich drei wesentliche Kategorien von Zielen unterteilen: Finanzziele, Erfolgsziele und Leistungsziele.

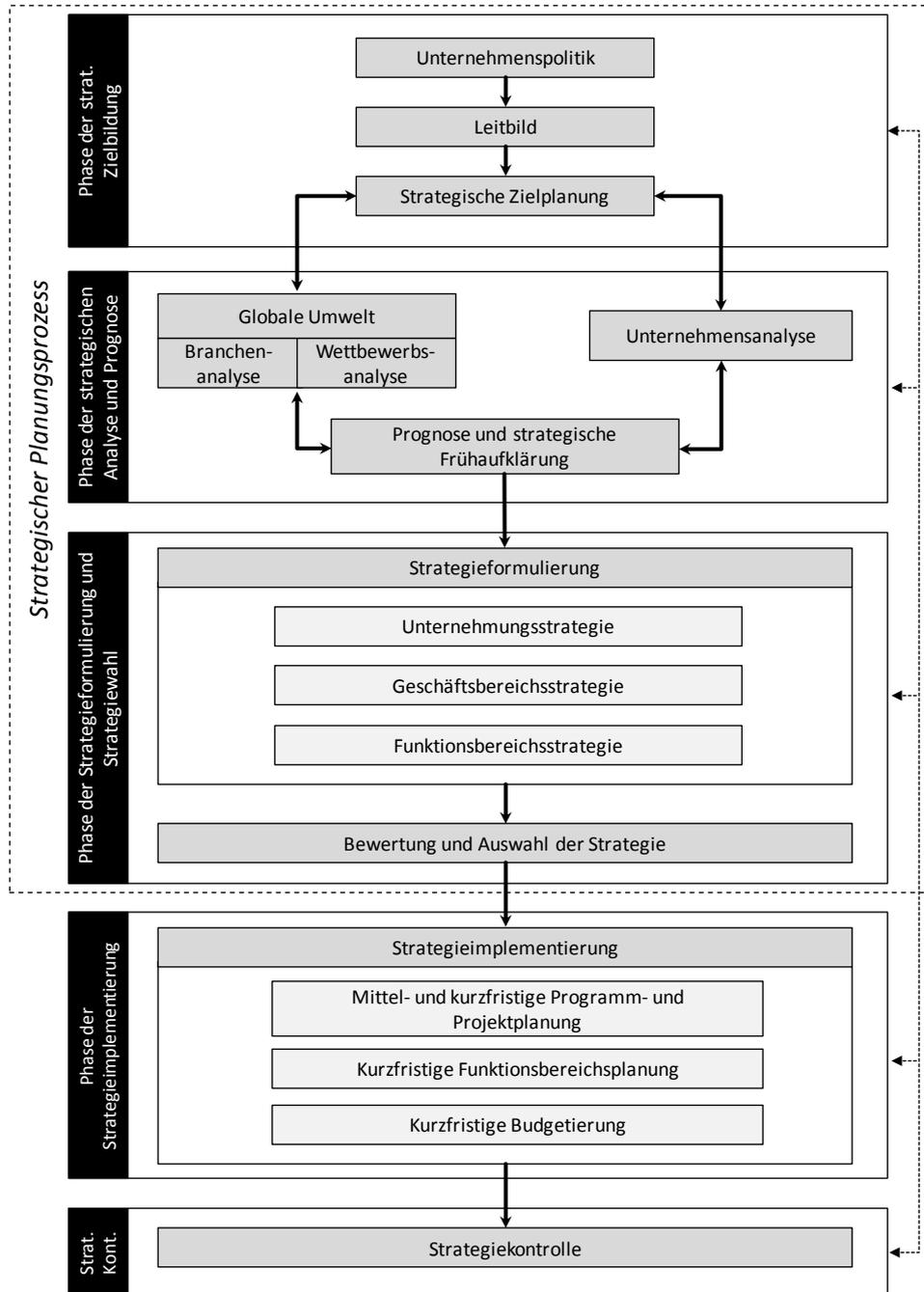


Abbildung 24: Der strategische Planungsprozess als Teil des strategischen Managements (vgl. Welge und Al-Laham 2011)

⁸⁹ Diese können dem normativen Management zugeordnet werden und sind daher eher Prämissen und weniger Gegenstand des Planungsprozesses (vgl. Hammer 2009).

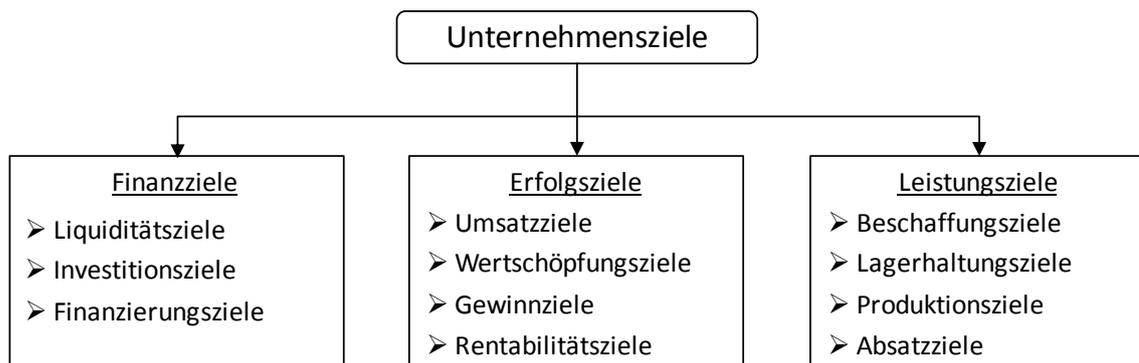


Abbildung 25: Kategorien von Unternehmenszielen (vgl. Schierenbeck 2003)

Von übergeordneter Stellung sind hierbei die Erfolgsziele, deren Zielerreichung für das langfristige Überleben des Unternehmens von essentieller Bedeutung ist. Die Finanzziele sowie die Leistungsziele, die sich auf den Produktionsprozess beziehen, sind dabei Bausteine zur Realisierung der Erfolgsziele (vgl. Schierenbeck 2003).

Für das Produktionssystem lassen sich in der Literatur eine Vielzahl an unterschiedlichen strategischen Zielen ausmachen, von denen eine Auswahl in Tabelle 8 aufgelistet ist.

Tabelle 8: Strategische Ziele für die Produktion

Fine & Hax (1985)	Skinner (1969)	Wheelwright (1984)	Wildemann (1997)	Zahn & Schmid (1996)
Kosten	ROI	Kosten/Preis	Produktivität	Wirtschaftlichkeit
Produktqualität	Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
Liefertreue/-zeit	Service	Zuverlässigkeit	Zeit	Zeit
Flexibilität	Produktivität	Flexibilität		Mengenziele
				Flexibilität
				Soziale Ziele
				Ökologische Ziele

Aus der Auflistung in Tabelle 8 geht hervor, dass – trotz gewisser Unterschiede⁹⁰ – im Wesentlichen ein gemeinsamer Konsens über die wesentlichen strategischen Ziele eines Produktionssystems besteht. So lassen sich die vier Ziele, wie sie bereits von Fine & Hax (1985) definiert wurden, ebenso in den anderen Quellen wiederfinden. Zudem wird die bedeutsame Rolle der sozialen und ökologischen Ziele deutlich. Neben der Definition strategischer Ziele wird im Rahmen der strategischen Zielplanung festgelegt, welche Informationen und Erkenntnisse durch den nachgelagerten Planungsprozess generiert werden sollen (vgl. Alter 2011; Welge und Al-Laham 2011; Heinen 1991).

⁹⁰ So beziehen Zahn und Schmid die sozialen und ökologischen Ziele explizit mit ein.

Der Phase der strategischen Analyse kommt die Aufgabe zu, Informationen über die derzeitige Situation und die zukünftige Entwicklung des eigenen Unternehmens sowie des globalen Unternehmensumfelds und der Wettbewerber eines Marktes zu generieren (vgl. Welge und Al-Laham 2011). Wesentliche Aspekte dieser Analyse sind in nachfolgender Abbildung 26 dargestellt.

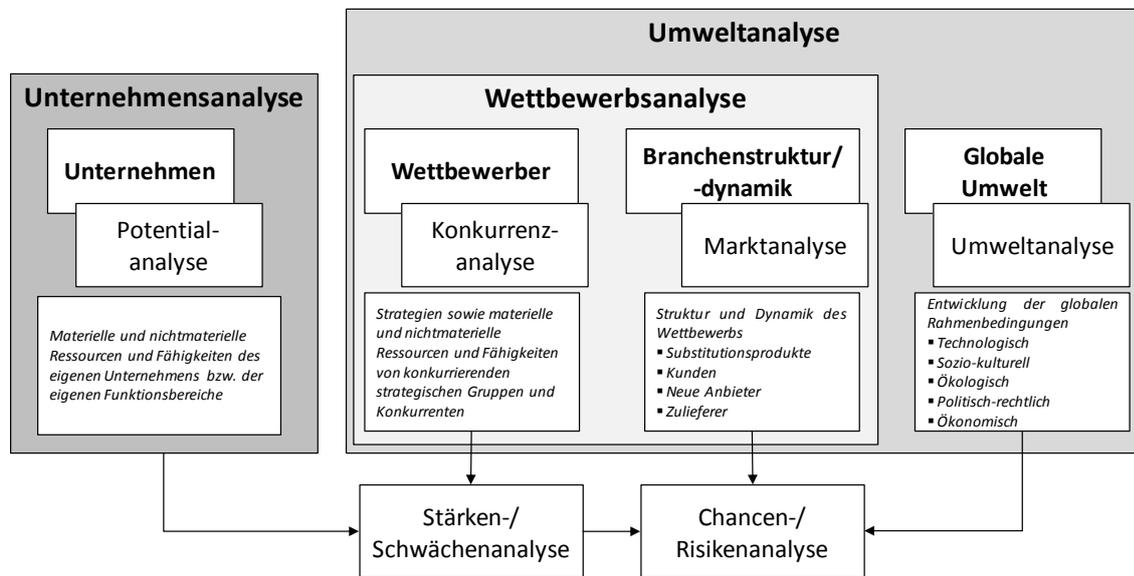


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen globalem Umfeld und Wettbewerbsumfeld (vgl. Nieschlag et al. 1997)

Diese Informationen bilden im weiteren Verlauf der strategischen Planung den Input für die Phase der Prognose, die Aufschluss über zukünftige Entwicklungen liefern soll. Entsprechend der Analysegegenstände lässt sich die Phase der strategischen Analyse grob in drei Teilbereich gliedern: Die Unternehmensanalyse, die Umweltanalyse sowie die daran anschließende Prognose⁹¹. Der integrierten Betrachtung der Analysen kommt somit der Charakter einer SWOT-Analyse⁹² zu (vgl. Bea und Haas 2013; Welge und Al-Laham 2011).

Im Rahmen der Unternehmensanalyse sollen die gegenwärtigen und zukünftigen Stärken und Schwächen des Unternehmens möglichst objektiv und systematisiert ermittelt werden, um darauf basierend Wettbewerbsvorteile zu generieren. Die Unternehmensanalyse gliedert sich in zwei Teile, für deren Betrachtung sowohl quantitative (z. B. bestehende Produktionskapazitäten) als auch qualitative Daten (z. B. die Mitarbeiterzufriedenheit) von Bedeutung sind. In einem ersten Schritt erfolgt die Bestandsaufnahme

⁹¹ vgl. Abbildung 24

⁹² Die SWOT-Analyse ist ein weit verbreitetes Instrument der strategischen Planung. Das Akronym SWOT steht dabei für Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Gefahren).

der materiellen und immateriellen Ressourcen und Fähigkeiten des Unternehmens. Auf diese interne Unternehmensanalyse folgt im Rahmen der Wettbewerbsanalyse eine Konkurrenzanalyse. In der wird die gegenwärtige Strategie von Konkurrenten und deren Ressourcen und Fähigkeiten mit den eigenen gespiegelt, um etwaige Stärken und Schwächen des Unternehmens zu identifizieren. Die Umweltanalyse analysiert Faktoren des globalen und wettbewerbsbezogenen Umfelds, die nicht unternehmensspezifisch sind. Gegenstand der globalen Umweltbetrachtung stellen übergeordnete ökonomische, ökologische, technologische, sozio-kulturelle und politisch-rechtliche Rahmenbedingungen bzw. der Entwicklung dar (vgl. Bea und Haas 2013; Welge und Al-Laham 2011). Die Wettbewerbsanalyse unterteilt sich in eine Branchenstruktur- bzw. Branchenentwicklungsanalyse⁹³ und in eine darauf aufbauende Analyse nach strategischen Gruppen sowie in eine Konkurrenzanalyse mit dem Fokus auf einzelne Unternehmen. Ziel der Umweltanalyse ist die Darstellung von Chancen und Risiken durch zukünftige Umweltentwicklungen. Diese können anschließend mit den zuvor ermittelten eigenen Stärken und Schwächen des Unternehmens abgeglichen werden. Der Einsatz eines Prognoseinstruments erlaubt zudem die Ausweitung der gegenwartsbezogenen Betrachtung in die Zukunft. Die aus der Phase der strategischen Analyse gewonnenen Informationen bilden wiederum den Input für die Strategieformulierung (vgl. Welge und Al-Laham 2011; Alter 2011; Dörrer 2000).

Ausgehend von den Informationen aus der strategischen Analyse bildet die Strategieformulierung verschiedene Strategiealternativen. Diese haben das Potential, das Unternehmen bei der Erreichung der strategischen Ziele zu unterstützen (vgl. Zahn 1988; Hungenberg 2008; Bea und Haas 2013).⁹⁴ Die jeweiligen Strategiealternativen sollten möglichst vollständig beschrieben und ihre dynamischen Auswirkungen sichtbar gemacht werden. Strategien umfassen dabei stets ein ganzes Bündel an Entscheidungen. Eine einmalige isolierte Entscheidung stellt somit keine Strategie dar, selbst wenn sie richtig getroffen wurde. Erfolgreiche Strategien werden vielmehr durch Entscheidungen in allen relevanten Bereichen und auf allen organisatorischen Ebenen generiert (vgl. Zahn 1988; Gälweiler und Schwaninger 2005). Damit eine Strategie die gewünschte Wirkung erreicht, muss sie entsprechend mit übergeordneten Strategien im Einklang stehen, um eine optimale Orchestrierung der strategischen Potentiale zu erreichen.

In einem Unternehmen existieren in der Regel eine Vielzahl an potentiellen Handlungsebenen und -elementen. Entsprechend umfangreich ist auch die Anzahl bestehender Strategiearten. Diese lassen sich nur schwer systematisieren. Jedoch können sie grob nach den organisatorischen Gestaltungsbereichen, den entsprechenden Entwicklungsrichtungen sowie den Wettbewerbsstrategien differenziert werden (vgl. Welge und Al-

⁹³ *Wesentliche Inhalte der Branchenstrukturanalyse sind in Abbildung 26 dargestellt.*

⁹⁴ *Eine wichtige Steuerungsgröße ist die Variation strategischer Erfolgsfaktoren. Im Bereich der Produktion kann dies z. B. eine Änderung der Produktionskapazitäten, der Fertigungstiefe oder der Kostenstruktur sein (vgl. Bea und Haas 2013).*

Laham 2011). Die organisatorischen Gestaltungsbereiche sowie relevante Strategien sind in Abbildung 27 dargestellt.

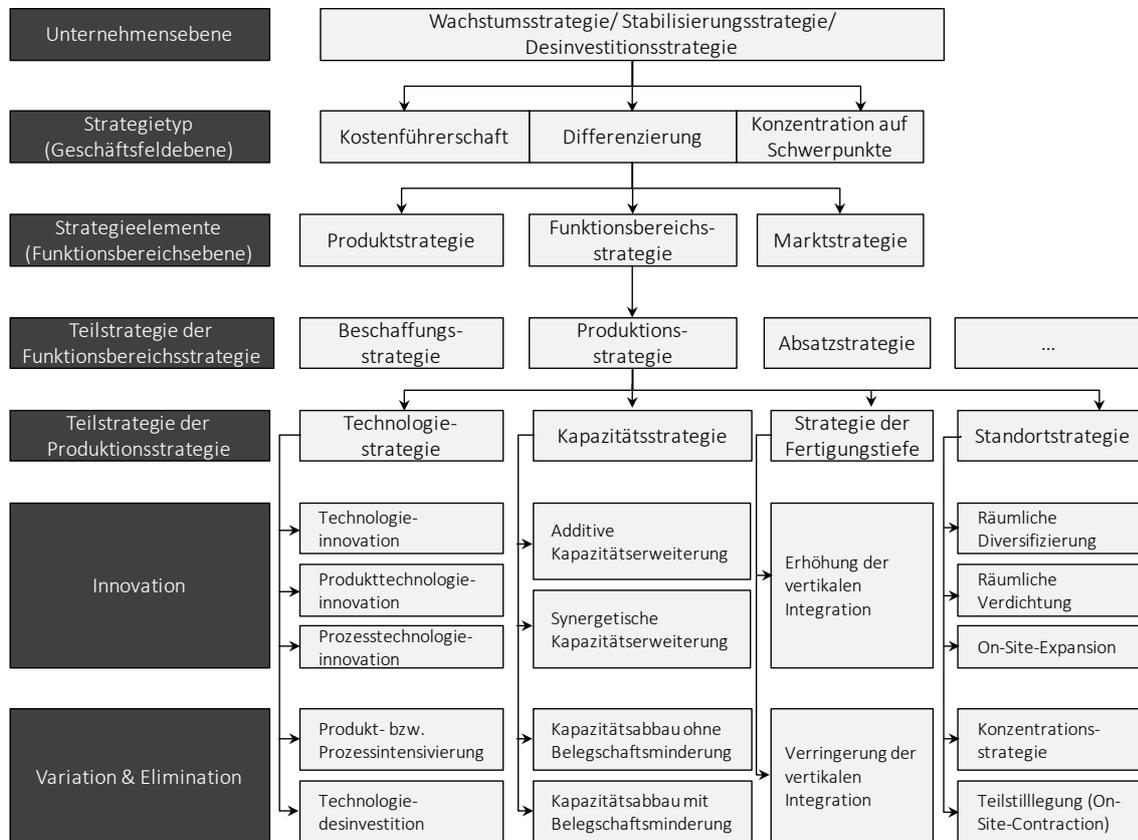


Abbildung 27: Strategieelemente und -ebene in der strategischen Planung (vgl. Zäpfel 2000a)

Entsprechend der Systematisierung nach organisatorischen Gestaltungsbereichen gibt die Unternehmensstrategie die generelle Stoßrichtung für das Unternehmen vor. Es werden die Geschäftsfelder und Märkte festgelegt, in denen das Unternehmen partizipieren soll. Ebenso werden die notwendigen personellen, materiellen und finanziellen Ressourcen auf die Geschäftsfelder verteilt. Je nach der geplanten zukünftigen Rolle eines Geschäftsfeldes oder eines Marktes werden unterschiedliche Entwicklungsstrategien verfolgt. Eine Wachstumsstrategie kann über eine Marktdurchdringung, Produktentwicklung, Marktentwicklung oder eine Diversifikation umgesetzt werden. Die Stabilisierungsstrategie dient oftmals als Übergangsstrategie zur Zeitgewinnung und zielt auf eine Sicherung der derzeitigen Position ab. Die Desinvestition wird meistens reaktiv ergriffen und resultiert in einem Rückzug aus einem Markt (vgl. Welge und Al-Laham 2011; Bea und Haas 2013).

Auf der Ebene der Geschäftsfelder wird festgelegt, wie in dem zuvor definierten Markt Wettbewerbsvorteile generiert werden sollen. Ein Geschäftsfeld kann dabei z. B. in Form einer Produktlinie, einer Division oder als Tochtergesellschaft vorliegen. In diesem

Sinne ist zu entscheiden, ob sich der Geschäftsbereich lediglich auf ein Marktsegment beschränkt oder branchenweit agiert. Zudem ist festzulegen, auf welche Art Wettbewerbsvorteile beim Kunden erreicht werden sollen. So ist es möglich, sich anhand eines Kostenvorsprungs oder durch die Schaffung einer Singularität von den Wettbewerbern abzuheben. Entsprechend lassen sich drei generische Wettbewerbsstrategien formulieren: Die Kostenführerschaft, die Strategie der Differenzierung und die Konzentration auf Schwerpunkte. Die Strategie der Kostenführerschaft zielt darauf ab, der preisgünstigste Wettbewerber am Markt zu sein. Aufgrund dessen soll der Kunde die Produkte nachfragen, auch wenn sie in Bezug auf andere Leistungsmerkmale mit denen der Wettbewerber identisch sind. Um dem Kunden einen geringeren Preis bieten zu können, ist eine konsequente Politik der Kostensenkung zur Erreichung der Kostenführerschaft notwendig. Diese kann zum einen durch strukturelle Kostenunterschiede wie zum Beispiel die Verwirklichung von Skaleneffekten oder Erfahrungseffekten erreicht werden, und zum anderen durch ein proaktives Kostenmanagement. Die Strategie der Differenzierung zielt im Gegensatz darauf ab, eine verbesserte und für den Kunden wahrnehmbare Leistung zu schaffen und somit im Markt ein Alleinstellungsmerkmal zu etablieren. Der Produktpreis ist bei dieser Strategie meist etwas höher als bei den Wettbewerbern, jedoch wird dies aufgrund des spezifischen Mehrwertes in Kauf genommen. Anstelle des Preises treten Kriterien wie eine höhere Produktqualität, verbesserte Servicequalität und Lieferqualität in den Vordergrund. Die Strategie der Schwerpunkte unterscheidet sich vorrangig von den beiden anderen darin, dass sie nicht auf eine gesamte Branche abzielt, sondern sich auf bestimmte Abnehmergruppen bzw. Marktsegmente fokussiert. In diesen wird wiederum entweder die Strategie der Kostenführerschaft oder Differenzierung umgesetzt (vgl. Welge und Al-Laham 2011; Bea und Haas 2013; Zäpfel 2000a; Hungenberg 2008).

Neben der Fragestellung, wie ein Unternehmen im Wettbewerb agiert, besteht zudem das Problem des richtigen Zeitpunkts einer Aktion. Die zeitliche Dimension der Strategien wird als Timing-Strategie bezeichnet und spielt vorrangig bei der Planung von Strategien für einen Markteintritt eine Rolle.⁹⁵ In der Literatur werden drei Typen von Timing-Strategien entsprechend ihrer chronologischen Reihenfolge unterschieden: Pionier-Strategie, Früher-Folger-Strategie und Später-Folger-Strategie.

Ausgangspunkt der Pionier-Strategie ist in der Regel eine Produkt- und/ oder Prozessinnovation, die das Unternehmen auf den Markt bringt. Die Pionier-Strategie erlaubt es dem Unternehmen, insbesondere in jungen und dynamischen Märkten eine Reihe von Vorteilen zu generieren. Hierzu zählt die Verwirklichung einer Quasi-Monopolstellung. Der frühe Markteintritt ermöglicht somit frühzeitig eine Etablierung von Standards und die Durchsetzung eines dominanten Designs. Zudem ergibt sich aus der längeren Ver-

⁹⁵ *Ein geplanter Markteintritt ist zumeist mit einer neuen Produkt- oder Prozesstechnologie verbunden, weshalb die Timing-Strategie auch eng mit der Technologiestrategie verbunden ist. Auf diese wird im Kontext der Produktionsstrategien nochmals genauer eingegangen.*

weildauer im Markt und der damit einhergehenden Wissenskumulierung ein Vorteil in Bezug auf Erfahrungskurveneffekte. Die Preissensibilität der Kunden ist noch nicht sehr ausgeprägt und es lassen sich rasch Marktanteile gewinnen. Der Pionier kann die Zeit nutzen, um Markteintrittsbarrieren für die Folger zu schaffen. In der Pionier-Strategie ruht jedoch auch ein großes Risiko: In jungen Märkten, vor allem, wenn sie zudem sehr dynamisch sind, ist der zukünftige Marktverlauf mit großen Unsicherheiten behaftet. Ebenso sind die Erschließungskosten deutlich höher als für die Nachfolger.

Die Frühen-Folger treten relativ zeitnah nach den Pionieren in einen Markt ein. Diese Strategie bietet den Vorteil, dass Fehler des Pioniers vermieden werden können und die zukünftige Entwicklung des Marktes sich bereits deutlicher abzeichnet. Zudem sind die Markteintrittsbarrieren noch nicht vollkommen entwickelt. Damit der Frühe-Folger erfolgreich ist und sich entsprechende Marktanteile sichern kann, muss er eine Möglichkeit finden, sich im Wettbewerb vom Pionier abzugrenzen.

Der Späte-Folger betritt einen Markt erst relativ spät. Meist befindet sich dieser schon in der Reifephase oder bereits in der Phase der Sättigung bzw. des Alters. Der Markt ist zu diesem Zeitpunkt bereits gut entwickelt und das Risiko überschaubar. Da der Markt bereits von etablierten Unternehmen abgedeckt ist, kann der Späte-Folger zwei Strategien verfolgen, um dennoch im Wettbewerb erfolgreich zu sein. Zum einen kann er über Imitation versuchen, die Produkte anderer Unternehmen nachzuahmen und zu günstigeren Preisen anzubieten oder er hat einen Bereich ausgemacht, der bisher noch nicht bedient wird. Insbesondere die Strategie des Späten-Folgers verdeutlicht nochmals, wie eng die Timing-Strategie mit der Wettbewerbsstrategie verbunden ist (vgl. Fischer et al. 2007; Kamlage und Hildebrandt 2001; Remmerbach 1988).

Nach der Definition adäquater Geschäftsfelder sowie deren Ausrichtung anhand von Wettbewerbsstrategien müssen die hierfür notwendigen Erfolgs- und Leistungspotentiale in den relevanten Funktionsbereichen geschaffen werden. Dies geschieht über funktionsbereichsspezifische Strategien, die entsprechend auch als Funktionsbereichsstrategien bezeichnet werden. Als relevante Strategien werden in der Regel Beschaffungsstrategien, Produktionsstrategien, Absatzstrategien, Technologiestrategien, Personalstrategien und Finanzierungsstrategien genannt (vgl. Bea und Haas 2013). Die zugehörigen Funktionsbereiche sowie deren Einbindung im Produktionssystem wurden bereits in Abbildung 23 dargestellt. Es wurde ebenfalls betont, dass bei einer systemtheoretischen Betrachtung des Produktionssystems die einzelnen Funktionsbereiche nicht isoliert voneinander betrachtet werden können, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Gleiches gilt auch für die Funktionsbereichsstrategien. Damit eine Strategie ihre optimale Wirkung entfalten kann, ist nicht nur auf die bereits erwähnte vertikale Strategieintegration über die Hierarchieebenen hinweg zu achten, sondern zudem auch auf die horizontale Strategiekoordination zwischen den Funktionsbereichen (vgl. Foschiani 1995; Welge und Al-Laham 2011).

Nachdem in der Phase der Strategieformulierung aussichtsreiche Strategiealternativen formuliert wurden, werden diese im letzten Schritt der strategischen Planung, der Strategiebewertung, systematisch bewertet und eine Entscheidung für die vielversprechendste Strategie getroffen. Hierzu werden die Alternativen bezüglich ihres Zielerreichungsgrades, der in der strategischen Zielplanung definierten Ziele bzw. der daraus abgeleiteten Bewertungskriterien beurteilt. Die ausgewählte Strategie wird anschließend in Form von Einzelmaßnahmen implementiert. Im Rahmen der Strategiekontrolle wird sie kontinuierlich auf ihre Erfolgswirksamkeit hin überprüft und gegebenenfalls angepasst (vgl. Bea und Haas 2013; Hahn und Taylor 2006).

4.1.3 Die Produktionsstrategie als Gestaltungsrahmen für das Produktionssystem

Das Ergebnis der strategischen Produktionsplanung stellt die Produktionsstrategie dar. Sie ist Ausgangspunkt für die mittel- und kurzfristige Produktionsplanung und besteht aus einer Sequenz von Entscheidungen bzw. Entscheidungsbündeln, die als Elemente der Produktionsstrategie verstanden werden können. Anhand derer wird über einen gewissen Zeitraum hinweg das Produktionssystem mit spezifischen Leistungspotentialen ausgestattet (vgl. Hayes und Wheelwright 1984; Zäpfel 2000a; Kern 1992). Die Produktionsstrategie bestimmt somit, welche Fähigkeiten und Potentiale im Bereich der Produktion zu entwickeln sind, um einen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens zu leisten (vgl. Zäpfel 2000a). Damit die Produktionsstrategie ihren optimalen Beitrag leisten kann ist es notwendig, jene Entscheidungsbereiche bzw. -kategorien zu identifizieren, die hierfür relevant sind. In der Literatur lassen sich bestehende Ansätze zur inhaltlichen Gliederung der Produktionsstrategien ausmachen (vgl. Tabelle 9).

Aus Tabelle 9 geht hervor, dass sich die jeweiligen Gestaltungsfelder, die entsprechend der Autoren Gegenstand einer Produktionsstrategie sein sollten, sehr ähneln und sich lediglich in der Frage nach dem anzuvisierenden Detaillierungsgrad unterscheiden. Somit können weitestgehend keine Unterschiede zwischen der angloamerikanischen⁹⁶ und deutschen⁹⁷ Literatur festgestellt werden (vgl. Foschiani 1995; Henrich 2002; Zanker 2011).

⁹⁶ Dabei handelt es sich in Tabelle 9 um die Autoren Skinner bis Hill.

⁹⁷ Dabei handelt es sich in Tabelle 9 um die Autoren Zahn und Zäpfel.

Tabelle 9: Literaturüberblick zu strategischen Gestaltungsfeldern in der Produktion

	SKINNER (1969)	HAYES & WHEELWRIGHT (2005)	FINE & HAX (1985)	HILL (2000)	ZAHN (1988)	ZÄPFEL (2000)
Strukturell	Fabrik und Ausrüstung	Kapazität	Kapazität	Kapazität	Basisstruktur der Produktion (Kapazität, Standorte bzw. Betriebsstätten)	Standorte
		Anlagen	Anlagen	Prozesse		Kapazität
		Technologie	Prozesstechnologie	Make or buy		Fertigungstiefe
		Vertikale Integration	Vertikale Integration	Anlagen		Technologie
			Lager			
Infrastrukturell	Fertigungsplanung und Kontrolle	Produktions- und Materialplanung	Produktprogramm und Produktinnovation	Produktionssteuerung	Fertigungsaufgabe	
	Kontrolle	Qualität	Qualitätsmanagement	Qualität	Infrastruktur der Produktion	
	Organisation und Management	Organisation	Human Resources	Organisationsstruktur	Produktionsprozess	
	Produktdesign und -entwicklung	Belegschaft	Produktionsinfrastruktur	Arbeitsorganisation		
	Belegschaft		Käufer-Verkäufer-Beziehung	Produktionsplanung		
				Unterstützungsprozess		

Die Frage nach dem adäquaten Detaillierungsgrad der Gestaltungsfelder lässt sich nicht pauschal beantworten. So befinden sich die aufgelisteten Konzepte zum einen auf einem sehr aggregierten Niveau, wodurch für die Praxis ein gewisser Grad an Aussagekraft verloren geht. Zum anderen ist bei einer detaillierten Betrachtung der Bezug zu den übergeordneten Systemebenen nur noch eingeschränkt gegeben, sodass eine dahingehende Integration und Ausrichtung der Elemente nicht mehr möglich ist (vgl. Henrich 2002).

Im deutschsprachigen Raum gilt die Definition von Zäpfel (2000a) als weitestgehend etabliert und akzeptiert. Er definiert für die Gestaltung der jeweiligen Bereiche entsprechende Teilstrategien:

- Technologiestrategie
- Strategie der Fertigungstiefe
- Kapazitätsstrategie und
- Standortstrategie

Diese Teilstrategien werden im Folgenden detaillierter beschrieben.⁹⁸ Dabei lassen sich die Teilstrategien, ähnlich zu den Entwicklungsstrategien auf Unternehmensebene, ebenfalls nach Entwicklungsrichtungen unterscheiden. Je nachdem, welche Merkmale

⁹⁸ Hierzu ist anzumerken, dass jede dieser Teilstrategien für sich alleine genommen bereits einen umfassenden Forschungsbereich darstellt. Daher wird im Folgenden nur auf die für diese Arbeit relevanten Hintergründe und Informationen eingegangen. Eine umfassende Abhandlung, die den jeweiligen Forschungsbereichen gänzlich gerecht werden würde, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht wiedergegeben.

eine Teilstrategie aufweist, handelt es sich um eine Innovations-, Variations- oder Eliminationsstrategie. Die Innovation ist durch den Aspekt der Neuheit geprägt, der sich auf ein Produkt, einen neuen Markt oder eine neue funktionale Fähigkeit beziehen kann. Im Fall der Variation werden hingegen Produkte oder Verfahren verändert. Der Unterschied zwischen Innovation und Variation kann graduell, d. h. fließend sein. Die Elimination beinhaltet letztlich Aussagen zur Bereinigung des Produktprogramms oder bisheriger betrieblicher Potentiale. Diese können einzelne Maschinen betreffen oder aber ganze Produktionsbereiche und Wertschöpfungsstufen umfassen (vgl. Zäpfel 2000a).

4.1.3.1 Technologiestrategie

Der Technologiestrategie kommt bei der strategischen Planung der Produktion eine zentrale Rolle zu, insbesondere für neue Märkte. Sie ist wichtiger Bestandteil bei der Umsetzung einer Wettbewerbsstrategie und kann mitunter auch entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung eines Marktes nehmen. Die Technologiestrategie lässt sich in Produkt- und Prozesstechnik unterteilen, durch deren Kombination sich verschiedene Technologiestrategien ableiten lassen.

Tabelle 10: Zusammensetzung der Technologiestrategien

		Produkttechnik	
		<i>bekannt</i>	<i>neu</i>
Prozesstechnik	<i>bekannt</i>	Produkt-/Prozessintensivierung	Produkt(technologie)innovation
	<i>neu</i>	Prozess(technologie)innovation	Technologieinnovation

Die Produkt- bzw. Prozessintensivierung strebt eine effiziente Umsetzung von bereits bekannten technischen Lösungen an. Ein Beispiel hierfür ist die Verbesserung eines Produkts oder Prozesses auf Basis wertanalytischer Maßnahmen. Die Produkttechnologieinnovation hingegen ist geprägt von einer Neuerung auf Seiten des Produkts. Eine solche Innovation besitzt das Potential, die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens maßgeblich zu beeinflussen. Traditionell bildet die Produktinnovation einen Kernbereich der Forschung und Entwicklung (FuE), wodurch an dieser Stelle auch Schnittpunkte mit der FuE-Strategie gegeben sind. Einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der angestrebten wettbewerbsstrategischen Ziele liefert das Produktionssystem auf Basis von Prozesstechnologieinnovationen. Hierbei manifestieren sich technologische Neuerungen in Form von Verbesserungen des Produktionsprozesses. Je nach verfolgter Wettbewerbsstrategie konzentrieren sich dabei die Maßnahmen im Falle der Kostenführerschaft auf eine Erhöhung der Produktivität, während im Falle der Differenzierung eher die Reduzierung von Lieferzeiten oder eine Steigerung der Flexibilität im Mittelpunkt steht. Im extremsten Fall, wenn sowohl die Produkt- als auch die Prozesstechnik neu sind, han-

delt es sich um eine Technologieinnovation. Diese Kombination birgt für das Unternehmen ein hohes Marktpotential, da es hierdurch eine Führungsposition erlangen kann. Gleichzeitig besteht jedoch auch ein hohes Risiko, da ein komplett neues Anwendungs-Know-how gefordert wird. Solche Lernprozesse können mitunter sehr langwierig sein. Eine frühzeitige Identifizierung von Erfolgspotentialen durch Produkt- oder Prozessinnovationen ist im Rahmen der strategischen Produktionsplanung von großer Bedeutung. Prognosen zur Technologieentwicklung und die Einschätzung daraus resultierender Auswirkungen durch deren Einführung können hierbei behilflich sein (vgl. Foschiani 1995, 1995; Zäpfel 2000a; Dörrer 2000).

Der Zusammenhang zwischen Branchenentwicklung und Innovationsentwicklung wurde im sogenannten Branchenentwicklungsmodell von Abernathy & Utterback (1975) beschrieben. Aus diesem kann der jeweilige Stellenwert einer Technologiestrategie über die Zeit in allgemeiner Art abgeleitet werden.⁹⁹ Es konstatiert, dass in der Phase der Branchenentwicklung Produktinnovationen und die Suche nach einem „dominanten Design“ eine vorrangige Rolle spielen. In der zweiten Phase treten verstärkt Prozessinnovationen in den Vordergrund. Die Phase wird durch das Streben nach Kostenreduzierung und Standardisierung geprägt. In der dritten Phase treten sowohl die Produkt- als auch die Prozessinnovationen stark in den Hintergrund und der Preiswettbewerb dominiert. Die Gewinnmargen sinken und den Betriebsgrößeneffekten kommt eine hohe Bedeutung zu (vgl. Abernathy und Utterback 1975).¹⁰⁰

Ein wesentlicher Entscheidungsbereich der Technologiestrategie betrifft die technische Ausstattung des Produktionssystems. Typische Fragestellungen betreffen die Anschaffung neuer bzw. die Verwendung alter Anlagen, den Automatisierungsgrad oder die Integration von Anlagen in das Gesamtgefüge. Diese Entscheidungen bedürfen einer engen Abstimmung mit anderen Teilstrategien wie etwa der Kapazitätsstrategie. Zusätzlich spielt bei der Wahl auch die eingeschlagene Wettbewerbsstrategie sowie die Timing-Strategie eine Rolle. Generell sollten daher in einem Unternehmen die technologische Innovation und die angestrebte Marktentwicklung parallel vorangetrieben werden (vgl. Foschiani 1995; Zäpfel 2000a).

4.1.3.2 Strategie der Fertigungstiefe

Ein Produkt durchläuft bis zu seiner Fertigstellung eine Vielzahl unterschiedlicher Wertschöpfungsstufen, in denen eine ganze Reihe von arbeitsteiligen Wertschöpfungspro-

⁹⁹ Da die Darstellung auf Basis eines Fallbeispiels aus der Automobilindustrie erstellt wurde, darf diese nicht als allgemeingültig aufgefasst werden. Außerdem muss die Branche den folgenden drei Aspekten gerecht werden: In der Phase der Branchenentstehung muss die Produktinnovation ausschlaggebend sein, eine Standardisierung bzw. ein „dominantes Design“ ist im Laufe des Branchenzyklus möglich und es besteht ein Potential zur Massenfertigung.

¹⁰⁰ An dieser Stelle soll nochmals auf die enge Verknüpfung mit den im vorherigen Teilkapitel beschriebenen Timing-Strategien hingewiesen werden.

zessen getätigt werden. Eine Produktionsstufe ist dabei eine Wertschöpfungsstufe innerhalb des Produktionsbereichs. Diese kann mehrere Teilprozesse oder Arbeitsgänge umfassen, wobei sich die einzelnen Stufen durch marktgängige Produkte oder eine Zwischenlagerung abgrenzen lassen (vgl. Mikus 1998; Irle 2011).

Für ein Unternehmen ist es unerlässlich, seine Position innerhalb einer Wertschöpfungskette klar zu definieren. Das Maß für den Umfang an Wertschöpfung, den ein Unternehmen durch die eigene Produktion im Verhältnis zur Gesamtwertschöpfung abdeckt, ist die Fertigungstiefe¹⁰¹. Sie kann als Ergebnis aller Make-or-buy-Entscheidungen¹⁰² aufgefasst werden, durch die der Wertschöpfungsumfang bzw. die Produktionsstufen festgelegt werden und die das Unternehmen beabsichtigt selbst durchzuführen¹⁰³ bzw. die fremd zu beschaffen sind. Je nach Entwicklungsrichtung der vertikalen Integration lassen sich drei Strategien der Fertigungstiefe charakterisieren (vgl. Zäpfel 2000a).¹⁰⁴ Diese drei Strategien werden in Tab. 11 abgebildet.

Tabelle 11: Strategien der Fertigungstiefe (vgl. Zäpfel 2000a)

Strategie der Fertigungstiefe		
<i>Innovationsstrategie</i>	<i>Variations- bzw. Eliminationsstrategie</i>	<i>Kooperationsstrategie</i>
Erhöhung der vertikalen Integration in der Produktion	Verringerung der vertikalen Integration in der Produktion	Quasi-Integration rechtlich selbständiger Unternehmen

Die Innovationsstrategie zeichnet sich durch eine Erhöhung des Eigenfertigungsanteils bzw. der Anzahl an Produktionsstufen für ein bestimmtes Endprodukt aus. Als Konsequenz werden bisher unternehmensextern bezogene Leistungen selbst erbracht. Betrifft dies bisher von Lieferanten bezogene Leistungen, handelt es sich um eine Rückwärtsintegration, während es sich um eine Vorwärtsintegration handelt, sobald das Unternehmen in den Produktbereich seiner Abnehmer vordringt. Demgegenüber steht die Konzentrationsstrategie, bei der das Unternehmen bisher selbst geleistete Produktionsstufen an Externe vergibt und diese Leistungen zukünftig fremdbezieht. Die Kooperationsstrategie bietet eine weitere Möglichkeit, die Fertigungstiefe zu variieren. Hierbei verpflichten sich zwei vertikal verbundene Unternehmen, durch Verträge oder spezifische Eigentumsverhältnisse zusammenzuarbeiten (vgl. Zäpfel 2000a; Irle 2011).

¹⁰¹ *Synonym hierzu wird auch der Begriff des „vertikalen Integrationsgrades“ verwendet.*

¹⁰² *Make-or-Buy-Entscheidungen im Bereich der Fertigung sind Entscheidungen über die Eigen- bzw. Fremdfertigung von Komponenten (vgl. Zäpfel 2000a).*

¹⁰³ *Die Produktionsstufen können dabei von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Montage des Endprodukts reichen (vgl. Irle 2011).*

¹⁰⁴ *Eine ähnliche Einteilung nimmt auch Porter vor (vgl. Porter 2013). Harrigan erweitert die Einteilung nochmals durch eine Unterteilung nach der Industriestabilität, Verhandlungsmacht des Unternehmens, der verfolgten Wettbewerbsstrategie sowie des Branchenlebenszyklus (vgl. Harrigan 1983, 1986).*

Der strategischen Entscheidung zur Gestaltung der Fertigungstiefe kommt eine elementare Rolle zu. Sie übt einen starken Einfluss auf die Struktur sowie die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens aus. Entsprechend kann es eine Vielzahl möglicher Motivationen geben, den Grad der vertikalen Integration zu variieren. Für eine Erhöhung der vertikalen Integration im Zuge einer Innovationsstrategie wird häufig das Potential zur Kostenreduzierung genannt. Im Fall der Rückwärtsintegration betrifft dies in erster Linie die Einsparung von Transportkosten und/oder der Margen der Lieferanten. Dabei ist jedoch stets zu beachten, dass für eine Integrationsentscheidung die Stückkosten für die Vorprodukte stets im Vergleich zu dem Beschaffungspreis des Lieferanten zu bewerten sind. Denn die Stückkosten sind stark abhängig von der kumulierten Produktionsmenge. Der Generierung von Skalen- und Erfahrungseffekten kommt somit eine zentrale Rolle zu. Im Vergleich zum Bezug der Vorprodukte vom Lieferanten sollte ein Unternehmen daher eine kritische Menge dieser Vorprodukte benötigen, um vergleichbare oder günstigere Stückkosten realisieren zu können. Weitere Kostenvorteile können sich durch geringere Transaktionskosten ergeben (vgl. Picot 1982). Wird eine Integrationsentscheidung allerdings lediglich anhand ökonomischer Kriterien getroffen, besteht die Gefahr der Vernachlässigung strategischer Aspekte der Entscheidung (vgl. Mikus 1998). In der Automobilindustrie konnte beispielsweise in den vergangenen Jahren ein Trend hin zur Verringerung der Fertigungstiefe beobachtet werden. Eine solche Entwicklung kann dazu führen, dass im Unternehmen nur noch solche Wertschöpfungsprozesse stattfinden, die auch ein hohes Gewinnpotential versprechen, jedoch relativ wertschöpfungsarm sind. Ferner besteht die Gefahr, dass Neuheit und Qualität eines Vorprodukts das Endprodukt maßgeblich beeinflussen. Dies erschwert entsprechend eine Abgrenzung vom Wettbewerb, da ebenso Konkurrenten auf die Produkte des Lieferanten zugreifen könnten. Gerade vor dem Gesichtspunkt der Differenzierung spielt auch der Schutz der eigenen Kernkompetenzen, insbesondere wenn es sich dabei um Schlüsselkomponenten handelt, eine wettbewerbskritische Rolle. Unternehmen können auch in ein starkes Abhängigkeitsverhältnis der Lieferanten geraten, in dem diese ihre Lieferantenmacht voll ausspielen und Preise diktieren oder die Versorgungssicherheit nicht mehr gewährleistet ist. Im extremsten Fall kann auch der Lieferant sich zu einer Vorwärtsintegration entscheiden und als Konkurrent auftreten (vgl. Irle 2011; Foschiani 1995; Mikus 1998).

Für eine Verringerung der Fertigungstiefe im Sinne einer Konzentrationsstrategie sprechen ebenfalls Kostenaspekte. So kann ein Lieferant bei größeren Produktionsmengen eventuell geringere Stückkosten erzielen oder auf günstigere Bezugsquellen zurückgreifen. Zudem sinken die Kosten für Forschung und Entwicklung, wenn diese vom Lieferanten entwickelt werden sowie die Kosten für die Lagerhaltung. Weiterhin entfallen Investitionen für Anlagen und die entsprechende Infrastruktur. Zudem wird das Bestandsrisiko an den Lieferanten ausgelagert. Das eigene Unternehmen ist somit in der Lage, je nach Entwicklung des Marktes, flexibel auf Nachfrageschwankungen zu reagieren. Dies betrifft auch die verwendete Technik, falls ein anderer Lieferant über ein besseres Produkt verfügt.

Die Kooperationsstrategie stellt eine Zwischenform dar und zeigt je nach Ausprägung der Quasi-Integration einzelne Vor- und Nachteile der genannten Strategien auf. Gängige Formen der Quasi-Integration sind Strategische Allianzen oder Joint Ventures (vgl. Irle 2011; Mikus 1998; Zäpfel 2000a; Foschiani 1995).

Zur Bestimmung einer adäquaten Fertigungstiefe sollten alle genannten Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen werden. Eine Entscheidung sollte zudem stets im Kontext der unternehmensspezifischen Produktionskompetenzen, der verfolgten Wettbewerbsstrategie sowie der Unternehmensphilosophie gefällt werden.

4.1.3.3 Kapazitätsstrategie

Die Kapazitätsstrategie bestimmt im Rahmen der Produktionsstrategie das Leistungsvermögen des Produktionssystems und zwar stets unter der Prämisse, die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens entsprechend seiner strategischen Ziele zu steigern oder zu erhalten. Als die zentralen Faktoren der Kapazität werden Produktionsanlagen und Personal erachtet. Ergänzt werden diese durch sekundäre Faktoren wie Energie, Material oder Finanzmittel (vgl. Steven 1996; Betge 1996). Sekundäre Faktoren sind dabei nicht direkt kapazitätsbestimmend, können diese jedoch restriktiv beeinflussen, wenn sie nicht in ausreichender Menge verfügbar sind (vgl. Kaluza 1994). Die Kapazität wird weiterhin in qualitative und quantitative Kapazität unterschieden, wobei sich erstere auf die Art und Qualität des Leistungsvermögens bezieht. Die quantitative Kapazität beschreibt das mengenmäßige Leistungsvermögen (vgl. Corsten 2007). Die strategische Planung der Produktionskapazität beruht in der Regel auf Nachfrageprognosen. Für die einzelnen Alternativen der Kapazitätsanpassung sind entsprechende Annahmen für die hierzu notwendigen finanziellen Aufwendungen zu schätzen. Ebenfalls ist eine Technologieprognose¹⁰⁵ mit in die Analyse einzubeziehen, um das Risiko der Anschaffung von schnell veraltenden Kapazitäten zu minimieren. Die Wahl der Kapazitätsalternative ist somit eng mit der Technologiewahl verbunden. Des Weiteren steht die Kapazitätsdimensionierung in direkter Wechselwirkung mit der Wahl der Fertigungstiefe. So ist die Kenntnis der angestrebten Fertigungstiefe die Voraussetzung für eine effektive Dimensionierung der Produktionskapazitäten. Auf der anderen Seite kann über die Fertigungstiefe nicht entschieden werden, wenn keinerlei Kenntnis über den damit einhergehenden Umfang der Produktionskapazitäten und den daraus resultierenden finanziellen Anforderungen besteht. Aufgrund der geschilderten Wirkzusammenhänge mit anderen Teilstrategien sowie der Höhe und der Irreversibilität des Kapitaleinsatzes, gehört die Entscheidung über die Produktionskapazitäten zu einer der wichtigsten strategischen Entscheidungen im Produktionsbereich (vgl. Hinterhuber 2014; Zäpfel 2000b, 2000a). Entscheidungen, die im Rahmen der Kapazitätsstrategie getroffen werden, betreffen beispielsweise Art, Größe und Timing der Kapazitätsveränderung sowie etwaige Richtlinien, nach denen diese vorgenommen werden. Kapazitätsstrategien lassen sich dabei

¹⁰⁵ Siehe hierzu auch Kapitel 4.1.3.1.

äquivalent zu den bereits erläuterten Teilstrategien gemäß ihrer Entwicklungsrichtung in Innovations- und Konzentrationsstrategien unterscheiden. Die Innovationsstrategie hat zum Ziel, das Leistungsvermögen des Produktionssystems zu steigern und einer gestiegenen Nachfrage anzupassen. Eine Kapazitätserweiterung kann hierbei über zwei Arten geschehen: Bei einer additiven Erweiterung erfolgt dies durch die Bereitstellung zusätzlicher, gleichartiger Betriebsmittel. Es handelt sich dabei um eine rein quantitative Kapazitätserweiterung. Wird darüber hinaus auch eine qualitative Steigerung erreicht, z. B. durch den Einsatz innovativer Produktionsanlagen, so handelt es sich um eine synergetische Kapazitätserweiterung. Zeichnet sich auf dem Nachfragemarkt ein Rückgang oder gar ein Einbruch ab, kann es zu einem Abbau von Arbeitsplätzen oder im Extremfall zur Stilllegung eines ganzen Betriebs kommen. Der Fokus solcher Kapazitätskonzentrationsstrategien liegt auf der Anpassung des Leistungsvermögens an die geringere Nachfrage sowie auf der Reduzierung von Bereitschaftskosten durch das Vorhalten von Kapazitäten. Der Abbau von Kapazitäten kann überdies mit oder ohne Belegschaftsverminderung vonstattengehen. Bei einem nur vorübergehenden Absinken der Nachfrage kann eine Verminderung der Belegschaft durch Maßnahmen wie Überstundenabbau oder etwa die Einführung von Kurzzeit abgefedert werden. Solche Instrumente sind von Vorteil, da durch die Fluktuation der Mitarbeiter auch stets ein Know-how-Abfluss stattfindet, der bei Neueinstellung erst wieder mit zeitlicher Verzögerung aufgebaut werden kann (vgl. Zäpfel 2000a; Foschiani 1995).

Die angestrebte Kapazitätsänderung richtet sich, wie bereits erwähnt, nach dem geplanten Produktionsvolumen, welches wiederum von der prognostizierten Nachfrage abhängt. Je nachdem wie die Kapazitätsänderung in Abhängigkeit der Nachfrage erfolgt, werden drei generelle Richtungen unterschieden: Die offensive Lead-Strategie, die defensive Lag-Strategie und die Track (bzw. Match)-Strategie. Im Zuge einer Lead-Strategie werden die Kapazitäten basierend auf zukünftigen Prognosen der Nachfrage offensiv ausgebaut. Die Strategie zielt darauf ab, die Lieferzuverlässigkeit stets zu wahren und eventuelle Kosten aufgrund von Fehlmengen zu vermeiden. Die Strategie birgt allerdings auch ein gewisses Risiko: Im Fall einer Fehleinschätzung der zukünftigen Marktentwicklung entstehen hohe Überkapazitäten. Diese sind nicht per se als Problem anzusehen, da sie dem Unternehmen auch eine gewisse Flexibilität bezüglich periodisch schwankender Nachfrage verleihen können. Handelt es sich jedoch um eine längerfristige Stagnation oder einen Einbruch der Nachfrage, wirken sich die resultierenden Fixkosten negativ auf den Deckungsbeitrag aus.¹⁰⁶ Um dieses Risiko zu vermeiden, bedienen sich vor allem preissensitive Unternehmen der sogenannten Lag-Strategie, die eine der Lead-Strategie entgegengesetzte Aufbaupolitik betreibt. Sie ist sehr defensiv geprägt

¹⁰⁶ Wird in der Automobilindustrie etwa ein Werk lediglich zu 50 Prozent ausgelastet, entstehen dennoch 75 Prozent der Kosten einer vollen Auslastung. Dies bedeutet, dass sich die Produktionskosten im Vergleich zur Vollaustattung um den Faktor 1,5 erhöhen. Beträgt die Auslastung dagegen 80 Prozent, belaufen sich die Kosten lediglich auf 90 Prozent einer Vollaustattung (vgl. Holweg und Pil 2004).

und es werden nur Kapazitäten aufgebaut, wenn die bestehenden bereits voll ausgelastet sind. Entsprechend fallen die Stückkosten geringer aus und Investitionen können weiter in die Zukunft verlagert werden. Dabei wird in Kauf genommen, dass die Nachfrage zeitweise nicht voll bedient werden kann, was einen negativen Einfluss auf die Kundenzufriedenheit hat und auch mögliche Strafzahlungen aufgrund von Fehlmengen nach sich ziehen kann. Eine Kombination beider Extremstrategien bildet die Match-Strategie. Der Kapazitätsaufbau wird moderat vorangetrieben mit dem Ziel, die Abweichung zwischen Nachfrage und Produktionskapazität möglichst gering zu halten. Die Wahl einer geeigneten Kapazitätsstrategie kann somit die eingeschlagene Wettbewerbsstrategie maßgeblich unterstützen (vgl. Hayes und Wheelwright 1984; Olhager et al. 2001; Zäpfel 2000a; Foschiani 1995).

4.1.3.4 Standortstrategie

Nachdem in den vorangegangenen Teilstrategien geklärt wurde, was von dem Produktionssystem wie, in welchem Umfang und unter Einsatz welcher Kapazitäten hergestellt wird, ist die Frage nach dem „wo“ Gegenstand der Standortstrategie. In deren Rahmen wird ein Konzept für die langfristig geplante Verteilung der Produktionskapazitäten auf bereits bestehende oder neue Produktionsstätten entwickelt. Entsprechend der Entwicklungsrichtung kann auch bei der Standortstrategie nach Innovations-, Variations- und Eliminationsstrategie unterschieden werden. Die Innovationsstrategie determiniert dabei, wie Kapazitätserweiterungen räumlich verteilt werden. Erfolgt der Aufbau an bereits erschlossenen Standorten, handelt es sich um eine räumliche Verdichtung. Andernfalls um eine räumliche Diversifizierung. Im Rahmen der Variationsstrategie werden bestehende Kapazitäten auf andere Standorte verteilt. Findet eine Agglomeration an einem Standort statt, handelt es sich um eine Konzentration (vgl. Zäpfel 2000a; Hayes und Wheelwright 1984; Foschiani 1995).

Die Wahl des Produktionsstandortes im Zuge einer geplanten Erweiterung kann als kritischer Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit angesehen werden und sollte entsprechend rational und systematisch getroffen werden. Die Bewertung und die Entscheidung für einen potentiellen Standort erfolgt anhand dessen standortspezifischen Eigenschaften und Bedingungen, die einen Einfluss auf das Zielsystem des Entscheiders und den Erfolg eines Unternehmens ausüben. Diese Kriterien werden als Standortfaktoren bezeichnet. Zur vollständigen Erfassung relevanter Faktoren wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl an Systematiken entwickelt. Die älteste stammt von Alfred Weber aus dem Jahr 1909. Er entwickelte ein geschlossenes, statisches Modell, das sich vorrangig auf die Parameter Transportkosten, Arbeitskosten und etwaige Agglomerationsvorteile und -nachteile konzentriert (vgl. Kinkel 2004). Eine wesentliche Weiterentwicklung der „reinen Theorie“ nimmt Behrens vor (vgl. Behrens 1971). Er erweitert die kostenfokussierte Betrachtung um ertragsrelevante Standortfaktoren und ergänzt somit die Betrachtung des Gütereinsatzes durch die Absatzseite. Zudem erweitert er die bisher rein quantitativ geprägten Standortfaktoren um relevante qualitative Faktoren. Darauf aufbauend empfiehlt Hansmann (1974), die qualitativen Standortfaktoren von Pla-

nungs- bzw. Entscheidungsträgern subjektiv schätzen zu lassen und durch heuristische Entscheidungsmodelle zu bewerten (vgl. Hanssmann 1974). Eine Auflistung der Standortfaktoren entsprechend Hansmann findet sich in der nachfolgenden Tabelle 12.

Tabelle 12: Standortfaktoren nach Hansmann (vgl. Hanssmann 1974)

Quantitative Standortfaktoren	Qualitative Standortfaktoren
Transportkosten	Grundstück (Lage, Bauvorschriften etc.)
Grundstücks- und Erschließungskosten	Verkehrslage des Grundstücks
Gebäudekosten	Verfügbarkeit von Arbeitskräften
Personalkosten	Transportsektor (Speditionen, Seehafen etc.)
Beschaffungskosten der Materialien	Absatz (Kaufkraft, Wettbewerb etc.)
Finanzierungskosten	Investitions- und Finanzierungsbereich
Regionale Fördermaßnahmen	Infrastruktur
Grund- und Gewerbesteuer	
Gewinnsteuern	
Absatzpreise	

Eine Erweiterung um eine interne Sicht des Unternehmens in Bezug auf dessen Ziele und Strukturen erfolgte durch Hummel (1997). In seiner umfangreichen Erweiterung nimmt er zusätzlich eine Unterscheidung nach Länder- und Branchenfaktoren vor (vgl. Hummel 1997). Aufgrund der vorherrschenden Konzentration der Systematiken auf Umfeldfaktoren im Sinne von Produktions- und Marktfaktoren werden Standortfaktoren aus Unternehmenssicht als passive und gegebene Zustände aufgefasst. Die Möglichkeit als Unternehmen aktiv auf diese einzuwirken, wurde bereits von Hummels aufgegriffen und in der Systematik von Kinkel (2004) explizit integriert. In Form sogenannter Performancefaktoren wird die effektiv erreichbare Leistungsfähigkeit eines Unternehmens an einem Standort betrachtet. Zudem räumt Kinkel dem Bedarf an verschiedenen funktionierenden Netzwerken eine große Bedeutung ein, da deren Existenz und Ausprägung einen wesentlichen Beitrag zum Unternehmenserfolg liefern können. Während in vorherigen Ansätzen das Bestreben vorherrschte, Standortfaktoren in möglichst umfassender Zahl zu erfassen, betont die Systematik von Kinkel die Konsolidierung auf die wesentlichen, erfolgskritischen Faktoren (vgl. Kinkel 2004). Da die unternehmensspezifische Internationalisierungsstrategie ebenfalls eine bedeutende Rolle bei der Auswahl der Standortfaktoren spielt, ist deren Auswahl von der jeweiligen Branche und dem Unternehmen abhängig und somit sehr individuell. Den Kategorien sind daher Standortfaktorenbündel untergeordnet, deren Aufgabe es ist, ein adäquates Suchraster für die betreffende Entscheidungssituation vorzugeben. Für die Automobilindustrie haben Kinkel et al. (2007) folgende Standortfaktorenbündel definiert (vgl. Abbildung 28).



Abbildung 28: Standortfaktorenbündel für Automobilzulieferer (vgl. Kinkel et al. 2007)

Bei der Standortbewertung handelt es sich wie bei der Großzahl strategischer Entscheidungen um eine komplexe und unsichere Entscheidungssituation. Der Verfügbarkeit von Informationen kommt daher eine große Bedeutung zu (vgl. Kinkel 2004; Kinkel et al. 2007).

In der Praxis existiert jedoch kein Bewertungsverfahren, das alle Entscheidungskriterien in adäquater Art und Weise berücksichtigen kann. Daher wird bei der Beurteilung eines Standortes vielmehr ein Mix aus verschiedenen Verfahren herangezogen. Bei den gängigen quantitativen Verfahren handelt es sich um statische und dynamische Verfahren der Investitionsrechnung. Auf Seiten der qualitativen Verfahren kommen Checklisten, Nutzwertanalysen sowie Country-Ratings zum Einsatz. Die Standortentscheidung an sich wird dabei häufig in vier Phasen unterteilt (vgl. Kinkel 2004; Hummel 1997; Abele 2006):

- Strategieprüfung: Definition des strategischen Ziels der Standortentscheidung und Überprüfung der Passfähigkeit zur generellen Wettbewerbsstrategie des Unternehmens.
- Vorauswahl bzw. Grobselektion: Reduzierung der Standortalternativen auf ein bearbeitbares Maß. Hierzu finden häufig Checklisten oder Country-Ratings Anwendung, wobei nur wenige Faktoren untersucht werden, die quasi als Mindestschwelle aufgefasst werden können. Für die verbleibenden Standorte wird eine Rangfolge erstellt. Diejenigen Faktoren, die zur Vorselektion herangezogen werden, sollten auf

seriösen und allgemein zugänglichen Daten beruhen. Solche Faktoren können zum Beispiel politische und rechtliche Stabilität, Marktgröße und -entwicklung oder die Arbeitsmarktsituation sein.

- Detaillierte Standortbewertung bzw. Feinselektion: Für die verbleibenden Standorte werden in dieser Phase detaillierte Informationen (auch vor Ort) erhoben. Die Standortalternativen werden anschließend einer Vergleichsrechnung unterzogen.
- Umsetzung der Standortentscheidung: Der Standort wird unter der geplanten Beteiligungs- und Eigentumsform umgesetzt.

Von methodischer Seite aus bieten die Vollkostenrechnung, die Investitionsrechnung und die Nutzwertanalyse speziell in der dritten und vierten Phase geeignete Hilfestellungen (vgl. Kinkel 2004; Kinkel et al. 2007; Abele 2006). Trotz des gegebenen Methodenportfolios bestehen weiterhin Defizite, die sich auf die Entscheidungsqualität auswirken. Ein wichtiger Punkt hierbei stellt die Dynamik der Standorte und damit der Standortfaktoren dar. Eine verlässliche Prognose bzgl. der Höhe und Verteilung zukünftiger Zahlungsströme einer bestimmten Standortalternative ist daher fast unmöglich. Die Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung des exogenen Umfelds sowie des Performanceniveaus an einem Standort müssen somit auch berücksichtigt werden. Häufig wird in der Praxis hierzu die Szenario-Technik angewendet. Daran anknüpfend wird bemängelt, dass die gängigen Modelle zur Standortentscheidung von einem einmaligen Entscheidungsprozess unter stabilen Umweltbedingungen ausgehen. Da die Standorte jedoch einer dynamischen Entwicklung unterworfen sind, sollten die Entscheidungen einem systematischen Erfolgscontrolling und Monitoring unterworfen sein (vgl. Kinkel 2004). Eine optimale Entscheidungsgrundlage wäre gegeben, wenn alle zukünftigen Kosten und Erlöse eines Unternehmens, die durch die Standortentscheidung beeinflusst werden, ermittelt werden könnten. Da dies jedoch kaum möglich ist, bedarf es Verfahren und Instrumente, die bei der Risikobewältigung unterstützen und für eine unsichere und komplexe Entscheidungssituation eine möglichst optimale Informationsgrundlage bieten (vgl. Hummel 1997).

4.2 Implikationen für die strategische Produktionsplanung auf jungen Märkten am Beispiel der LIB

In dem vorangegangenen Kapitel 2 wurde zunächst beschrieben, durch welche Rahmenbedingungen der Markt für LiB beeinflusst wird und erläutert, wie der Markt und das dortige Wettbewerbsumfeld beschaffen sind. Anschließend wurde in Kapitel 3 auch auf für das Unternehmensumfeld relevante Aspekte wie potentielle Formen der Produktgestaltung und das zu dessen Produktion benötigte Produktionssystem eingegangen. Dieses Kapitel hat sich mit dem Prozess der strategischen Produktionsplanung befasst. Diese dient Planern als Methodik, um rational und systematisch Strategien zu identifizieren, mit denen sie das Produktionssystem entsprechend ihrer Zielvorstellung gestalten können. Die spezifischen Eigenschaften von jungen Märkten, wie sie auch in

Kapitel 2.2.1 beschrieben wurden, führen jedoch zu Problemen und Defiziten, die den Prozess der strategischen Planung erschweren oder auch scheitern lassen.

In diesem abschließenden Unterkapitel werden, basierend auf einer Synthese der Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln, Implikationen und daraus resultierende Defizite bei der strategischen Produktionsplanung für den Markt der LiB bestimmt. Die Betrachtung erfolgt dabei entlang den Phasen der strategischen Planung und stellt die Lösung der in Kapitel 1.2 formulierten Forschungsfrage 1 dar.

4.2.1 Implikationen für die strategische Analyse

Das globale Umfeld des Marktes für LiB ist geprägt von einer großen Anzahl an Parametern, die zum Teil direkt auf den Markt für LiB einwirken und zum Teil mittelbar über die Elektromobilität. Zudem bestehen zwischen den externen Rahmenbedingungen sowie deren zugehörigen Parametern Wirkbeziehungen und Rückkopplungen.¹⁰⁷ Daraus resultiert eine *hohe Komplexität* innerhalb des Systems. Zudem umfasst die strategische Planung einen *langen Planungszeitraum*, in dessen Verlauf auch Änderungen des Umfeldes in Betracht gezogen werden müssen. Somit ist die Planung auch stets mit einer hohen Unsicherheit bzgl. der Entwicklung der Rahmenbedingungen und etwaiger Wechselwirkungen oder Rückkopplungen¹⁰⁸ über den Zeitverlauf verbunden. Das Planungsproblem kann daher als *dynamisch-komplex* erachtet werden.

Die zuvor genannten Punkte gelten ebenso für die Analyse des wettbewerbsbezogenen- und des unternehmensinternen Umfeldes. Verschärfend kommt bei deren Betrachtung jedoch die Gegebenheit hinzu, dass es sich bei dem Markt für LiB um einen jungen Markt handelt. Dies wiederum bedingt sogleich auch, dass das Planungsproblem und die Entscheidung zur adäquaten Ausgestaltung des Produktionssystems von *großem Neuheitsgrad* sind. Die Entscheider sowie die bereits im Markt aktiven Akteure besitzen entsprechend auch *keine oder nur geringe Erfahrungswerte*, auf die sie zurückgreifen können. Zwar existieren auch Märkte, die auf den ersten Blick eine hohe Ähnlichkeit erwarten lassen, wie etwa der für die Konsumgüterbatteriezellen, jedoch unterscheiden diese sich letztendlich signifikant in relevanten Bereichen.¹⁰⁹ Die zukünftige Leistungsfähigkeit des eigenen Unternehmens kann somit nur schwer prognostiziert werden. Gleiches gilt auch für die Leistungsfähigkeit der Wettbewerber. Die Informationsbasis und -verfügbarkeit über den Markt und dessen Akteure ist relativ schlecht. Die Unternehmen

¹⁰⁷ vgl. Abbildung 2

¹⁰⁸ Verdeutlicht werden solche Rückkopplungseffekte im Fall der strategischen Produktionsplanung z. B. anhand des Regelkreis des Produktionsmanagements (vgl. Zäpfel 2000a)

¹⁰⁹ Die Anforderungen im Konsumgüterbereich an Qualität und Lebensdauer der Produkte sind weitaus geringer. Entsprechend sind auch die Anforderungen an die Qualität der Produktionsprozesse oder Materialien weitaus geringer und somit auch die Herstellkosten (vgl. Cluzel und Douglas 2012).

sind aufgrund der großen strategischen Bedeutung bestrebt, möglichst wenige Informationen über ihr produkt- und produktionsspezifisches Know-how oder ihre zukünftigen Pläne nach außen zu tragen. Erschwerend kommt hinzu, dass zwar eventuell Informationen zur gegenwärtigen Marktsituation in einem gewissen Maße vorliegen, diese jedoch nur eine Momentaufnahme darstellen und sich radikal in Abhängigkeit der Umweltentwicklung verändern können. Die bereits aktiven Akteure testen derzeit eine Vielzahl an unterschiedlichen Strategien,¹¹⁰ ohne dass sich bisher eine dominante Strategie oder Teilstrategie herauskristallisieren konnte. Diese Dynamik innerhalb der Strategiewahl resultiert letztlich darin, dass eine Einteilung der Akteure in strategische Gruppen oder gar eine Konkurrenzanalyse nur eine Momentaufnahme darstellen kann ohne wirklich repräsentativen oder für eine strategische Planung belastbaren Charakter.

Entsprechend der geschilderten informatorischen Defizite, der hohen Dynamik und Komplexität, ist eine mittel- bis langfristige Prognose über die zukünftige Entwicklung der Analysebereiche mit großen Unsicherheiten behaftet. Sogar bei einem relativ kurzen Prognosezeitraum kommt es zu Fehleinschätzungen. Darauf basierende Effekte zeichnen sich z. B. in den bereits bestehenden Überkapazitäten ab, die in Kapitel 2.2.4 erläutert wurden. Entsprechend unspezifisch sind auch die längerfristig ausgelegten Prognosen zur Preisentwicklung von LiB.¹¹¹ Für ein Unternehmen, das im Markt für LiB aktiv werden möchte, stellt diese Unsicherheit ein schwerwiegendes Planungsproblem dar. Aktive Akteure lassen sich entsprechend ihrer Strategien nicht näher charakterisieren. Ebenso wenig lassen sich fundierte Annahmen bezüglich deren zukünftiger strategischen Orientierung und Handlungsweisen treffen. Für das Unternehmen ist es auf dieser Basis sehr schwer einzuschätzen, ob sie Markteintrittsbarrieren überwinden und ein wettbewerbsfähiges Produkt produzieren können. Die Potentiale des eigenen bis dato nicht-existenten Unternehmens- bzw. Geschäftsbereichs zur Produktion eines solchen Produkts können ebenfalls nur schwer quantifiziert werden. Zur internen Unternehmensanalyse werden oftmals Erfahrungskurven zur Auslotung des erreichbaren Kostenreduktionspotentials herangezogen. Dieses Potential darf dabei aber nicht per se als gegeben angenommen werden, sondern muss erst durch entsprechende Maßnahmen aktiviert werden (vgl. Bea und Haas 2013; Welge und Al-Laham 2011). Das Kostenreduktionspotential ist daher insbesondere von der Ausgestaltung des Produktionssystems abhängig und somit von der Wahl geeigneter Produktionsstrategien. Erfahrungskurven stellen daher einen Mehrwert bei der Bestimmung der Wettbewerbsfähigkeit der eigenen Produktion dar. Eine monokausale Betrachtung, ausgerichtet rein auf die Produktionsmenge, muss jedoch vermieden werden, und zudem muss dem produkt- und fertigungsspezifischen Charakter von Erfahrungskurven Rechnung getragen werden (vgl. Argote und Epple 1990; Zangwill und Kantor 2000).

¹¹⁰ vgl. Kapitel 2.2

¹¹¹ vgl. Kapitel 2.2.2

Eine SWOT-Matrix, die ein Ergebnis der strategischen Analyse und Ausgangspunkt für die Strategieformulierung darstellt, lässt sich auf Basis der geschilderten Spezifika des jungen Marktes für LiB nicht erstellen.

4.2.2 Implikationen für die Strategieformulierung

In Kapitel 4.1.3 wurde bereits die Vielzahl möglicher Strategien im Rahmen der strategischen Planung beschrieben. Diese betreffen z. B. unterschiedliche Unternehmensbereiche, Entwicklungsrichtungen oder -zeitpunkte. Strategien sollen das Potential haben, das Unternehmen bei der Erreichung der strategischen Ziele zu unterstützen.¹¹²

Die Auswahl und Gestaltung von Strategien basiert im Normalfall auf den Ergebnissen der vorherigen strategischen Analyse. Im Rahmen der Strategieformulierung werden zumeist in Form von Portfolioansätzen adäquate Normstrategien abgeleitet und weiter spezifiziert. Für junge Märkte ist die sich aus der strategischen Analyse ergebende Einschränkung des Lösungsraums aufgrund der multiplen Unsicherheiten weniger stark eingeschränkt. Hierdurch kommt eine Vielzahl an Strategien in unterschiedlichen Kombinationen in Frage, wodurch eine hohe *kombinatorische Komplexität* möglicher Handlungsalternativen entsteht. Komplexitätsreduzierend wirkt sich hierbei jedoch aus, dass für Unternehmen, die den Eintritt in einen jungen Markt planen per se nur Innovationsstrategien als Entwicklungsstrategien in Frage kommen. Die Anzahl an alternativen Produktionsstrategien reduziert sich somit von 200¹¹³ möglichen Kombinationen auf eine beherrschbare Anzahl von weniger als 20. Zudem kommen als Timing-Strategien nur die des Pioniers und des Frühen Followers in Frage. Andere Timing-Strategien werden erst zu einem Zeitpunkt relevant in dem sich der Markt nicht mehr in der jungen Phase befindet (vgl. Kapitel 4.1.2).

In Kapitel 4.1 wurde auf die Anforderung einer systemischen Betrachtung der Produktion eingegangen. Dies gilt in gleichem Maße auch für die Produktionsstrategien, die deren Gestaltung und Betrieb zugrunde liegen. Kapitel 4.1.3 betonte die Notwendigkeit zur Berücksichtigung von Interdependenzen zwischen einzelnen Teilstrategien einer Produktionsstrategie sowie zu den übergeordneten Unternehmens- und Wettbewerbsstrategien. Diese übergeordneten Strategien können auf jungen Märkten aufgrund der defizitären strategischen Analyse unter Umständen nicht genau vorgegeben werden, da für ein Unternehmen aufgrund der mangelnden Spezifikation der Markt- und Wettbewerbsentwicklung nicht klar vorhersehbar ist, welche Wettbewerbsstrategie erfolgsversprechend ist. Zudem können gewisse Unternehmensleitbilder in den frühen Phasen

¹¹² *Im Fall der Produktionsstrategie durch eine entsprechende Ausgestaltung des Produktionssystems.*

¹¹³ *Vergleiche hierzu Abbildung 27. Bei der Berechnung sind noch keine weiteren Optionen, wie z. B. konkrete Standorte oder die Art der Kapazitätserweiterung berücksichtigt, sodass die tatsächliche Komplexität nochmals deutlich größer ist.*

eines Markteintritts einen besonders hohen Stellenwert einnehmen.¹¹⁴ Auf horizontaler Ebene üben Wirkbeziehungen zwischen einzelnen Teilstrategien einen starken Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems aus. Während gewisse Wechselwirkungen bereits zu Beginn der Planung noch gut zu erfassen sind,¹¹⁵ kommt es durch den langen Planungszeitraum, etwaige zeitliche Wirkverzögerungen und Rückkopplungen zu Einflüssen, die nicht mehr kognitiv erfasst werden können.

Die Teilstrategien sollten daher bei der strategischen Planung der Produktion auf jungen Märkten keinesfalls isoliert voneinander oder unabhängig von der vorherrschenden Geschäftsfeld- bzw. Unternehmensstrategie behandelt werden. Die gegenseitigen Wirkbeziehungen sind hierfür zu stark ausgeprägt um sie zu ignorieren und können die Entscheidungsqualität stark beeinflussen. Eine systemische Betrachtung des Produktionssystems unter Einbezug aller Teilstrategien ist daher unabdingbar. Zur Verdeutlichung genannter Interdependenzen sind in Abbildung 29 nochmals exemplarisch einige Wirkbeziehungen zwischen den einzelnen Teilstrategien aufgezeigt. Diese können dabei sowohl quantitativer als auch qualitativer Art sein und unterschiedliche Unternehmensebenen betreffen.

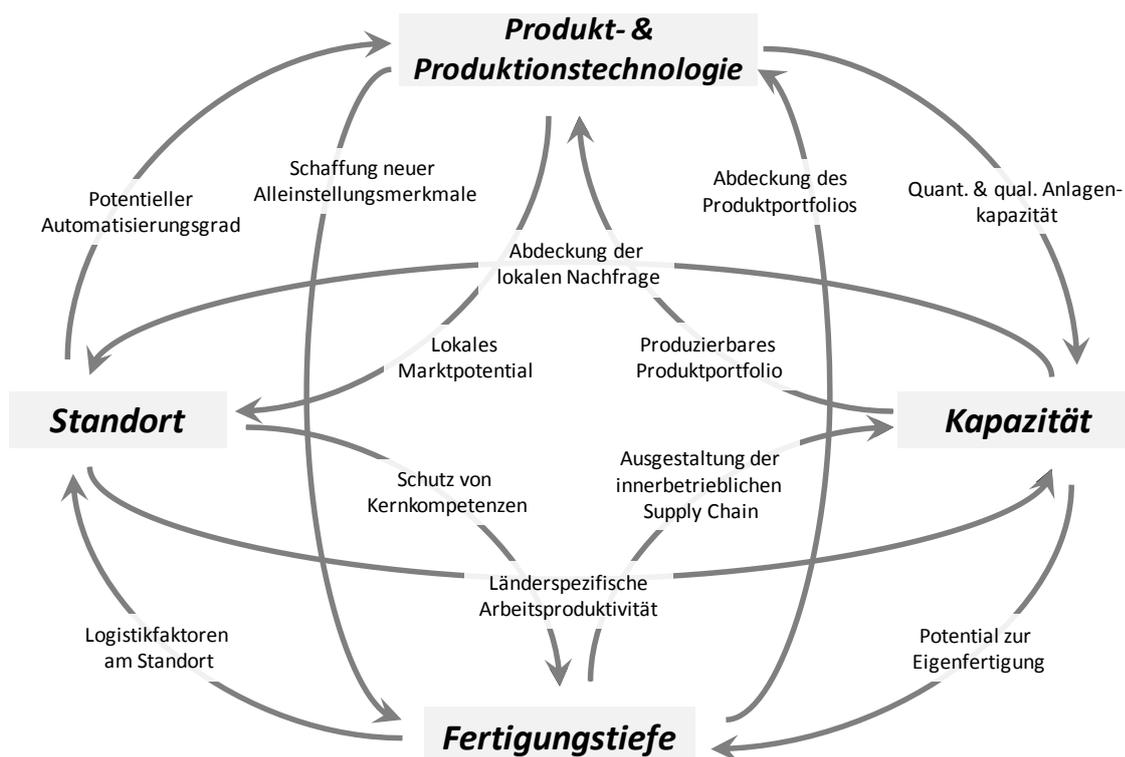


Abbildung 29: Interdependenzen zwischen den Teilstrategien

¹¹⁴ Beispielhaft sei hier die im Rahmen der Standortstrategie zu fällende Entscheidung genannt, wo gefertigt werden soll und ob die dort vorherrschenden sozialen Produktionsbedingungen mit dem Unternehmensleitbild auch konform gehen.

¹¹⁵ So wirkt sich die Wahl der Produktionstechnik z. B. auf die Produktionskapazitäten aus.

4.2.3 Implikationen für die Strategiebewertung und -auswahl

In dieser Phase soll der Planer basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Phasen die Entscheidung für eine geeignete Produktionsstrategie fällen. Diese wird im Anschluss an alle weiteren betroffenen Akteure kommuniziert und im Unternehmen umgesetzt. Der Planer besitzt jedoch aufgrund der zuvor beschriebenen Implikationen ein kognitives Defizit bezüglich der kausalen Wirkzusammenhänge aber auch bezüglich relevanter Planungs- und Entscheidungsinformationen. Auf Basis dieses fehlenden Systemverständnisses soll er strategische Entscheidungen treffen, die *langfristig Wirken und teils irreversibel* sind.¹¹⁶ Die Auswirkungen und Effekte einer ausgewählten Strategie können somit von dem Entscheider nicht vollständig erfasst werden. Es handelt sich entsprechend um eine *Entscheidung unter Unsicherheit* (vgl. Laux et al. 2012). Verschärfend kommt hinzu, dass strategische Entscheidungen im Kontext von jungen Märkten nicht rein monetär geprägt sind, sondern auch in hohem Maße von qualitativen und schwer quantifizierbaren Kriterien abhängig sind. Neben den in Tabelle 8 aufgeführten strategischen Zielen für die Produktion spielen auch solche eine Rolle, die sich aus der normativ gegebenen Unternehmenspolitik und dem Leitbild ableiten. Der Entscheider sieht sich somit mit einem *multikriteriellen Zielsystem* konfrontiert, über dessen spezifische Präferenzen er sich oftmals nicht im Klaren ist. Zudem kann sich im Laufe der Zeit die Gewichtung der Kriterien ändern oder die Ausprägung einer Strategiealternative. Im realen Unternehmensalltag hat sich gezeigt, dass der Mensch nicht immer rational entscheidet. Das „reale“ Entscheidungsverhalten ist somit ebenso relevant und abzubilden. Neben dem Entscheider selbst, sind in der Regel noch *viele weitere Interessensgruppen* in der Entscheidung involviert (z. B. das Marketing, der Einkauf, usw.), die von der getroffenen Entscheidung überzeugt werden müssen. Hierzu ist es wichtig begründen zu können weshalb so entschieden wurde. Eine objektive und transparente Argumentation ist jedoch in diesem Fall nicht möglich, da das Produktionssystem und dessen Verhalten aufgrund des hypothetischen Charakters und fehlender Plastizität für den Entscheider den Charakter einer „Black-Box“ besitzen.

Die Langfristigkeit der strategischen Planung wirft für den Entscheider auch die Frage nach dem *Bewertungszeitpunkt einer Strategie* auf. Es ist nicht anzunehmen, dass die Bewertung der Strategien über den gesamten Planungszeitraum hinweg eine einheitliche Rangfolge aufweist. So kann eine Strategie zu Beginn zwar überlegen sein, aber sich langfristig sehr negativ auswirken. Eine solche Dynamik kann mitunter auch innerhalb

¹¹⁶ Dies trifft insbesondere auf die Standort- und Fertigungstiefenstrategie zu, die eine hohe Bindewirkung besitzen. Die Kapazitätsstrategie wirkt eher mittelfristig und kann mitunter durch ihre große Nähe zur taktischen Planung leichter an neue Entwicklungen oder Fehleinschätzungen angepasst werden (vgl. Corsten 2007; Dyckhoff 1998).

eines einzigen Produktlebenszyklus auftreten.¹¹⁷ Zudem besteht die Gefahr, dass bei der Bewertung zu diskreten Zeitpunkten z. B. für das Jahr 2020 eine Strategie gewählt wird, die lediglich zu diesem spezifischen Zeitpunkt vorteilhaft ist. Dieser explizite Einbezug der Zeitkomponente erhöht zusätzlich die kombinatorische Komplexität.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass die strategische Produktionsplanung von LiB ein neuartiges und zudem *schlecht strukturiertes* Planungs- bzw. Entscheidungsproblem darstellt. Die schlechte Strukturiertheit beruht auf der unsicheren Informations- und Datenlage, der großen Anzahl möglicher Strategien sowie der vorherrschenden Dynamik und Komplexität, die eine Wirkprognose und Bewertung erschweren (vgl. Klein und Scholl 2011; Bunz 1988). Der Einsatz bewährter Instrumente und Methoden der strategischen Planung ist unter diesen Bedingungen nicht mehr zielführend. Die Neuheit des Planungsproblems führt zudem dazu, dass die Entscheider auf keine bereits verfügbaren Planungsansätze oder Lösungswege zurückgreifen können.

Eine objektive Bewertung und rationale Entscheidung für eine geeignete Strategie ist auf dieser Basis für den Planer nicht möglich. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, diesen bei seinem Entscheidungsproblem mit einem den Gegebenheiten junger Märkte entsprechenden adäquaten Planungsmethodik und einem darin integrierten Instrument¹¹⁸ zur Entscheidungsfindung bei der Lösung des komplexen Entscheidungsproblems zu unterstützen.

¹¹⁷ Eine Strategie kann zwar auch im Laufe der Zeit angepasst werden, jedoch besteht eine gewisse Bindewirkung. Die Entscheidung ob das Produktportfolio auch Batterien für HEV umfassen soll, kann zwar zu jedem beliebigen Zeitpunkt gefällt werden, macht jedoch nur zu Beginn Sinn, da diese im Zeitverlauf zukünftig an Bedeutung verlieren. Eine Standortstrategie hat solange Bestand bis ein neuer Standort gebaut werden soll. Da eine Produktionskostenreduktion jedoch vorrangig über Skaleneffekte zu erzielen ist, ist man wie im Fall von Tesla's „Gigafactory“ um möglichst große Produktionsstätten bemüht.

¹¹⁸ Das in der Planungsmethodik integrierte Simulationsmodell soll der Verbesserung der Entscheidungsqualität dienen. Solche Instrumente können auch als Strategische Entscheidungsunterstützungssysteme bezeichnet werden (vgl. Morecroft, J. D. W. 1984; Stumpfe 2003).

5 Konzeption und Entwicklung einer Planungsmethodik

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Rahmenbedingungen und Grundlagen der strategischen Produktionsplanung im jungen Markt für LiB erläutert. Der zweite Teil dieser Arbeit befasst sich nun vorrangig mit der methodischen Ausgestaltung einer problemadäquaten Planungsmethodik und der Entwicklung eines strategischen Entscheidungsunterstützungssystems zur Planung der Produktion (*SEPP*). Zu diesem Zweck werden in Kapitel 5.1 auf Basis der in Kapitel 4.2 identifizierten Implikationen für die strategische Planung die wesentlichen Anforderungen definiert, die bei der Konzeption einer Planungsmethodik und der Entwicklung eines *SEPP* berücksichtigt werden müssen. Kapitel 5.2 spezifiziert auf Basis der Anforderungen die Merkmale und Eigenschaften, die das *SEPP* aufweisen muss. Zudem werden Struktur und grundlegende Komponenten von Entscheidungsmodellen erläutert, die als Grundlage für die methodische Ausgestaltung der Planungsmethodik in Kapitel 5.3 dienen. Kapitel 5.4 fasst die Struktur und die methodischen Bausteine der Planungsmethodik sowie des darin integrierten Entscheidungsmodells abschließend zusammen.

5.1 Anforderungen an eine problemadäquate Planungsmethodik

In Kapitel 4.2 wurden die Implikationen und daraus resultierende Defizite bei der strategischen Produktionsplanung für den Markt der LiB beschrieben. Daraus hat sich die Notwendigkeit einer geeigneten Planungsmethodik mit Entscheidungsunterstützung ergeben. Damit ein solcher Ansatz auch zielführend ist, muss er den spezifischen Eigenschaften des Planungsproblems gerecht werden, indem er die daraus resultierenden Anforderungen erfüllt. Die Eigenschaften der strategischen Produktionsplanung für den LiB-Markt und die daraus resultierenden Anforderungen sind in Abbildung 30 dargestellt¹¹⁹ und werden im Folgenden näher erläutert. Die definierten Anforderungen fungieren im späteren Kapitel 5.3 als Auswahlkriterien für die Ausgestaltung der Planungsmethodik.

¹¹⁹ Ergänzend soll erwähnt werden, dass eine Anforderung aus einer Charakteristik oder aus dem Zusammenspiel von mehreren resultieren kann.

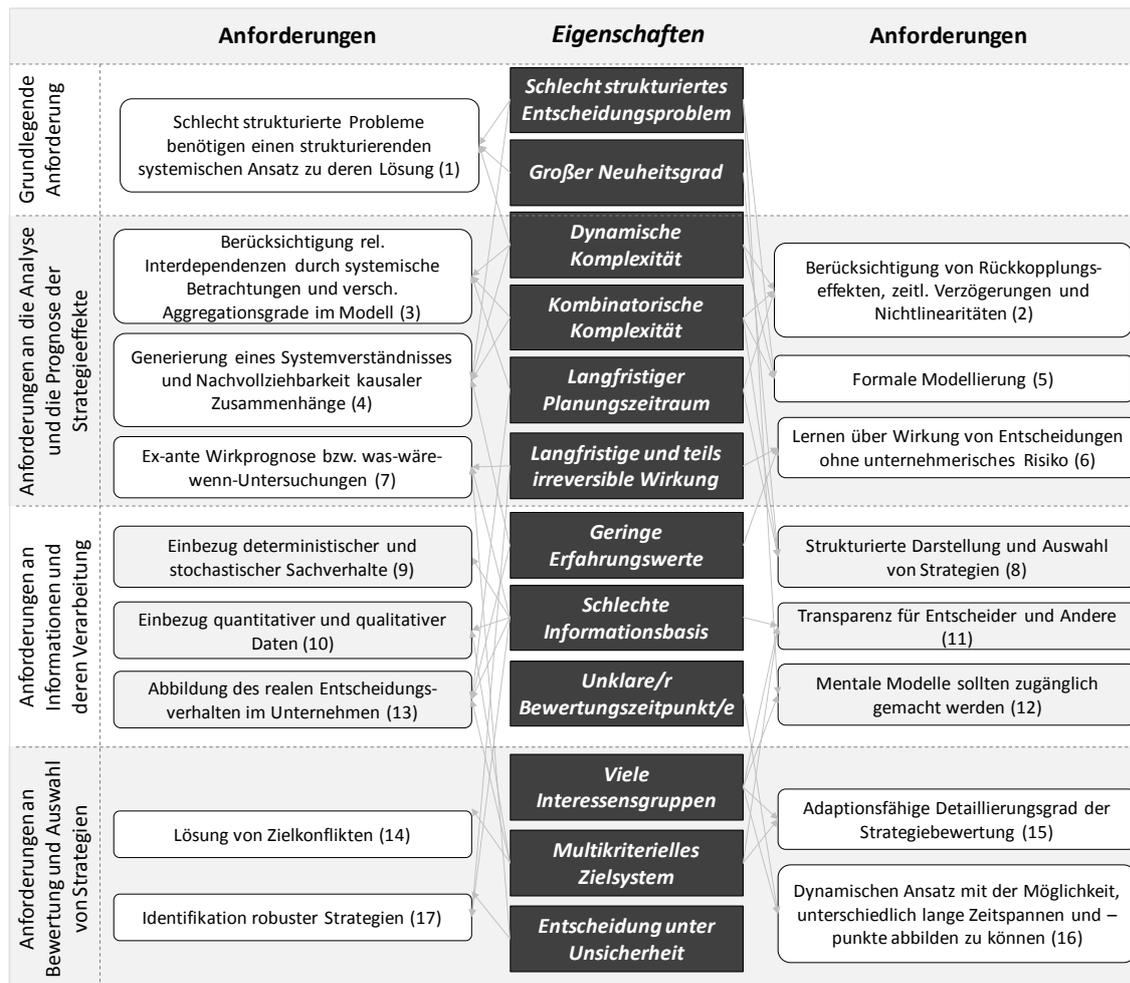


Abbildung 30: Eigenschaften des Planungsproblems und daraus resultierende Anforderungen an eine Planungsmethodik

(1)¹²⁰ Die schlechte Strukturierbarkeit des Planungsproblems sowie die vorherrschende Komplexität, Dynamik und Unsicherheit führen zu einem kognitiven Defizit auf Seiten des Planers. Dessen Überwindung erfordert die Entwicklung einer strukturierenden systemischen Planungsmethodik. In der Literatur wird zur Lösung solcher komplexen und schlecht strukturierten Planungsproblemen der Einsatz von Modellen¹²¹ zur Entscheidungsunterstützung empfohlen (vgl. Bunz 1988; Hahn und Taylor 2006). (2) Um zudem auch dem langen Planungszeitraum gerecht zu werden, sollten die verwendeten Modelle in der Lage sein, Rückkopplungen, nichtlineare Wirkungszusammenhänge und auch zeitliche Wirkverzögerungen abzubilden (vgl. Sterman 2000).

¹²⁰ Die nachfolgenden Nummerierungen beziehen sich auf die in Abbildung 30 aufgeführten Anforderungen.

¹²¹ Modelle sind vereinfachende Abbildungen realer Systeme oder Probleme (vgl. Hanssmann 1993; Schneeweiß 1991)

(3) Die Notwendigkeit der Berücksichtigung relevanter Interdependenzen für die Entscheidungsqualität wurde bereits mehrfach betont und muss daher auch im Rahmen eines Modells zur Darstellung kausaler Wirkzusammenhänge sowie zur Sicherung einer hohen Entscheidungsqualität Berücksichtigung finden (vgl. Welge und Al-Laham 2011). (4) Damit eine Produktionsstrategie langfristig erfolgsversprechend ist, muss ihre Vernetzung zu anderen Teil-, Funktional- und Unternehmensstrategien und Unternehmensleitlinien untersucht werden. (5) Die Umsetzung all dieser Anforderungen bedingt letztlich den Einsatz eines formalen dynamischen Modells.¹²² Dabei ist ein adäquates Aggregationsniveau für das Modell zu definieren, durch das die Rechendauer, der Speicherbedarf und insgesamt die Modellkomplexität auf einem vertretbaren Niveau gehalten werden (vgl. Henrich 2002).

(6) Der Nutzer der Planungsmethodik und des Modells zur Entscheidungsunterstützung verfügt aufgrund der Neuartigkeit des Planungsproblems nur über geringe Erfahrungswerte. Es ist daher von großer Bedeutung für die Entscheidungsqualität, dass der Nutzer dennoch ein Systemverständnis und ein Gefühl für die kausalen Zusammenhänge entwickeln kann (vgl. Dyckhoff und Spengler 2010). (7) Eine wesentliche Grundlage hierfür ist, dass er ex ante Wirkprognosen bzw. „was-wäre-wenn“-Analysen durchführen kann, um die Auswirkungen seiner Entscheidungen bzw. verfolgten Strategien zu erfahren. Durch die Prognose soll dem Nutzer ein Lernen ohne das in der Realität bestehende unternehmerische Risiko ermöglicht werden, das sich aus der Langfristigkeit und Irreversibilität getroffener Entscheidungen ergibt. (8) Die Auswahl und Kombination von zu analysierenden Teilstrategien zu Produktionsstrategien sollte für den Planer in einer übersichtlichen und leicht zugänglichen Weise geschehen, um der kombinatorischen Komplexität zu begegnen.

(9) Die Datenverfügbarkeit ist nicht nur schlecht sondern auch teils mit großen Unsicherheiten behaftet. Das Modell sollte es daher ermöglichen, sowohl die zugänglichen deterministischen Daten als auch stochastische Informationen auf Basis von Expertenwissen zu integrieren. Letzter Punkt spielt auch bei der Einschätzung zukünftiger Zustände und Entwicklungen eine wichtige Rolle (vgl. Hering et al. 1989). (10) Ebenso müssen neben den quantitativen Größen auch qualitative mitberücksichtigt und operationalisiert werden. Dieser Aspekt ist jedoch nur zum Teil der Datenverfügbarkeit geschuldet. Bereits bei der Beschreibung der Teilstrategien wurde deutlich, dass auch qualitative Größen einer expliziten Berücksichtigung bedürfen.¹²³

¹²² *Ein formales Modell ist eine eindeutige Beschreibung der wesentlichen Merkmale eines Systems. In der Regel handelt es sich dabei um ein auf einem Rechner bearbeitbares Simulationsmodell (Kemnitz 2011).*

¹²³ *An dieser Stelle sei beispielhaft nochmals auf die Rolle qualitativer Aspekte bei der Standortplanung hingewiesen.*

(11) Die letztendlich aus der Wahl einer Strategie resultierende Leistung des Produktionssystems sollte aufgrund des langen Planungszeitraums und der hohen Dynamik über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg transparent dargestellt werden. Die Forderung nach Transparenz richtet sich sowohl an die Bewertung und Auswahl einer finalen Strategie als Ergebnis des Planungsprozesses, als auch an deren Zustandekommen. Dieser Aspekt spielt außerdem für die Kommunikation und Akzeptanz einer gewählten Strategie gegenüber beteiligten Akteuren aus anderen Bereichen eine Rolle (vgl. Zahn et al. 1990; Henrich 2002). (12) Das dem Planer exklusiv bekannte mentale Modell muss für diese zugänglich gemacht werden. Das Zustandekommen des Ergebnisses sollte bis ins Detail und über den gesamten Zeitraum hinweg nachvollziehbar sein. (13) Die Annahme, dass in einem Unternehmen Entscheidungen stets rational getroffen werden können, spiegelt aufgrund des bereits geschilderten kognitiven Defizits des Planers das reale Entscheidungsverhalten im Unternehmen nicht adäquat wider¹²⁴. Eine Planungsmethodik sollte daher in der Lage sein, diesem realen Entscheidungsverhalten Rechnung zu tragen.

(14) Da es sich um ein multikriterielles Zielsystem mit teilweise konfliktionären Zielen handelt, ergeben sich daraus weitestgehend zwei Forderungen: Zum einen soll die jeweilige Kriterienausprägung einer Strategie und deren Beitrag zur Gesamtbewertung detailliert darstellbar und nachvollziehbar sein. (15) Zum anderen muss die aus einer solchen Darstellung resultierende Komplexität wieder auf ein kommunizierbares und handhabbares Niveau aggregiert werden können. Die Ergebnisdarstellung soll also auf unterschiedlichen Detaillierungsgraden erfolgen können.

(16) Für den Planer stellt sich auch die Frage, wie und zu welchen Zeitpunkten er die Strategien bewertet. Strategien wirken langfristig und der Zeitpunkt der Wirkung einer Strategie ist aufgrund zeitlicher Verzögerungen nur schwer auszumachen. Eine Bewertung zu fixen diskreten Zeitpunkten (z. B. das Jahr 2020) scheint unter den turbulenten Rahmenbedingungen des Marktes für LiB und der damit verbundenen potentiell volatilen Änderung der Strategievorteilhaftigkeit nicht zielführend zu sein. Vielmehr muss der „strategische Weg“ explizit abgebildet werden und eine dynamische und kontinuierliche Analyse und Bewertung der Strategien über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg stattfinden (vgl. Welge und Al-Laham 2011). Hierfür muss eine geeignete Lösung gefunden werden, die auch den Übergang vom jungen Markt hin zur Phase der Reife und der Sättigung bzw. des Alters umfasst. Dabei ist an dieser Stelle explizit anzumerken, dass es sich dabei um den Produktlebenszyklus für LiB handelt und nicht um den Branchenlebenszyklus. (17) Abschließend sei noch angemerkt, dass sich die Entscheidung für eine Produktionsstrategie nicht nach der „optimalen Lösung“ richten sollte. Die Unsicherheiten an sich und im systemischen Wirken, bei den dem Modell zugrundeliegenden Daten, den zukünftigen Zuständen und der realen Wirkung ergriffener Hand-

¹²⁴ *Aus Sicht des Planers bzw. Entscheiders handelt dieser in Anbetracht seines subjektiven Informationsstandes jedoch durchaus rational.*

lungen bedürfen viel mehr einer Strategie, die auch unter schlechtesten Umweltentwicklungen zu einem für den Entscheider noch akzeptablen Ergebnis führt (vgl. Scholl 2013). Eben solche robuste Produktionsstrategien sollen mit Hilfe der Planungsmethodik und des *SEPP* identifiziert werden.

5.2 Modellgestützte Planung

In Kapitel 5.2.1 werden die Merkmale des zu entwickelnden Modells näher spezifiziert bevor die allgemeine Struktur und wesentlichen Komponenten von Entscheidungsmodellen in Kapitel 5.2.2 erläutert werden.

5.2.1 Spezifizierung eines problemadäquaten Entscheidungsmodells und Einordnung in den strategischen Planungsprozess

Die vorangegangenen Kapitel haben verdeutlicht, dass das komplexe Entscheidungsproblem für eine Produktionsstrategie von dem Entscheider nicht ohne weiteres gelöst werden kann. Die Komplexität der strategischen Planungsaufgabe schließt es aus, sämtliche Sachverhalte und Wirkungszusammenhänge im betrachteten System¹²⁵ zu berücksichtigen. In der Praxis werden daher Modelle als vereinfachtes Abbild des realen Systems und zur Beschreibung der Entscheidungssituation verwendet. Ein Modell kann dabei anhand verschiedener Abgrenzungskriterien definiert werden, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird. Erfolgt etwa die Abbildung als Spiegelung des realen Systems, wird das Modell als isomorph bezeichnet. Wesentlich häufiger erfolgt jedoch, wie auch im Fall der strategischen Planung, eine Abstraktion bei der wenig oder nicht planungsrelevante Elemente und Verbindungen vernachlässigt werden. Solche Modelle werden dann als homomorph bezeichnet. Der dabei gewählte Abstraktionsgrad bestimmt sowohl die Lösungsgenauigkeit als auch die Komplexität und Handhabbarkeit des Modells. Die Herausforderung besteht somit darin, das reale System mit einem problemadäquaten Detaillierungs- und Informationsgrad abzubilden, gleichzeitig jedoch die Modellkomplexität auf einem handhabbaren Niveau zu halten und dennoch keine planungsrelevanten Elemente und Beziehungen zu vernachlässigen (vgl. Bamberg und Coenenberg 2006).

Die Kenntnis des Einsatzzwecks des Modells ist somit unabdingbare Voraussetzung für die Abstraktion (vgl. Stachowiak 1973). Abhängig davon sowie von der verfügbaren Datenbasis, dem Messniveau und der zeitlichen Komponenten, lassen sich Modelle in unterschiedliche Typen unterteilen. Entsprechend dem Einsatzzweck wird zwischen Beschreibungsmodellen, Erklärungsmodellen, Prognosemodellen und Entscheidungsmodellen unterschieden. Beschreibungsmodelle sind auf die Darstellung von Elementen und deren Beziehungen im realen System ausgelegt. Es handelt sich somit um rein

¹²⁵ Wie bereits in Kapitel 4.1 erläutert wurde, besteht ein System aus einer Vielzahl an Elementen die untereinander verbunden sind.

deskriptive Beobachtungen ohne Untersuchung der grundlegenden Wirkbeziehungen. Die Wirkbeziehungen sind Gegenstand der auf den Beschreibungsmodellen aufbauenden Erklärungsmodellen, die die Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen den Modellvariablen untersuchen. Die Prognosemodelle hingegen beschreiben fortführend auf diesen Wirkbeziehungen zukünftige Umweltentwicklungen als Umweltprognosen sowie die Konsequenzen möglicher Handlungsalternativen als Wirkprognosen. Entscheidungsmodellen liegt zusätzlich ein Zielsystem zugrunde, anhand dessen Handlungsalternativen bewertet und ausgewählt werden können. Ein Entscheidungsmodell ist somit die formale Darstellung eines Entscheidungsproblems. Sie lassen sich im Wesentlichen in zwei Arten unterteilen. Optimierungsmodelle, deren Ziel es vorrangig ist, eine oder mehrere optimale Lösungen für das Problem zu identifizieren und Simulationsmodelle, bei denen der Fokus auf der Bewertung ausgewählter Alternativen bezüglich ihrer Zielerreichung liegt (vgl. Schneeweiß 1991; Klein und Scholl 2011; Homburg 2012).

Abgesehen von ihrem Einsatzzweck lassen sich Modelle entsprechend ihres Messniveaus in qualitative und quantitative Modelle unterteilen. Ausschlaggebend für das Messniveau ist dabei die Skalenform¹²⁶ mit der Daten und Informationen im System erfasst werden. Im Fall von quantitativen Modellen werden die realen Systemelemente durch Dateiparameter und -variablen dargestellt und anschließend in Form von Gleichungen oder Ungleichungen miteinander verbunden. Die im Modell abgebildeten Aspekte des realen Entscheidungsproblems können dabei durch intervall-, ratio- oder absolut-skalierte Informationen beschrieben werden. Quantitative Modelle können mit Hilfe von analytischen Methoden gelöst werden. Basieren Modelle nicht auf quantitativen Daten sondern beinhalten nominal- oder ordinalskalierbare qualitative Informationen, handelt es sich um ein qualitatives Modell. Sie beruhen häufig auf subjektiven Einschätzungen und werden zur Darstellung grundlegender Zusammenhänge verwendet. Ist eine analytische Auswertung dieser Modelle beabsichtigt, müssen die qualitativen Informationen durch eine Übertragung auf eine geeignete Intervall-, Ratio- oder Absolutskala vorab quantifiziert werden. Diese Transformation kann sich mitunter äußerst schwierig gestalten. Dennoch bietet die mathematisch-quantitative Modellierung gegenüber der qualitativen eine deutlich höhere Problemdurchdringung und -strukturierung und die so generierten Lösungen stoßen auf größere Akzeptanz (vgl. Klein und Scholl 2011; Homburg 2012).

Die Unsicherheit der im Modell abgebildeten Informationen stellt ein weiteres Unterscheidungsmerkmal dar, das insbesondere für strategische Planungsprobleme relevant ist. Prinzipiell kann bezüglich des Informationsstandes zwischen Sicherheit, Risiko und Ungewissheit unterschieden werden. Während bei Sicherheit der wahre Zustand bekannt ist, liegen bei Risiko lediglich objektive oder subjektive Wahrscheinlichkeiten vor.

¹²⁶ Für eine genaue Erläuterung der Skalenformen sei an dieser Stelle auf Schneeweiß 1991 oder Klein und Scholl 2011 verwiesen.

Können keine Wahrscheinlichkeiten angegeben werden und sind nur bestimmte Zustände bekannt, handelt es sich um Ungewissheit. Risiko und Ungewissheit werden auch zusammengefasst als Unsicherheit bezeichnet (vgl. Hagedorn 1994). Deren explizite Abbildung erfolgt in stochastischen Modellen. Die Unsicherheiten werden dabei häufig durch Zufallsvariablen berücksichtigt. Auf Basis stochastischer Modelle lassen sich entsprechend Aussagen über die Wahrscheinlichkeit einer Lösung treffen. Sind dagegen alle Informationen sicher oder abstrahiert man die Informationssicherheit, erhält man ein deterministisches Modell. Diese sind durch eine fest definierte Menge an zulässigen Handlungsalternativen charakterisiert (vgl. Klein und Scholl 2011).

Letztlich stellt auch der Zeitbezug eines Modells ein wesentliches Merkmal dar. In dynamischen Modellen wird entsprechend die dynamische Entwicklung der Modelldaten über die Zeit explizit betrachtet, während diese für statische Modelle aufgrund des meist kurzen Planungshorizonts nicht relevant ist. Die dynamischen Modelle lassen sich weiterhin in diskrete und kontinuierliche Modelle unterscheiden. Bei diskreten Modellen wird der Systemzustand lediglich zu bestimmten Zeitpunkten betrachtet, während kontinuierliche Modelle den gesamten Zeitraum durchgängig auflösen. Die Betrachtung der Modellergebnisse zu diskreten Zeitpunkten ist bei dynamischen Entscheidungsmodellen eher die Regel, da ein Planungsprozess und somit eine Entscheidung zumeist zu diskreten Zeitpunkten stattfindet (vgl. Klein und Scholl 2011).

Auf Basis der in Kapitel 5.1 definierten Anforderungen lässt sich das für den Zweck der strategischen Planung der Produktion von LiB zu entwickelnde Modell wie in Abbildung 31 dargestellt spezifizieren.

Modellmerkmal	Modellart			
	Beschreibung	Erklärung	Prognose	Entscheidung
Einsatzzweck	monokriteriell		multikriteriell	
Zielfunktionen	qualitativ		quantitativ	
Messniveau	physisch	formal	graphisch	verbal
Darstellungsform	deterministisch		stochastisch	
Informationssicherheit	statisch		dynamisch	
Zeitbezug			diskret	kontinuierlich

Abbildung 31: Definition der Merkmale des zu entwickelnden Entscheidungsmodells

Zur Lösung des komplexen Entscheidungsproblems ist die Planungsmethodik somit um ein multikriterielles Entscheidungsmodell mit dynamisch-kontinuierlichen, deterministischen, formalen und graphischen sowie quantitativen und qualitativen Merkmalen zu komplettieren.

Der Planungsprozess wird somit durch einen analog strukturierten Modellbildungsprozess unterstützt (vgl. Abbildung 32). Dessen Resultat stellt zum einen ein Entschei-

dungsmodell zur Entscheidungsunterstützung dar und zum anderen eine mit dessen Bildungsprozess einhergehende Strukturierung des Planungsproblems zu dessen systematischer Lösung.

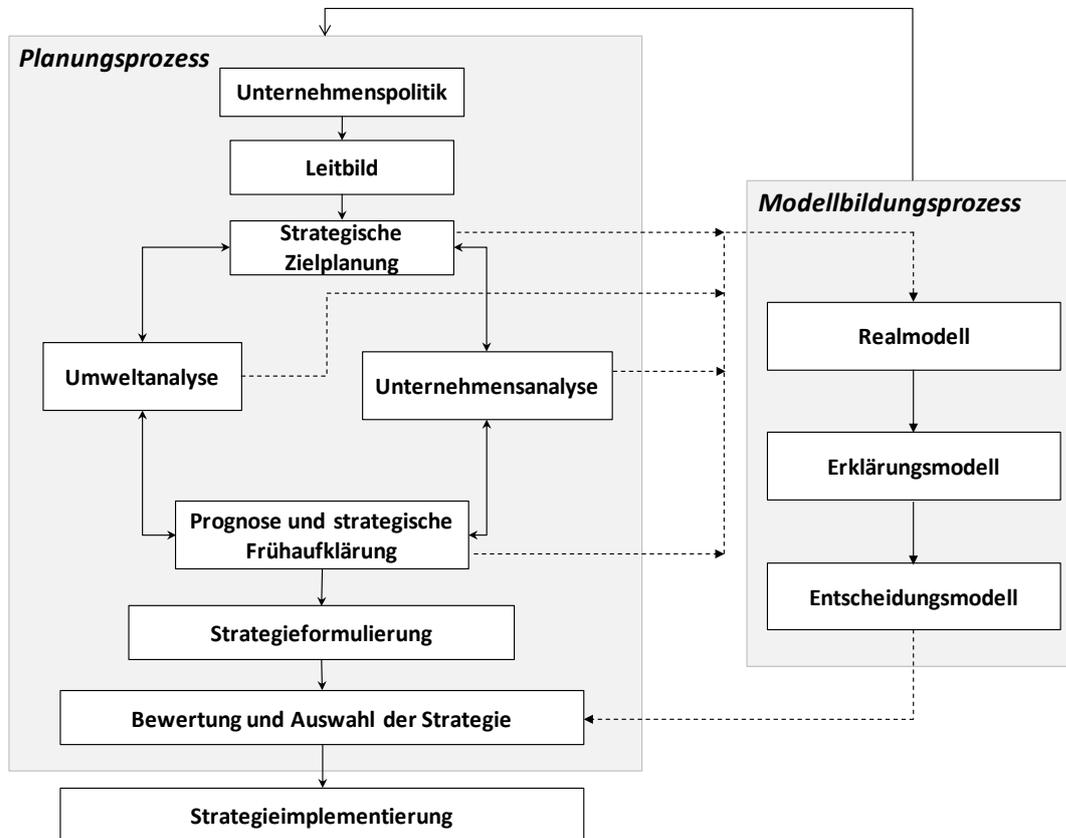


Abbildung 32: Schematische Darstellung der Modellintegration in den Planungsprozess¹²⁷

5.2.2 Grundlegende Struktur und Komponenten eines Entscheidungsmodells

Das Entscheidungsmodell lässt sich in der (präskriptiven) Entscheidungstheorie durch das Zielsystem des Entscheiders sowie dem Entscheidungsfeld bestehend aus Handlungsalternativen, Zuständen und den jeweiligen Ergebnissen beschreiben (vgl. Laux et al. 2012).¹²⁸ Die Handlungsalternativen werden innerhalb des Modells durch Entscheidungsvariablen ausgedrückt, mögliche Umweltzustände durch exogene Variablen und die Wirkzusammenhänge bzw. das Ergebnis durch endogene Variablen. Die Komponenten des Grundmodells der Entscheidung sind in Abbildung 33 dargestellt und werden im Folgenden kurz erläutert.

¹²⁷ Eine ähnlich Darstellung findet sich auch in Winter 2011

¹²⁸ Diese Komponenten zeigen eine hohe Ähnlichkeit zu denen des strategischen Planungsprozesses, weshalb das Phasenschema der Planung auch eine Sequentialisierung der Grundbestandteile des Entscheidungsmodells darstellt (vgl. Mag 1999).

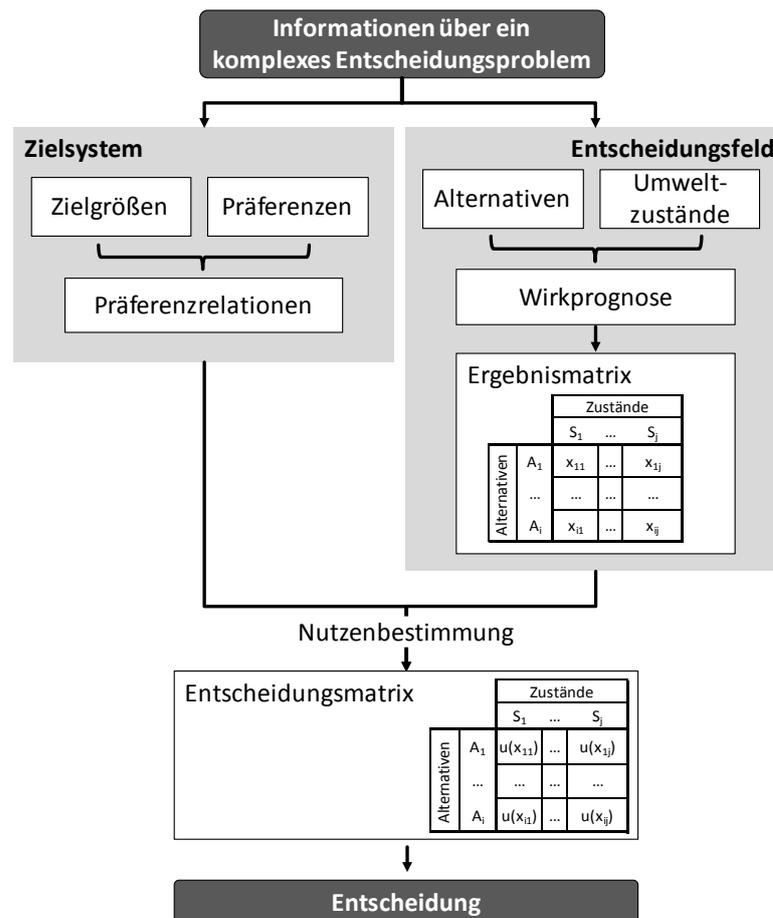


Abbildung 33: Komponenten eines Entscheidungsmodells¹²⁹

Das Zielsystem umfasst eine Auswahl der relevanten quantitativen und/oder qualitativen Zielgrößen, die der Bewertung der Handlungsalternativen zugrundeliegen. Weiterhin beinhaltet es die Präferenzrelationen des Entscheiders, die als Vorschriften aufgefasst werden können, welche Ausprägungen der Zielgrößen vom Entscheider bevorzugt werden. Präferenzrelationen lassen sich bezüglich ihrer Höhe, Art, Zeit und Sicherheit unterscheiden. Die Höhenpräferenz drückt dabei die relative Vorteilhaftigkeit aus, die Ergebnisse aufgrund ihrer Höhe besitzen. So sind z. B. Ergebnisse, die einen höheren Wert aufweisen, solchen mit einem niedrigeren Wert vorzuziehen (Maximierungsziel). Die Festlegung einer Artenpräferenz des Entscheiders ist notwendig sobald mehrere Zielsetzungen gleichzeitig verfolgt werden und diese einen Zielkonflikt aufweisen. Die Vorziehungswürdigkeit einer bestimmten Ergebnisart kann dabei beispielsweise durch Gewichtungen ausgedrückt werden. Die Angabe einer Zeitpräferenz wird notwendig, wenn Ergebnisse zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen. Sie kann dabei durch eine gewünschte zeitliche Struktur oder aber durch zeitliche Gewichtungsfaktoren erfasst werden. Eine Sicherheitspräferenz kann zum Ausdruck kommen, wenn in einer Ent-

¹²⁹ Eigene Darstellung basierend auf Laux et al. 2012, Neemann 2007 und Klein und Scholl 2011.

scheidungssituation nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein Ergebnis eintritt. Handelt es sich um eine Entscheidungssituation unter Risiko oder Unsicherheit, spricht man von einer Unsicherheits- bzw. Risikopräferenz (vgl. Sieben und Schildbach 1994).

Die im Entscheidungsfeld abgebildeten Handlungsalternativen $A_1 \dots A_i$ werden durch die Werte solcher Größen beschrieben, die der Entscheider selbst variieren kann. Dementsprechend werden sie als Entscheidungsvariablen (oder auch Aktionsparameter) betitelt. Die Alternativen können dabei auch aus Tupeln von Entscheidungsvariablen bestehen. Die eigentliche Entscheidung bildet letztlich die Auswahl einer dieser Alternativen. Die zukünftige Entwicklung der problemrelevanten Daten, die durch den Entscheider nicht beeinflusst werden können, werden durch die Umweltzustände (oder Szenarien) $S_1 \dots S_j$ beschrieben. Der Informationsstand¹³⁰ über diese Umweltzustände hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf die Aussagekraft des Entscheidungsmodells (vgl. Laux et al. 2012).

Sind letztendlich die Ziele, Alternativen und Umweltzustände gegeben, lässt sich auf deren Grundlage die Ergebnismatrix bilden. Basierend auf einer Wirkprognose der Alternativen $A_1 \dots A_i$ in Kombination mit den Umweltzuständen $S_1 \dots S_j$ lassen sich die entscheidungsrelevanten Ausprägungen der Ziele x_{ij} in Form einer Matrix darstellen. In der Regel ist jedoch die Ergebnismatrix für eine Entscheidungsfindung allein nicht ausreichend. Eine Ausnahme hierbei können rein monokriterielle Entscheidungsprobleme bilden. Für multikriterielle Probleme ist jedoch eine weiterführende Nutzenbetrachtung unerlässlich. Durch diese werden die Ergebnisse x_{ij} mit den Präferenzwerten des Entscheiders zusammengeführt, woraus eine Nutzenbewertung $u(x_{ij})$ im Sinne eines Zielerreichungswertes resultiert. Liegen Wahrscheinlichkeiten für Umweltzustände vor, können diese ebenfalls berücksichtigt werden (vgl. Klein und Scholl 2011; Laux et al. 2012).

5.3 Methodische Ausgestaltung der Planungsmethodik

In den vorangegangenen Unterkapiteln wurde in Kapitel 5.1 definiert, welche Anforderungen von einer Planungsmethodik zu erfüllen sind, damit diese für die strategische Planung der Produktion im jungen Markt für LiB geeignet ist. Als hilfreiches Mittel zur Lösung des komplexen Entscheidungsproblems wird die Entwicklung eines Entscheidungsmodells angesehen. Dessen Merkmale wurden in Kapitel 5.2.1 näher spezifiziert, und in Kapitel 5.2.2 wurden die einzelnen Komponenten eines Entscheidungsmodells und deren Zusammenwirken zur Entscheidungsfindung erläutert. Für die Entwicklung eines zielführenden und funktionsfähigen Entscheidungsmodells müssen bestehende Strukturdefekte durch einen Strukturierungsprozess überwunden werden. In dessen Rahmen wird die Informationslage für die Entscheidung durch die Reduzierung dieser

¹³⁰ Ob es sich dabei um Sicherheit, Risiko oder Ungewissheit handelt.

Struktur­mängel stetig verbessert. Wesentliches Mittel zur Beseitigung dieser Defekte stellt die Bildung der in Kapitel 5.2.1 erläuterten Modelle dar.¹³¹ Den Zusammenhang zwischen der Modellbildung, in Frage kommender Planungsmethoden sowie der daraus resultierenden Reduzierung von Strukturdefekten soll anhand von Abbildung 34 verdeutlicht werden (vgl. Klein und Scholl 2011).

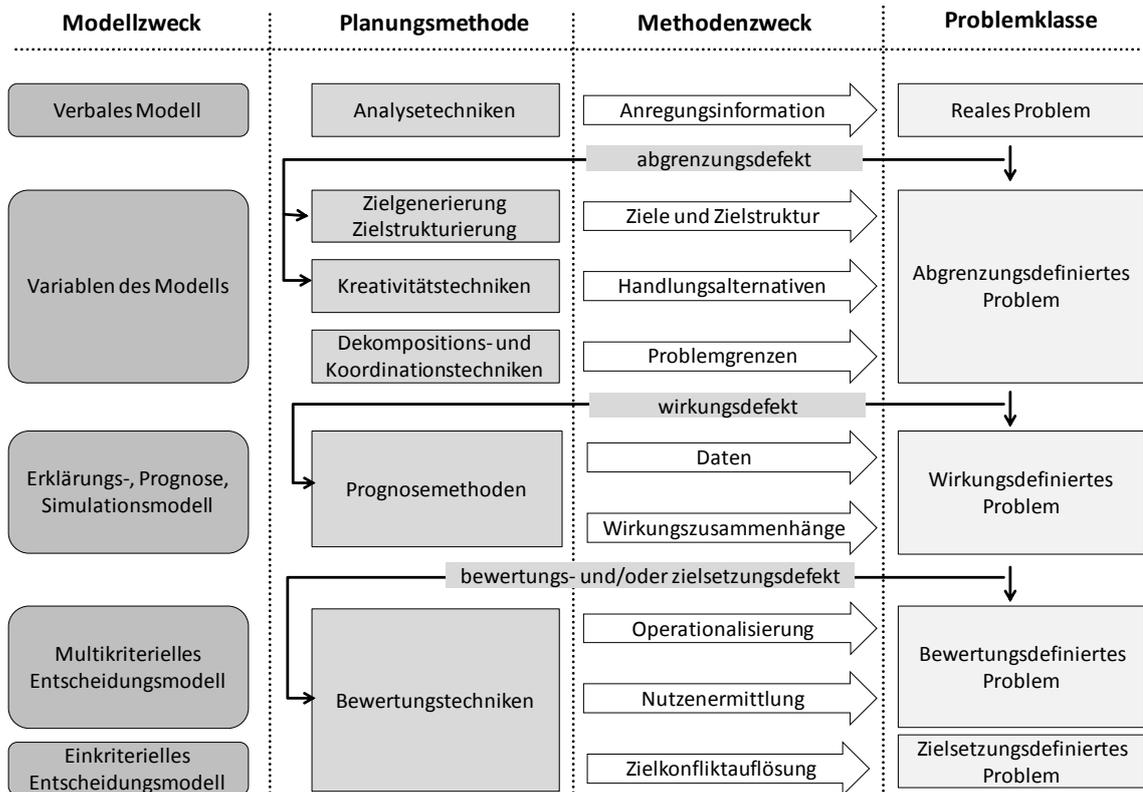


Abbildung 34: Zusammenhang von Strukturdefekt, Modellerstellung und Planungsmethoden (vgl. Klein und Scholl 2011)

Der Strukturierungs- und Modellbildungsprozess resultiert somit, wenn alle Defekte beseitigt werden, in einem monokriteriellen, deterministischen Entscheidungsmodell. Die Komponenten des in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Entscheidungsmodells finden sich in der Abbildung wieder. Deren methodische Ausgestaltung durch geeignete Planungsmethoden führt somit zu einer Reduzierung der bestehenden Defekte bei einer damit einhergehenden Verbesserung der entscheidungsrelevanten Informationsbasis.

¹³¹ Die Beseitigung des Defektes kann dabei allein bereits durch den Modellbildungsprozess erfolgen oder durch die zusätzlich Verwendung von Planungstechniken (vgl. Klein und Scholl 2011).

Dieses Kapitel widmet sich nun der konkreten Ausgestaltung dieser Komponenten mit problemadäquaten Methoden¹³² unter Beachtung der in Kapitel 5.1 definierten Anforderungen. Das Ergebnis dieses Unterkapitels stellt somit eine methodisch ausgestaltete Planungsmethodik für die strategische Produktionsplanung für junge Märkte dar. Es überführt das Entscheidungsproblem in ein Entscheidungsmodell, auf dessen Grundlage robuste Strategien identifiziert werden können. Die methodische Ausgestaltung orientiert sich am Erstellungsprozess eines Entscheidungsmodells aus Abbildung 33.

5.3.1 Methodische Ausgestaltung des Zielsystems

Das *Zielsystem* bildet die strategischen Ziele ab die es zu erreichen gilt, damit Wettbewerbsvorteile generiert werden können und dadurch der langfristige Unternehmenserfolg gesichert wird. Die Ziele werden innerhalb des Zielsystems in Form von Zielgrößen bzw. Kriterien dargestellt, die jeweils einen entscheidungsrelevanten Aspekt des angestrebten Zielzustandes verkörpern. Neben der Definition der Zielgrößen sind zudem die Präferenzrelationen des Entscheiders bezüglich einer Zielgröße zu ermitteln. Die Zielgrößen im Bereich Produktion sind dabei den Unternehmens- oder Geschäftsfeldzielen untergeordnet. Der Definitionsprozess von relevanten Zielen ist überwiegend von Kreativitätstechniken wie dem Brainstorming und -writing oder synektischen Methoden geprägt (vgl. Klein und Scholl 2011).

In der Regel sind die Ziele nicht per se vorgegeben. Für das langfristige Überleben stellt das Erreichen von ökonomischen Zielen durch eine geeignete Produktionsplanung jedoch eine essentielle Voraussetzung dar. Eine rein ökonomische Bewertung würde jedoch oftmals zu kurz greifen, da für das Überleben eines Unternehmens auch andere Ziele relevant sind.¹³³ Deren Einbezug führt unweigerlich zu Zielkonflikten, die eine Berücksichtigung der Präferenzrelationen erforderlich machen. Für eine rationale Entscheidungsfindung ist überdies die Operationalität der Ziele zur Feststellung des Zielerreichungsgrads erforderlich. Zur Ermittlung der subjektiven Wertvorstellungen werden vorrangig Befragungstechniken eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit bietet es sich daher an, die Höhen-, Arten- und Zeitpräferenz über eine Befragung der Entscheider zu ermitteln. Zudem können gleichzeitig die mit den Zielen verbundenen Kriterien und die Ausprägungen der betrachteten Handlungsalternativen ermittelt werden. Zur Operationalisierung der Kriterien und Präferenzen bietet sich die Abfrage in Form eines standardisierten Fragebogens mit ordinaler Ratingskala an (vgl. Klein und Scholl 2011; Laux et al.

¹³² Die Betrachtung konzentriert sich dabei auf die am weitesten verbreiteten Methoden. Ferner wird auf eine ausführliche Erläuterung der aufgeführten Methoden im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da diese den Umfang dieses Kapitels stark vergrößern würde. Eine genauere Erläuterung erfolgt deshalb lediglich für die Kernmethoden des Planungsansatzes, zur Prognose und Bewertung. Für eine Beschreibung der nicht erläuterten Methoden siehe Homburg 2012; Klein und Scholl 2011 oder Welge und Al-Laham 2011.

¹³³ Für strategische Ziele im Bereich der Produktion vgl. Tabelle 8.

2012). Es lässt sich auf diesem Weg auf einfache und für den Entscheider schnell verständliche Weise die Gewichtung sowie deren zeitliche Veränderung ermitteln. Zur Erfassung der Höhenpräferenzen sowie zur allgemeinen Verbesserung des Problem- und Systemverständnisses kann die Befragung zudem von einem teilstrukturierten Interview flankiert werden.

5.3.2 Methodische Ausgestaltung der Strategiewahl

Handlungsalternativen stellen eine wesentliche Komponente des Entscheidungsfeldes dar und werden durch Entscheidungsvariablen verkörpert, die vom Entscheider selbst beeinflusst werden können (wie z. B. die Wahl des Standortes). Die Entscheidungsvariablen können dabei eine unendliche oder endliche Zahl an Ausprägungen aufweisen, wobei letztere z. B. der Menge an in Frage kommenden Standorten entspricht. Zudem spielen Restriktionen für die Definition von Alternativen eine Rolle, die sich durch die Dependenz oder Interdependenz zwischen den Ausprägungen einzelner Entscheidungsvariablen ergeben. Die Wahl einer Methode zur Alternativenermittlung hängt in starkem Maße von dem Informationsstand über das Entscheidungsproblem und von möglichen Lösungswegen ab. Für die grundsätzliche Entwicklung von Handlungsalternativen sind Kreativitätstechniken wie das bereits zuvor genannten Brainstorming und -writing oder synektische Methoden von Vorteil. Hat der Entscheider dagegen bereits eine ungefähre Vorstellung über mögliche Lösungsansätze und Restriktionen, können Alternativen auf logischem Weg (z. B. Mittel-Ziel-Netzwerke oder durch morphologische Methoden) generiert werden. Dies entspricht der Gegebenheit des im Rahmen dieser Arbeit vorliegenden Entscheidungsproblems. Aufgrund der transparenten Abbildung der kombinatorischen Komplexität von Handlungsmöglichkeiten sowie der einfachen Generierung und Auswahl unterschiedlicher Alternativen ist insbesondere die morphologische Methode in Form eines morphologischen Kastens von Interesse. Hierzu werden untereinander Entscheidungsvariablen in der Kopfspalte einer Tabelle vermerkt sowie im weiteren Verlauf der Zeile deren Ausprägungen, sodass jeder Spalte eine Ausprägung entspricht. Durch die linienförmige Verbindung der Zeilen lassen sich systematisch und transparent nachvollziehbare Alternativen generieren (vgl. Klein und Scholl 2011).

5.3.3 Methodische Ausgestaltung der Umweltzustände

Die Komponente der *Umweltzustände* wird durch problemrelevante Daten beschrieben, die nicht durch den Entscheider beeinflusst werden können. Entsprechend dieser Definition umfasst die Komponente nicht nur die globale Umwelt sondern auch das Wettbewerbsumfeld im Sinne der Branchenstruktur und -dynamik, strategischen Gruppen und der Konkurrenten.¹³⁴ Während die globale Umwelt noch gut zu beschreiben ist, zeigt Kapitel 4.2.1, dass die Beschreibung des Wettbewerbsumfeldes im jungen Markt für LiB nur unzureichend möglich ist. Nichtsdestotrotz müssen auch Informationen und

¹³⁴ vgl. Kapitel 4.1.2

Parameterdaten über das Wettbewerbsumfeld in einer Weise zugänglich sein, dass sie im Entscheidungsmodell berücksichtigt werden können. Sie liefern wichtige Hinweise auf die Branchen- bzw. Marktattraktivität sowie das dort bestehende Preisniveau. So kann sich eventuell eine große Verhandlungsstärke der Lieferanten auf die Entscheidung der vertikalen Integration im Rahmen der Fertigungstiefenstrategie auswirken, obwohl diese aus rein ökonomischen Gründen nicht vorteilhaft wäre. Zudem ist eine Berücksichtigung des Preisniveaus notwendig, um die Wirkung der ergriffenen Strategien zur Gestaltung des Produktionssystems und die daraus resultierende wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit des Produktionssystems beurteilen zu können. Aus diesem Grund werden im Folgenden zuerst Methoden zur Erfassung des globalen Umfeldes und anschließend solche für das Wettbewerbsumfeld betrachtet. Zudem wird in diesem Kontext auch auf die Umweltprognose zur Erfassung derer zukünftigen Entwicklungen eingegangen. Die Wirkprognose stellt dagegen einen gesonderten Betrachtungsbereich dar und wird im Anschluss an dieses Unterkapitel erläutert.

Das globale Umfeld kann weitestgehend gut auf Basis bestehender Informationen im Rahmen von Sekundärerhebungen abgebildet werden. Schwieriger stellt sich dagegen die Abbildung der zukünftigen Entwicklung dar. In solchen Fällen kann es ratsam sein, die Datenlage durch eine Primärerhebung auf Basis von Experteneinschätzungen zu untermauern. Gängige Methoden hierzu stellen die direkte Abfrage subjektiver Annahmen und Wahrscheinlichkeiten dar, die Delphi-Methode als mehrstufiges Verfahren oder die Szenario-Technik als Methode zur Generierung von Szenarien. Gerade letztere erscheint im Kontext dieser Arbeit als sehr passend. Basierend auf der unterschiedlichen Entwicklung von Einflussfaktoren aus externen Einflussbereichen (wie z. B. der Ölpreisentwicklung) können durch deren systematische Kombination alternative Zukunftsbilder entwickelt werden. Diese üben unterschiedliche Einflüsse auf die Diffusion von Elektrofahrzeugen und somit auf die Diffusion der LiB aus. Alternative Szenarien sind insbesondere auch bei der Strategiewahl von großer Bedeutung. Die einzelnen Strategiealternativen werden hierbei bezüglich ihrer Wirkung unter verschiedenen Umweltszenarien betrachtet. Können Wahrscheinlichkeiten für die Szenarien angegeben werden, spricht man von Entscheidung unter Risiko. Ist dies nicht der Fall handelt sich um eine Entscheidung unter Unsicherheit. Durch das Ziel, robuste Produktionsstrategien zu identifizieren, also solche, die auch unter schlechtesten Rahmenbedingungen zu einem akzeptablen Ergebnis führen, erscheint die Abbildung eines pessimistischen, eines optimistischen und eines von Diskontinuitäten gezeichneten Szenarios als angebracht (vgl. Klein und Scholl 2011; Homburg 2012).

Zur Beschreibung des Wettbewerbsumfeldes kann ebenfalls auf Sekundärerhebungen zurückgegriffen werden. Jedoch ist die Datenlage hierbei deutlich schlechter. In Kapitel 2.2 wurde der aktuelle Stand soweit möglich wiedergegeben. Eine Analyse von strategischen Gruppen oder Konkurrenten konnte jedoch mangels Informationen nicht vorgenommen werden. Für die Beurteilung der Wettbewerbsfähigkeit des eigenen Produktionssystems und der zugrundeliegenden Produktionskosten muss deren zukünftige Entwicklung erfasst werden. Zu diesem Zweck können Studien mit entsprechenden

Prognosen verwendet und darüber die Bandbreite an zu erwartenden Kosten für LiB über die Zeit dargestellt werden. Für die Abschätzung zukünftiger Marktpreise bzw. der Produktionskosten der Wettbewerber können auch Erfahrungskurven herangezogen werden, sofern es möglich ist, den Erfahrungseffekt einer Branche abzuschätzen. Hat man ferner Kenntnis über die Ausbringungsmenge der Konkurrenz bzw. über die Gesamtproduktionsmenge der Branchen und entsprechende Marktanteile, kann man nährungsweise Rückschlüsse über deren Produktionskosten ziehen (vgl. Picot 1981). Für das eigene Unternehmen stellen diese dann den Benchmark dar, den es zu erreichen gilt.

Zur Erfassung der Bedeutung und zukünftigen Änderung der Branchenstruktur bietet es sich an, auf den bereits genannten standardisierten Fragebogen zurückzugreifen¹³⁵. Die ordinale Skala ermöglicht es, die gegenwärtige Relevanz und Ausprägung unterschiedlicher Branchenmerkmale sowie deren zukünftige Entwicklung und Bedeutung subjektiv zu erfassen und gegebenenfalls bei der Strategiewahl zu berücksichtigen.

5.3.4 Methodische Ausgestaltung der Wirkprognose

Die Wirkprognose stellt eine Kernkomponente des Entscheidungsmodells dar. Die Auswahl einer hierzu passenden Prognosemethode ist daher von entscheidendem Einfluß für die spätere Entscheidungsqualität des Modells. Aus diesem Grunde wird deren Auswahl auch besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Im Folgenden wird zuerst eine Übersicht zu den bestehenden Klassen an Prognosemethoden gegeben. Daran anschließend erfolgt die systematische Auswahl einer problemadäquaten Methode auf Basis des Ausschlussprinzips.

5.3.4.1 Klassifizierung und Erläuterung gängiger Prognosemethoden

Prognosen können unterschiedliche Bereiche eines Planungsproblems betreffen. Im vorherigen Abschnitt wurde bereits auf deren Nutzen bei der Ermittlung zukünftiger Umweltentwicklungen und Parameter eingegangen. Als weiterer wesentlicher Bestandteil eines Entscheidungsmodells wurde mit der „Wirkprognose“ bereits eine weitere Art von Prognose genannt. Bei der Umwelt- oder Entwicklungsprognose stehen die vom Entscheider oder Unternehmen nicht beeinflussbaren zukünftigen Entwicklungen im Zentrum der Betrachtung. Die Wirkprognose befasst sich dagegen mit den zukünftigen Zuständen bzw. Ergebnissen, die sich aus den Wechselwirkungen und Wirkungszusammenhängen zwischen den eigenen Handlungsalternativen und der Umweltentwicklung ergeben. Damit eine Untersuchung der Alternativen auch über ihren gesamten Zeitverlauf hinweg möglich ist, ist eine Kombination von Entwicklungs- und Wirkungsprognose notwendig, wie sie auch im Entscheidungsmodell dargestellt ist (vgl. Hüttner 1986).

¹³⁵ *Der standardisierte Fragebogen, der im Rahmen der exemplarischen Anwendung dieser Arbeit verwendet wird, kann in Anhang 3 eingesehen werden.*

Weiterhin lassen sich Prognoseverfahren entsprechend ihres Prognosehorizonts unterteilen (vgl. Götze 1993):¹³⁶

- kurzfristig: bis zu zwei Jahren
- mittelfristig: bis zu zehn Jahren und
- langfristig: länger als zehn Jahre.

Bei der Wahl einer geeigneten Prognosemethode sollte darauf geachtet werden, dass der Prognosehorizont auch mindestens dem Planungshorizont entspricht (vgl. Klein und Scholl 2011). Das vorliegende strategische Planungsproblem benötigt entsprechend einen langfristigen Prognosehorizont.

Die bis hierhin genannten Unterscheidungsmerkmale können nicht trennscharf voneinander definiert werden. Aufgrund der damit einhergehenden Unschärfe können sie daher auch nur bedingt zur Klassifikation von Prognosemethoden verwendet werden. Nichtsdestotrotz bieten sie eine erste Orientierung, welche Methoden potentiell in Frage kommen. Für eine genauere Spezifizierung werden im folgenden weitere Merkmale herangezogen (vgl. Götze 1993).

Singulär- und Systemprognose

Die Unterscheidung in Singulär- und Systemprognose richtet sich danach, ob das Verfahren die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Prognosegrößen explizit berücksichtigt. Konzentriert sich die Prognose auf eine Variable, handelt es sich um eine Singulärprognose, während die Systemprognose die Gesamtheit der Variablen¹³⁷ mit einbezieht und deren Verknüpfungen berücksichtigt (vgl. Götze 1993).

Qualitative und quantitative Verfahren

Ein wesentliches Klassifizierungsmerkmal stellt die Unterteilung nach der Art der Datengewinnung und -verarbeitung in qualitative¹³⁸ und quantitative Prognosen dar. Die qualitativen Methoden stützen sich auf die subjektive Erfahrung von Experten oder an der Prognose beteiligter Personen. Sie liefern einen Mehrwert in Entscheidungssituationen, die schlecht strukturiert und durch unvollkommene Informationen charakterisiert werden. Eine Lösungsgarantie bieten sie nicht, können jedoch den Entscheider durch das gezielte Ansteuern von Handlungsalternativen dabei unterstützen, den Problemlö-

¹³⁶ Hierbei gibt es jedoch unterschiedliche Ansichten bezüglich der Zeitspannen: während bei Götze 1993 langfristig erst ab zehn Jahren gilt, bezeichnet Hüttner 1986 einen Horizont bereits nach drei Jahren als langfristig.

¹³⁷ Die Anzahl der Variablen wird dabei maßgeblich durch die Wahl der Systemgrenze bestimmt.

¹³⁸ Qualitative Methoden werden auch als subjektive oder intuitive Methoden bezeichnet (vgl. Hüttner 1986)

sungsaufwand zu reduzieren. Qualitative Methoden können zudem durch eine Zuordnung von Zahlenwerten auch weiter quantifiziert werden (vgl. Hüttner 1986; Homburg 2012; Welge und Al-Laham 2011).¹³⁹

Zu den gängigen qualitativen Methoden werden die bereits genannten expertengestützten Befragungstechniken, die Indikatorenmethode sowie Methoden der „technologischen Prognose“ bzw. Zukunftsforschung gezählt. Bei der Indikatorprognose handelt es sich um eine Singulärprognose, bei der auf Basis eines oder mehrerer Indikatoren Rückschlüsse über die Ausprägung einer Variablen zu einem späteren Zeitpunkt gezogen werden können (vgl. Hüttner 1986; Götze 1993). Der Fokus der Zukunftsforschung ist relativ weit gefächert und umfasst neben ökonomischen auch andere Aspekte, die z. B. politischer oder ökologischer Natur sind. Unter diese Kategorie fallen Methoden wie die bereits genannte Szenario-Technik und die dazu komplementäre Cross-Impact-Analyse. Letztere erfasst die Wechselwirkungen zwischen Ereignissen in den Szenarien und ordnet ihnen Eintrittswahrscheinlichkeiten zu. Sowohl bei der Szenario-Technik als auch bei der Cross-Impact-Analyse handelt es sich um Singulärprognosen (vgl. Klein und Scholl 2011; Hüttner 1986). Eine weitere Methode der Zukunftsforschung stellt die Analogiemethode dar, bei der man versucht auf Basis ähnlicher bereits weiter fortgeschrittener Systeme Rückschlüsse auf die Entwicklung des betrachteten Systems zu ziehen (vgl. Hüttner 1986). Ferner zählt auch die qualitative System-Dynamics-Methode zur Gruppe der Zukunftsforschung. Es handelt sich hierbei um eine Methode zur Analyse und Simulation von komplexen dynamischen Systemen. Die Methode kann, wie die Definition schon nahe legt, der Gruppe der Systemprognosen zugeordnet werden. Es ist ein wesentliches Charakteristikum von System Dynamics (SD), dass sie sowohl qualitative als auch quantitative Modelle beinhaltet, die in der Regel aufeinander aufbauen. Die qualitativen oder auch Kausaldiagramme stellen dabei ein profundes Mittel zur Systemanalyse dar, indem sie bestehende Wirkbeziehungen innerhalb des Systems abbilden. Dies führt zu einer erhöhten Transparenz und einem verbesserten Systemverständnis, durch das zukünftige Entwicklungen besser antizipiert werden können (vgl. Coyle 1996; Sterman 2000). Auf System Dynamics als quantitative Methode wird zu einem späteren Zeitpunkt nochmals eingegangen.

Für quantitative Prognosen werden formale Modelle zur Prognose verwendet. Sie bedienen sich somit mathematischer Gesetzmäßigkeiten zur Berechnung zukünftiger Größen und lassen sich weiterhin in univariante und multivariante Prognosen unterteilen. Eine univariante Prognose ist dadurch gekennzeichnet, dass nur die Zeitreihe der zu prognostizierenden Variablen berücksichtigt wird. Die Prognose basiert somit auf den Vergangenheitswerten der Prognose. Dagegen verwendet die multivariante Prognose mehrere Zeitreihen von Variablen, die mit der zu prognostizierenden in kausaler Verbindung stehen. Sie berücksichtigt somit bestehende Wirkungszusammenhänge zwischen den Größen (vgl. Hüttner 1986).

¹³⁹ vgl. Kapitel 5.2.1

Die univariaten Zeitreihenprojektionen stützen sich im Wesentlichen auf vorangegangene Daten, um einen entsprechenden Trend hin zu einer zukünftigen Entwicklung zu erkennen. Sie adressieren einen eher kurz- bis mittelfristigen Prognosehorizont und sind aufgrund der Konzentration auf lediglich eine Variable für das hier vorliegende komplexe Problem nicht geeignet (vgl. Götze 1993). Die multivariate Prognose scheint hierzu vorteilhafter zu sein. Sie lässt sich weiterhin grob in zwei Gruppen unterteilen. Die multivariaten Zeitreihenprojektionen und die kausalen Verfahren (vgl. Hüttner 1986). Letztere bieten nochmals die Möglichkeit einer Differenzierung nach der Art wie die Systemparameter ermittelt werden (vgl. Meyer 2009).

Die multivariaten Zeitreihenprojektionen umfassen Methoden der modernen Zeitreihenanalyse, adaptive Verfahren und z. B. den Box-Jenkins-Ansatz. Im Vergleich zu den univariaten Zeitreihen, bauen sie auf mehreren Zeitreihen gleichzeitig auf. Die Vernachlässigung der kausalen Zusammenhänge, die zur Prognose eines komplexen Systems unerlässlich sind, stellt für diese Verfahren jedoch ein Ausschlusskriterium dar.

Die kausalen Prognoseverfahren können zur Verhaltensbeschreibung sowie zur Systemerklärung verwendet werden. Methoden der kausalen Verhaltensbeschreibung untersuchen die Wirkungszusammenhänge zwischen der abhängigen Variablen und mehreren unabhängigen Variablen auf Basis statistisch ermittelter Zeitreihen. Hierbei spielt nur das Systemverhalten eine Rolle, während die ihm zugrundeliegende Systemstruktur nicht berücksichtigt wird. Das innere Systemverhalten zwischen Input und Output kann somit als „Black-Box“ aufgefasst werden (vgl. Meyer 2009; Bossel 1992). Die bekanntesten Vertreter dieser Kategorie sind die Input-Output-Modelle, Regressionsanalysen, ökonometrische Verfahren, Marketingmodelle sowie künstliche neuronale Netze (vgl. Hüttner 1986; Klein und Scholl 2011; Hamann 2008).

Die Input-Output-Analysen kommen sowohl in der Volkswirtschaft zur Untersuchung der Transaktionen zwischen einzelnen Industrie- und Wirtschaftszweigen als auch in der Betriebswirtschaft zur Darstellung vernetzter Produktionssysteme zum Einsatz. Sie gehen auf die Arbeiten von Leontief und Klock¹⁴⁰ zurück. Zur Ermittlung der Mengenbeziehungen zwischen einem Input (z. B. Gütereinsatz) und dessen Output (Ausbringungsmenge) werden je nach Betrachtungsebene Transformations-¹⁴¹ bzw. Produktionsfunktionen¹⁴² verwendet oder empirisch ermittelte Input-Output-Tabellen (vgl. Klock 1969; Schultmann 2003). Die Eingangsdaten sind hierbei zumeist auf einem sehr detaillierten Niveau. Auf volkswirtschaftlicher Ebene dient sie der Bestimmung der Leistungsänderung einzelner Sektoren aufgrund eines veränderten Inputs wie z. B. Rohstoffe oder Produktionsmenge (vgl. Grunwald 2010).

¹⁴⁰ Klock übertrug das makroökonomische Modell von Leontief auf den Produktionsbereich von Unternehmen.

¹⁴¹ Auf Ebene einzelner Produktionsstellen.

¹⁴² Auf Ebene des gesamten Produktionsbereichs.

Das Einsatzgebiet von Regressionsanalysen ist relativ weit gefasst. Sie können zum Beispiel zur Erklärung von Zusammenhängen genutzt werden oder aber auch zur Prognose. Sie lassen sich dabei in lineare und multiple Regression, unterteilen. Die Unterscheidung ist hierbei abgänglich von der Anzahl der unabhängigen Variablen im System. Nachdem in einem ersten Schritt die kausalen Zusammenhänge bestimmt werden, erfolgt eine Schätzung der Regressionsfunktion, durch die die Abhängigkeit der Variablen in eine mathematische Gleichung umgewandelt wird. Abschließend wird die Funktion bezüglich ihrer Zielerreichung überprüft (vgl. Backhaus et al. 2006; Meyer 2009).

Ökonomische Prognosemethoden sind im Gegensatz zu den zeitreihenbasierten Verfahren nicht autoprojektiv. Entsprechend stützen sie sich nicht auf Vergangenheitsdaten sondern versuchen, die Wirkbeziehungen von unabhängigen und der zu prognostizierenden Variablen in einem ökonometrischen Modell abzubilden. Zur Berechnung dieser Mehrgleichungsmodelle kommen wiederum Regressionsverfahren zum Einsatz.¹⁴³ Das Gleichungssystem eines ökonometrischen Modells besteht in der Regel aus Reaktionsgleichungen, die mit einer Störgröße behaftet sind. Sie beschreiben, inwieweit eine abhängige Variable von einer Gruppe anderer abhängiger und/oder unabhängiger Variablen beeinflusst wird. Die Identitäten umfassen deterministische Definitionsgleichungen und/oder Gleichgewichtsbedingungen, durch die die Erfordernisse für das Eintreten ökonomischer Gleichgewichtszustände festgelegt werden. Das Ziel ökonometrischer Modelle stellt die möglichst reale Abbildung des Systemverhaltens dar, nicht jedoch die Abbildung der ihm zugrundeliegenden Systemstruktur. Ökonometrische Modelle benötigen somit recht umfangreiches Datenmaterial zur Schätzung und Validierung der Größen (vgl. Klein und Scholl 2011; Hüttner 1986; Meyer 2009).

Neuronale Netze orientieren sich an den biologischen Vorgängen im Gehirn. Werden diese zur Prognose verwendet, sind zu Beginn Einflußgrößen zu definieren, die zur Erklärung der Prognosegröße berücksichtigt werden müssen. Die Kenntnis oder Angabe von genauen Kausalzusammenhängen ist dabei jedoch nicht notwendig. Neuronale Netze werden auch als „lernende“ Netze bezeichnet. Bevor sie für eine Prognose genutzt werden können müssen sie auf Basis von Vergangenheitswerten „trainiert“ werden. Dies bedeutet, dass die Eingangsgrößen entsprechend einer Transferfunktion mit unterschiedlichen Gewichten bedacht und weitergeleitet werden. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis die Ausgabedaten den historischen Sollergebnissen in etwa entsprechen. Diese Trainingsphasen sind oftmals sehr zeitaufwändig, wobei es auch an geeigneter Hilfe zur Identifikation geeigneter Netzkonstellationen mangelt (vgl. Hamann 2008; Klein und Scholl 2011).

¹⁴³ *Die den ökonometrischen Modellen zugrundeliegenden Regressionsanalysen stellen auch die Grundlage der Marketing-Modellen dar. Im engsten Sinne beschreiben sie die Anwendung ökonometrischer Modelle auf Probleme des Marketings (vgl. Hüttner 1986).*

Die dritte Gruppe der multivariaten quantitativen Prognosemethoden stellend die Systemstrukturverfahren dar. Im Vergleich zu den vorangegangenen Methoden werden hier die Prognosegrößen aus der Systemstruktur selbst heraus entwickelt. Es wird somit angestrebt, die Systemstruktur in einem Modell nachzubilden¹⁴⁴ und nicht, das Verhalten des Systems nur bestmöglich nachzuahmen. Entsprechend stellt die Basis der Prognose ein Modell des Systems dar und nicht ein Modell dessen Verhaltens. Notwendige Konsequenz hieraus ist, dass die Wirkungsstruktur des realen Systems verstanden werden muss. Dieses wird dabei als „Glass-Box“ aufgefasst und zur Modellbildung in seine Komponenten, Subsysteme und Kopplungen zerlegt (vgl. Bossel 1992). Die Annahme, dass das Verhalten eines Systems grundsätzlich auf dessen Struktur zurückzuführen werden kann, ist Gegenstand der Kybernetik. Sie wird auch als allgemeine formale Wissenschaft von Struktur, Relation und dem Verhalten dynamischer Systeme beschrieben und baut auf der Regelungstheorie auf. Sie stellt einen Teilbereich der Systemtheorie dar. Ein wesentliches Merkmal der Systemkybernetik ist dabei die Möglichkeit zur Erfassung von Rückkopplungen in einem System. Eine Methode, die Systeme unter einer systemkybernetischen Perspektive analysiert, ist System Dynamics (vgl. Milling 2001; Forrester 1961; Flechtner 1966). In den 1950er Jahren von Jay W. Forrester entwickelt, dient sie der Analyse, Modellierung und Simulation komplexer sozioökonomischer Systeme (vgl. Forrester 1968). System Dynamics ermöglicht es, auf Basis von Modellen die Interaktionen zwischen Organisationsstrukturen, Entscheidungsregeln, Rückkopplungen und Verzögerungen zu untersuchen und deren Auswirkungen (z. B. auf ein Unternehmen) zu erkennen (vgl. Lerch 2015). Ermöglicht wird dies durch eine formale Modellierung die es erlaubt, sowohl Material-, Finanz- als auch Informationsflüsse unter Verwendung von Differentialgleichungen abzubilden (vgl. Forrester 1961).

Auf Basis der zuvor beschriebenen methodischen Klassifizierungen und Beschreibungen lassen sich die potentiellen Prognosemethoden in folgender Baumstruktur abbilden.

¹⁴⁴ In dem Maße bzw. Umfang wie es für den Modellzweck erforderlich ist (vgl. Bossel 1992).

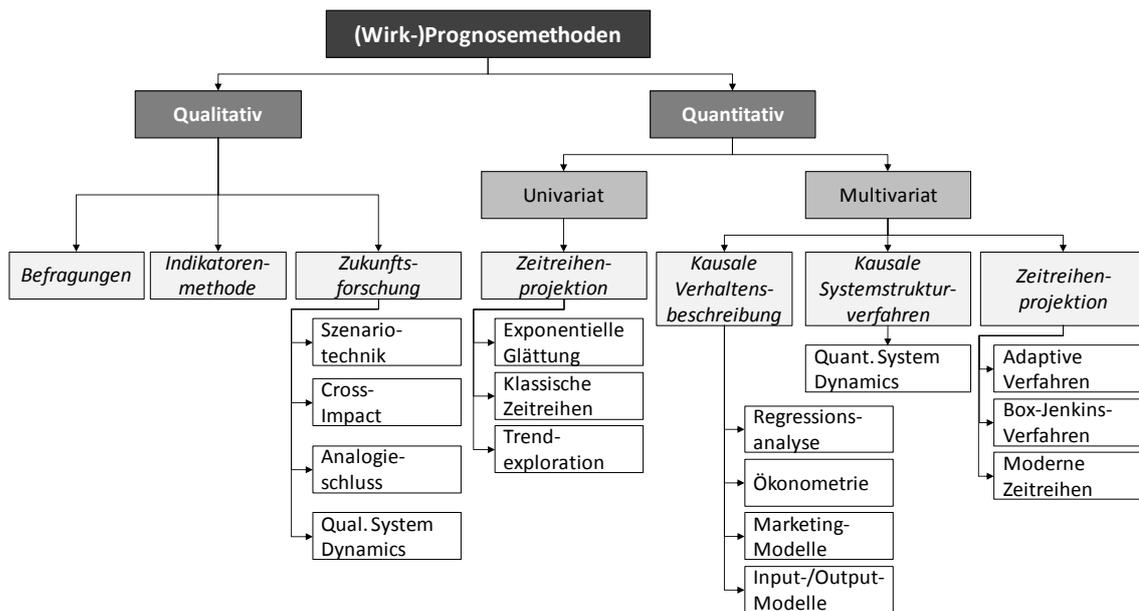


Abbildung 35: Klassifizierung von Prognosemethoden¹⁴⁵

Im nachfolgenden wird auf Basis genereller Anforderungen eine geeignete Prognosemethode ausgewählt und dahingehend untersucht, ob sie den spezifischen Anforderungen aus Kapitel 5.1 gerecht wird.

5.3.4.2 Auswahl einer problemadäquaten Prognosemethode

Vorrangiges Kriterium für die Wahl einer Prognosemethode im Kontext dieser Arbeit stellt deren Befähigung zur Erfassung und Handhabung mehrerer Variablen dar. Diese Anforderung ergibt sich bereits allein dadurch, dass die Prognose als Wirkprognose fungieren soll, um die Wirkungszusammenhänge von Strategiealternativen und Umweltentwicklungen zu eruieren. Ein weiteres Kriterium bildet die Anforderung, ein formales Modell als Grundlage für die Entscheidungsunterstützung zu entwickeln. Zudem ergibt sich aus der intrinsischen Eigenschaft junger Märkte, dass nur wenige oder auch keine Erfahrungswerte und Informationen zu dem Markt und dessen Wettbewerbern vorliegen. Entsprechend ist es auch nicht möglich historische Zeitreihen zur Prognose heranzuziehen. Unter Beachtung der genannten Anforderungen und Einschränkungen scheiden daher die qualitativen und univarianten Methoden als Wahlmöglichkeit aus. Ebenso wenig eignen sich multivariate Zeitreihenprojektionen sowie Entwicklungsmethoden des Marketings zur Wirkprognose.

Die Auswahl einer Methode beschränkt sich somit noch auf ökonometrische Prognosen sowie Input-Output-Modelle auf Seiten der kausalen Verfahren der Verhaltensbeschreibung und System Dynamics als kausales Systemstrukturverfahren. Alle Verfahren wer-

¹⁴⁵ Die Abbildung baut überwiegend auf Informationen aus Hüttner 1986; Bossel 1992; Klein und Scholl 2011; Meyer 2009 auf und ist ähnlich zu Abbildung 4-1 in Meyer 2009.

den der Forderung nach Berücksichtigung von Nichtlinearität gerecht und sind zudem, zumindest in gewissem Maße, in der Lage, ex ante Wirkprognosen bzw. „Was-wäre-wenn“-Analysen durchzuführen und den Entscheider somit auch beim Lernen über die Konsequenzen seiner Entscheidungen zu unterstützen.

Ein wesentliches Differenzierungsmerkmal zwischen den Methoden stellt jedoch die verwendete Datenbasis sowie die Transparenz der Prognoseentstehung dar. In Kapitel 5.1 wurde als Anforderung an die Datenbasis die Möglichkeit zur Berücksichtigung von sowohl quantitativen als auch qualitativen Daten formuliert. Diese Forderung kann lediglich System Dynamics in ausreichendem Umfang bedienen. Die Methode ermöglicht es zudem mit einer reduzierten Datenbasis zu agieren, was wiederum vor dem Hintergrund des Neuheitsgrades und der daraus resultierenden Informationsverfügbarkeit von erheblichem Vorteil ist. Fehlende oder unvollständige Daten, die jedoch problemrelevant sind, können so dennoch über Analogienbildung oder Expertenaussagen in das Modell eingebunden werden (vgl. Sterman 2001).¹⁴⁶ Die Grundlage der ökonomischen Verfahren sowie der Input-Output-Modelle bilden regressionsanalytische Verfahren, die einen vergleichsweise hohen Anspruch an die Datenbasis stellen. Das zweite Differenzierungsmerkmal stellt die Transparenz der Prognose dar. Die verhaltensbeschreibenden Verfahren werden auch als „Black-Box“-Verfahren bezeichnet, da sie zwar das Verhalten eines Systems nachahmen, jedoch mangels eines Strukturmodells nicht die systemimmanente Entstehung der Prognose abbilden können (vgl. Bossel 1992). Dieser Grad an Transparenz stellt jedoch eine wesentliche Voraussetzung für das „Lernen“ des Entscheiders und die Generierung eines Systemverständnisses dar. Zusätzlich steigert die Transparenz der Lösungsentstehung das Vertrauen in ein Modell sowie dessen Kommunizierbarkeit an Dritte. Die Abbildung eines Strukturmodells ermöglicht es zudem, das mentale Modell¹⁴⁷ des Entscheiders, das dem Prognosemodell zugrunde liegt, für andere zugänglich zu machen und mit deren Vorstellung abzugleichen (vgl. Schwaninger und Ambroz 2009; Sterman 1991). Die systemerklärenden Verfahren werden der Forderung nach Systemtransparenz gerecht und werden daher auch als „Glass-Box“-Verfahren bezeichnet (vgl. Bossel 1992). Aufgrund dieser zwei evidenten Differenzierungsmerkmale erscheint im Problemkontext dieser Arbeit lediglich die

¹⁴⁶ Um Unsicherheiten bezüglich der Ausprägung von Parametern zu berücksichtigen, bieten gängige Softwarelösungen zusätzlich die Option, univariate und multivariate Sensitivitätsanalysen durchzuführen (vgl. Schröter 2006).

¹⁴⁷ Mentale Modelle stellen die Abbildung eines externen Systems dar, dessen Struktur der wahrgenommenen Struktur des Systems entspricht. In der Realität führen die kognitiven Defizite des Menschen dazu, dass mentale Modelle von dynamisch komplexen Systemen häufig fehlerhaft sind. Dies resultiert aus zeitlichen Verzögerungen, nichtlinearem Verhalten und Rückkopplungen im betrachteten System (vgl. Sterman 2001, 1991).

systemdynamische Simulation eine geeignete Methode zur Wirkprognose¹⁴⁸ darzustellen. Abgesehen von den bis hierhin für die Klassifizierung und Auswahl genannten Eigenschaften der Methode System Dynamics bietet deren Anwendung auf das vorliegende Planungsproblems noch weitere Potentiale. Auf diese wird nachfolgend nochmals mit Fokus auf die bis dato noch nicht ausreichend berücksichtigten Anforderungen eingegangen.

Die Methode System Dynamics beruht im Wesentlichen auf drei methodischen Säulen. Die Regelungstheorie als Teil der Kybernetik wird als zentrales Paradigma angesehen. Zusätzlich basiert sie auf der deskriptiven Entscheidungstheorie und Simulationstechnik (vgl. Milling 1984; Forrester 1968). Die systemkybernetische Sichtweise beruht auf der Annahme, dass informationsbasierte Entscheidungen Rückkopplungen auf das System enthalten und somit dessen Zustand verändern können. Dieses Verhalten stellt eine zentrale Komponente von System Dynamics dar und wird im Modell in Form von geschlossenen Regelkreisen abgebildet. Hierdurch offenbaren sich direkte Parallelen zwischen dem dieser Arbeit zugrundeliegenden Prozess der strategischen Planung bzw. des strategischen Produktionsmanagements und dem in Abbildung 36 dargestellten, der oftmals ebenfalls schematisch in Form eines Regelkreise beschrieben wird (vgl. Zäpfel 2000a; Dyckhoff und Spengler 2010; Schröter 2006).

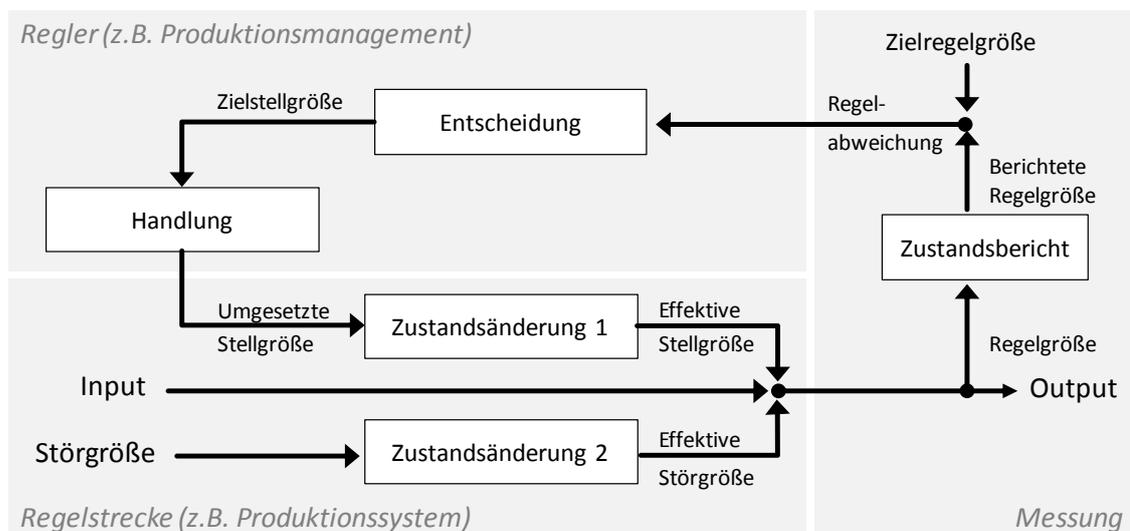


Abbildung 36: Regelkreis des Produktionsmanagements (vgl. Schöneborn 2004; Baetge 1974)

¹⁴⁸ Untermuert wird diese Auswahl durch die Betrachtung möglicher Prognosehorizonte, die für ökonomischen Verfahren und Input-Output-Analysen eher eine kurz- bis mittelfristige Perspektive einnehmen, während System Dynamics auch langfristige Prognosehorizonte unterstützt (vgl. Götze 1993). Der Prognosehorizont wird jedoch aufgrund der eingangs geschilderten Unschärfe nicht als Auswahlkriterium herangezogen, soll jedoch hier ergänzend erwähnt werden.

Die zugrundeliegende Logik des strategischen Produktionsmanagements sowie der Wirkbeziehungen innerhalb systemdynamischer Modelle stimmen somit weitestgehend überein. Zur Modellierung von Entscheidungen des Produktionsmanagements und deren Konsequenzen auf das Produktionssystem scheint System Dynamics somit eine passfähige Methode darzustellen, um die essentiellen Systemzusammenhänge adäquat abbilden zu können.

Den zweiten methodischen Grundpfeiler stellt die deskriptive Entscheidungstheorie dar. Diese postuliert, im Gegensatz zur präskriptiven Entscheidungstheorie, dass der Entscheider nicht zwangsläufig mit dem rationalen Entscheidungsverhalten eines Homo Oeconomicus entscheidet. Die deskriptive Entscheidungstheorie stellt somit das reale Entscheidungsverhalten in den Vordergrund (vgl. Schröter 2006). Da es das Gesamtziel der Planungsmethodik ist, den Planer bei der systematischen und rationalen Entscheidung für eine Produktionsstrategie zu unterstützen, macht die Verwendung der deskriptiven Entscheidungstheorie in diesem Teilbereich der Planungsmethodik durchaus Sinn. Eine Prognose basierend auf der Annahme, dass der Planer sämtliche Entscheidungen rational¹⁴⁹ trifft, geht an der Realität des Unternehmensalltags vorbei. Der Grund hierfür ist in den kognitiven Defiziten des Entscheiders bei dynamischen und komplexen Sachverhalten zu finden (vgl. Dörner 2008; March et al. 1994). Die Annahme, dass Entscheidungen stets unter dem Paradigma der Rationalität getroffen werden, würde somit das geforderte reale Entscheidungsverhalten im Unternehmen nicht adäquat widerspiegeln und zwangsläufig zu Fehleinschätzungen der Wirkprognose führen.

Der dritte Grundpfeiler beschreibt System Dynamics als Simulationstechnik. Simulationsmodelle kommen zum Einsatz, wenn reale Experimente aufgrund ökonomischer, technischer oder ethischer Gründen nicht möglich¹⁵⁰ bzw. erwünscht sind oder Lösungen nicht auf Basis analytischer Verfahren ermittelt werden können (vgl. März et al. 2011). Im Kontext dieser Arbeit sind beide Fälle zutreffend. Während eine reale Erprobung von Strategien zwangsläufig mit der Notwendigkeit eines bestehenden Produktionssystems verbunden ist, können zudem für das hier vorliegende komplexe System die Ursache-Wirkungszusammenhänge nicht auf analytischem Wege beschrieben werden (vgl. Klein und Scholl 2011). System Dynamics basiert dagegen auf numerischer Simulation. Deren Einsatz ist im Vergleich zur analytischen Lösung von nichtlinearen Differentialgleichungen durch numerische Approximation (z. B. Euler oder Runge-Kutta)¹⁵¹ stets möglich (vgl. Kleine 2013). Weiterhin handelt es sich um eine Methode zur kontinuierli-

¹⁴⁹ *Aus Sicht des Planers bzw. Entscheiders handelt dieser in Anbetracht seines subjektiven Informationsstandes jedoch durchaus rational.*

¹⁵⁰ *Hierunter fällt auch die Analyse von Systemen, die sich noch im Entwurfsstadium befinden oder noch nicht real existieren (vgl. Hader 2001)*

¹⁵¹ *Klein und Scholl 2011 listet neben der kontinuierlichen Simulationsmethoden noch die Monte-Carlo-Simulation und die (ereignis)diskrete Simulation als mögliche Klassen von Simulationsmethoden zur Prognose auf.*

chen Simulation, wodurch der dynamisch-kontinuierliche Zeitbezug des Entscheidungsmodells (vgl. Abbildung 31) unterstützt wird und das dynamische Verhalten des Systems analysiert werden kann (vgl. Klein und Scholl 2011). Durch Simulation ist es möglich, verschiedene Strategien bezüglich deren Konsequenzen auf das Zielsystem zu testen. Mitunter kann sie auch in speziellen Fällen, in denen die Lösung des formalen Entscheidungsmodells zu aufwendig ist, selbst als Entscheidungsmodell fungieren (vgl. Klein und Scholl 2011). Insbesondere in schlecht strukturierten Entscheidungssituationen in denen der Lösungsraum und relevante Rahmenbedingungen nicht vollständig bekannt sind, ist damit zu rechnen, dass der Planer eine plausible Lösung akzeptiert, auch wenn diese nicht die optimale darstellt (vgl. Kleine 2013). Das Austesten der verschiedenen Handlungsalternativen und deren Wirkung auf das Systemverhalten führt zudem zu einem Erkenntnisgewinn auf Seiten des Entscheiders. Die Entwicklung formaler Systemmodelle und deren systemdynamische Simulation kann somit in schlecht strukturierten und dynamisch-komplexen Entscheidungssituationen einen Mehrwert zur Steigerung der Transparenz und Akzeptanz von Prognosen liefern (vgl. Kleine 2013).

Es lässt sich somit festhalten, dass System Dynamics die in Kapitel 5.1 definierten Anforderungen an eine potentielle Wirkprognose sowie an deren Fähigkeit zur Informationsverarbeitung erfüllt und für die Zwecke dieser Arbeit geeignet ist.

5.3.5 Methodische Ausgestaltung des Bewertungssystems

Als wesentlicher Schritt zur Auswahl einer Produktionsstrategie müssen die im Rahmen der Prognose erzeugten Ergebnisse der Strategien mit dem Zielsystem des Entscheiders verglichen werden. Dieser Prozess der Bewertung stellt neben der Wirkprognose die zweite Kernkomponente des Entscheidungsmodells dar. Zur Auswahl einer geeigneten Methode zur Bewertung wird in diesem Unterkapitel zuerst eine Einteilung und Eingrenzung von multikriteriellen Bewertungsmethoden vorgenommen. Im Anschluss daran findet darauf aufbauend die Diskussion und Auswahl einer problemadäquaten Bewertungsmethode statt.

5.3.5.1 Einordnung von Verfahren zur multikriteriellen Bewertung

Zwar bietet System Dynamics eine Möglichkeit zur Bewertung von Handlungsalternativen, jedoch betrifft dies vorrangig Entscheidungsprobleme mit monokriterieller Zielstellung. In der Realität sieht sich der Entscheider dagegen in der Regel mit mehreren Zielkriterien konfrontiert. Dies ist auch in der hier vorliegenden Entscheidungssituation der Fall. Da der Mensch jedoch nur in begrenztem Umfang in der Lage ist, eine solche multikriterielle Abwägung durchzuführen, werden zu diesem Zweck formalisierte explizite Modelle entwickelt (vgl. Zhang et al. 2009). Diese Modelle sollen den Entscheider bei der Bewertung und Auswahl einer Handlungsalternative unterstützen, die der subjektiven Einschätzung des Entscheiders weitestgehend entspricht. Hierzu müssen die relevanten Zielkriterien operationalisiert, der Nutzen einer Handlungsalternative bestimmt und vorliegende Zielkonflikte gelöst werden (vgl. Klein und Scholl 2011).

Ein wesentliches Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung sind die in den 1960er Jahren entwickelten multikriteriellen Methoden. Die multikriterielle Entscheidungsunterstützungen (MCDM: *Multi-Criteria Decision Making*/ MCDA: *Multi-Criteria Decision Aid*) bieten dem Entscheider die Möglichkeit, mehrere Ziele in transparenter Art und Weise miteinander zu vergleichen (vgl. Belton und Stewart 2002). Die Wahl der multikriteriellen Methode hängt dabei stark vom vorliegenden Entscheidungsproblem ab. Eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen Methoden erfolgt – nach der Anzahl der in Betracht zu ziehenden Alternativen – in die Multi-Objective-Methoden (MODM: *Multi-Objective Decision Making*) und in die Multi-Attribut-Methoden (MADM: *Mult-Attribute Decision Making*). Im ersten Fall der MODM-Verfahren liegen die Alternativen nicht explizit vor. Ihr Zweck besteht darin, in einem stetigen Lösungsraum unter Beachtung von Nebenbedingungen eine optimale Alternative zu identifizieren. Die optimale Lösung wird dabei anhand von mathematischen Methoden auf der Grundlage definierter Zielfunktionen bestimmt. Demgegenüber zielen die MADM-Verfahren auf die Auswahl der vorteilhaftesten Alternative auf Basis einer gegebenen, meist kleinen Menge an Alternativen (vgl. Zimmermann und Gutsche 1991; Schultmann 2003).

Das Ziel dieser Arbeit besteht vorrangig in der Wahl einer geeigneten robusten Produktionsstrategie. Die Strategien sind dabei von diskreter Natur, ihre Anzahl ist endlich und bekannt.¹⁵² Es handelt sich daher nicht um die Bestimmung einer optimalen Lösung im Rahmen eines Optimierungsproblems. Die Lösung eines Optimierungsproblems würde zudem voraussetzen, dass der Entscheider in der Lage ist, das Zielsystem klar in Form von Zielfunktionen und Nebenbedingungen zu formulieren, was bei der vorliegenden Komplexität des Entscheidungsproblems mit erheblichen Schwierigkeiten behaftet ist. Die Auswahl einer Methode zur multikriteriellen Bewertung beschränkt sich daher auf die MADM-Verfahren (vgl. Zimmermann und Gutsche 1991; Hirzel 2015).

Die Methoden der MADM lassen sich entsprechend der Art der zur Entscheidung vorliegenden Informationen sowie anhand derer Qualität unterteilen. Abbildung 37 bietet eine Übersicht über mögliche Methoden der MADM.

Liegen keinerlei Informationen zu den Präferenzen des Entscheiders vor, können einfache Entscheidungsregeln wie die Maximax- oder Maximin-Strategien herangezogen werden. Sind Informationen zwar vorhanden, wobei jedoch nur die Alternativen in ihrer Gesamtheit betrachten werden können, bieten sich die zwei zuletzt genannten Methoden an.

¹⁵² vgl. hierzu Abbildung 27

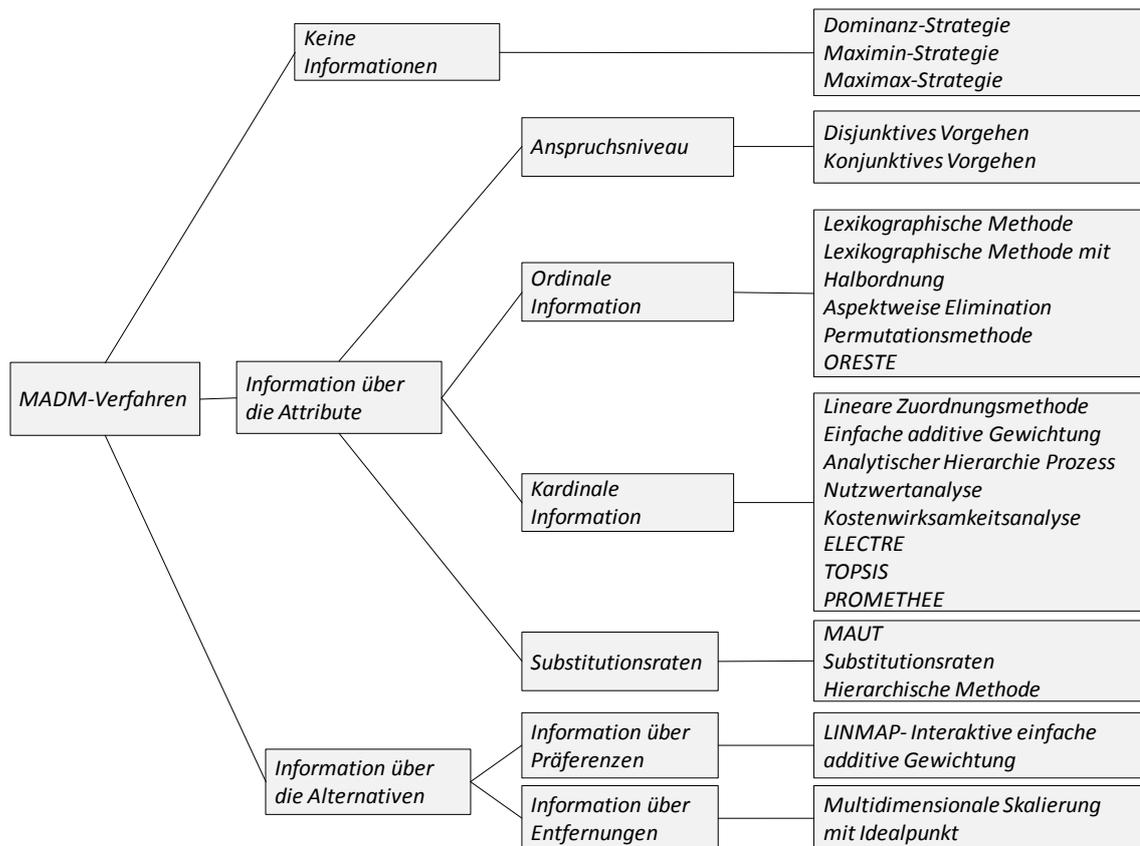


Abbildung 37: Einteilung von MADM-Methoden nach Art der Information (vgl. Götze 2008; Hwang und Yoon 1981)

Für den Fall, dass Informationen zu den einzelnen Attributen vorliegen, kann weiterführend unterschieden werden, ob es sich dabei um Informationen bezüglich des Anspruchsniveaus, um ordinale- oder kardinale Informationen oder um Substitutionsraten handelt. Die Verwendung von Methoden mit Anspruchsniveaus bietet sich an, wenn anhand von Zielgrößenwerten eine Auswahl von akzeptablen sowie nicht-akzeptablen Alternativen vorgenommen werden soll. Sind dagegen skalenbezogene Informationen verfügbar, kann auf die entsprechenden ordinalen und kardinalen Verfahren zurückgegriffen werden. Im Fall von kardinalen Informationen ist es zudem möglich, die Bedeutung der Kriterien in Form von Gewichtungen zum Ausdruck zu bringen. Zudem werden teilweise Kompensationseffekte zwischen den Zielerreichungsgraden bei verschiedenen Attributen zugelassen. Die letzte Gruppe, die der Substitutionsraten, basiert ebenfalls auf Kardinalität und Kompensierbarkeit, bezieht jedoch die Möglichkeit der Verwendung von Substitutionsraten mit ein. Diese bringen zum Ausdruck, auf wie viele Einheiten eines Attributs der Entscheider verzichten würde, um im Gegenzug eine Einheit eines anderen Attributs mehr zu erhalten (vgl. Zimmermann und Gutsche 1991; Götze 2008; Schneeweiß 1991).

Der Anspruch der Planungsmethodik ist es die Bewertung auf mehrere entscheidungsrelevante Kriterien zu stützen. Deren Ausprägungen werden in den vorausgegangenen

Phasen ermittelt, sodass zur Bewertung Informationen über die jeweiligen Attribute vorliegen. Es ergibt sich aufgrund von Kriterien, die essentiell sind für einen Markterfolg (wie etwa die Stückkosten oder die Lieferzeit) die Notwendigkeit, diese mittels einer kardinalen Skala zu erfassen. Aus diesem Grund engt sich die Auswahl der in Frage kommenden Methode auf solche Methoden ein, die Informationen auf einem kardinalen Niveau berücksichtigen können. Neben den in Abbildung 37 explizit genannten Methoden werden ebenso solche mitberücksichtigt, die Substitutionsraten nutzen und ebenfalls Kardinalität aufweisen.

Im Folgenden wird basierend auf dieser ersten Einschränkung der infrage kommenden Bewertungsmethoden eine detailliertere Betrachtung der verbleibenden Methoden vorgenommen. Aufgrund der noch recht großen Vielzahl an Möglichkeiten wird die Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit auf die gängigsten Verfahren beschränkt. Dazu zählen die Nutzwertanalyse¹⁵³ sowie der Analytische Hierarchie Prozess (AHP) als Vertreter der nutzentheoretischen Verfahren sowie ELECTRE und PROMETHEE als Vertreter der Prävalenz- bzw. Outranking-Verfahren. Die einzelnen Methoden werden im Folgenden kurz beschrieben, bevor eine systematische Auswahl einer Bewertungsmethode erfolgt.

5.3.5.2 Nutzentheoretische Verfahren

Die Nutzwertanalyse wird in der Literatur unterschiedlich verwendet. Im deutschen Sprachraum ist sie stark mit der Methode von Zangemeister verbunden (vgl. Zangemeister 1976). Die Nutzwertanalyse stellt eine einfache und leicht zugängliche Methode zur systematischen Strukturierung von Entscheidungsproblemen dar. Sie ist daher in der Praxis auch weit verbreitet (vgl. Oberschmidt 2010). Es handelt sich dabei jedoch nicht um eine spezifische Methode sondern vielmehr um eine Klasse von Methoden, die sich in der Art und Weise unterscheiden, wie die Höhen- und Artenpräferenzen¹⁵⁴ ermittelt werden (vgl. Schneeweiß 1991). Die Nutzwertanalyse erfolgt in der Regel in drei Schritten: Zuerst werden die Alternativen entsprechend der Höhenpräferenz für ein Attribut geordnet. Hierzu wird für jedes Bewertungskriterium j eine Einzelwertfunktion v_j bestimmt, durch die jeder Alternative A_i , für jedes Kriterium C_j ein Nutzwert zugeordnet werden kann. Der Nutzwert ist dabei in der Regel auf ein Intervall von $[0,1]$ normiert, wobei 1 der besten und 0 der schlechtesten Ausprägung entspricht. Anschließend werden die Gewichtungen der Kriterien W_j entsprechend der Artenpräferenz des Entscheiders untereinander bestimmt. Die Kriterien werden hierzu in ihrer Gesamtheit gegenübergestellt und die resultierenden Gewichtungen normiert. Im

¹⁵³ Die multiattributive Nutzentheorie (MAUT) kann ebenfalls diesen Verfahren zugerechnet werden, berücksichtigt jedoch zusätzlich Substitutionsraten. Die Nutzwertanalyse stellt dabei eine vereinfachende Vorgehensweise der MAUT dar (vgl. Nitzsch 1992). Aufgrund dieser Ähnlichkeit soll lediglich die Nutzwertanalyse an dieser Stelle beschrieben werden.

¹⁵⁴ Eine Erläuterung der beiden Präferenzen erfolgt zu Beginn von Kapitel 5.2.2.

letzten Schritt wird der Präferenzindex einer Alternative $\phi^{NWA}(A_i)$ durch die gewichtete Summe der Einzelwerte bestimmt:

$$\phi^{NWA}(A_i) = \sum_{j=1}^c W_j \cdot v_j(A_i) \quad \forall i \in \{1, \dots, a\} \quad (5.1)$$

Das Ergebnis der Gleichung liefert einen Präferenzindex im Intervall $[0,1]$, wobei jene Alternative mit dem höchsten Wert die für den Entscheider vorteilhafteste darstellt (vgl. Götze 2008; Hirzel 2015).

Der Analytische Hierarchieprozess wurde in den 1970er Jahren von Thomas L. Saaty zur Strukturierung und Analyse von komplexen Entscheidungsproblemen entwickelt. Sie kann als spezielle Form der Nutzwertanalyse aufgefasst werden, wobei ihre Besonderheiten in der Bestimmung der Gewichtung und Wertefunktionen liegt. Charakteristisches Merkmal des AHP stellt der hierarchische Aufbau und der paarweise Vergleich von Elementen dar. Der hierarchische Aufbau erfolgt durch die Dekomposition des zumeist abstrakten Oberziels in Unterziele, die je nach Komplexität weiter detailliert werden können. Die Unterziele werden letztlich in Kriterien und ggf. in Unterkriterien aufgeteilt die auf der untersten Ebene mit entsprechenden Alternativen verbunden sind (vgl. Zimmermann und Gutsche 1991; Saaty 1980; Schneeweiß 1991).

Zur Bestimmung einer geeigneten Alternative bzw. zur Lösung des Entscheidungsproblems erfolgt ein paarweiser Vergleich zwischen Elementen innerhalb einer Hierarchieebene bzgl. eines Elements bzw. Kriteriums der zugehörigen übergeordneten Hierarchieebene. Für den Vergleich wird von Reziprozität für die Vergleichswerten ausgegangen. Er erfolgt anhand einer 9-Punkte Skala nach Saaty, die eine Beschreibung der relativen Bedeutung einer Alternative ermöglicht. Die Ergebnisse in Bezug auf ein übergeordnetes Element lassen sich in Form einer Paarvergleichsmatrix zusammenfassen. Die Bestimmung einer solchen Matrix für eine Ebene bedingt bei n Elementen entsprechend $n(n-1)/2$ Vergleiche. Die Ableitung der Gewichtung kann anhand der Eigenvektormethode nach Saaty erfolgen, die auf den Eigenvektoren der Paarvergleichsmatrizen beruht. Die Bewertung der Alternativen erfolgt letztlich durch additive Aggregation der einzelnen Zielerreichungsgrade analog zur Nutzwertanalyse (vgl. Schneeweiß 1991; Götze 2008; Geldermann 2006).

Die Vorteile dieser Methode liegen in der vereinfachenden und strukturierten Abbildung komplexer Probleme aufgrund der hierarchischen Struktur. Zudem können sowohl quantitative als auch qualitative sowie unsichere Informationen verarbeitet werden. Kritisiert wird das Verfahren aufgrund des relativ hohen Aufwands durch die paarweisen Vergleiche. Zudem wird teilweise die Annahme der Reziprozität in diesem Kontext als fehlerhaft angesehen, da unzulässige Annahmen zum Skalenniveau getroffen werden (vgl. Zimmermann und Gutsche 1991). Außerdem kann die Verwendung anderer Skalen als die 9-Punkt-Skala bei ansonsten gleichem Lösungsweg zu anderen Ergebnissen führen (vgl. Geldermann 2006).

5.3.5.3 Prävalenzverfahren

Die Prävalenzverfahren legen im Gegensatz zu den nutzentheoretischen Verfahren einen größeren Fokus auf die Entwicklung, Diskussion und Interpretation des Entscheidungsproblems im Laufe des Entscheidungsprozesses. Sie zielen somit nicht auf die Bestimmung einer optimalen Alternative ab sondern vielmehr auf eine problemadäquate Entscheidungshilfe, um einige vorteilhafte Alternativen zu identifizieren.¹⁵⁵ Ein wesentliches Kennzeichen dieser Verfahren stellt die Annahme dar, dass keine objektiv-optimale Lösung und auch kein stabiler, exakt erfassbarer Entscheidungskontext für den Entscheidungsträger existieren. Die sogenannten Outranking-Verfahren ziehen zur Bewertung jeweils nur zwei Alternativen zeitgleich heran, im Gegensatz zu dem AHP etwa, bei dem alle Alternativen betrachtet werden müssen. Die Prävalenzverfahren erlauben es zudem Unvergleichbarkeiten zwischen Alternativen zu betrachten, wodurch der Informationsverlust durch die Kompensation gegenläufiger Kriterienausprägungen vermieden wird (vgl. Figueira et al. 2013; Hirzel 2015; Geldermann 2006).

Zu den am weitesten verbreiteten Outranking-Methoden gehören *PROMETHEE* (Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations) und *ELECTRE* (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité). Letztere wurde in den 1960er Jahren von Bernard Roy entwickelt. Die Methode wurde seitdem stetig erweitert, sodass es sich heute eher um eine Methoden-Familie¹⁵⁶ handelt. Mittels *ELECTRE* werden durch den paarweisen Vergleich von Alternativen sogenannte Outranking-Relationen bestimmt. Diese beschreiben inwiefern sich die Alternativen untereinander dominieren. Ein wesentliches Mittel hierzu stellen die Konkordanz- und Diskordanzbeziehungen dar. Das Ergebnis der Methode ist eine Menge nichtdominierter Alternativen (vgl. Zimmermann und Gutsche 1991; Hirzel 2015).

Die Vorteile der *ELECTRE*-Verfahren liegen in der Verarbeitung von sowohl quantitativen als auch qualitativen Kriterien auf einer heterogenen Skala, die Berücksichtigung von Unwissenheit und Willkür sowie in der Nutzung von Veto-Schwellen. Zudem soll hier nochmals auf die Eigenschaft der Methode hingewiesen werden, dass keine Kompensation von gegenläufigen Kriterien stattfindet. Als Nachteilig wird das Auftreten von Rangumkehrungen und intransitiven Rangfolgen erachtet. Zudem wird, speziell im Vergleich mit *PROMETHEE*, auf die schlechtere Transparenz und Nachvollziehbarkeit hingewiesen (vgl. Figueira et al. 2013; Oberschmidt 2010).

Die *PROMETHEE*-Methode wurde in den 1980er Jahren von Jean-Pierre Brans entwickelt. Wie auch schon bei den *ELECTRE*-Methoden handelt es sich nicht um eine Me-

¹⁵⁵ Dieser Grundgedanke deckt sich mit den Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Gesamtplanungsmethodik dieser Arbeit.

¹⁵⁶ Für eine detaillierte Übersicht zu den bestehenden *ELECTRE*-Methoden sei an dieser Stelle auf Figueira et al. 2013 verwiesen.

thode sondern vielmehr um eine Methoden-Familie. Die prominentesten Verfahren stellen PROMETHEE I und PROMETHEE II dar. Beide Verfahren unterscheiden nach der Art der Ordnung, die erzielt werden kann. Im Fall von PROMETHEE I wird eine partielle Präordnung erstellt. Diese ermöglicht es neben den Präferenzen und Indifferenzen auch Unvergleichbarkeiten darzustellen¹⁵⁷. Durch das Verfahren PROMETHEE II kann die partielle Präordnung in eine vollständige Präordnung¹⁵⁸ überführt werden, die letztlich in einer eindeutige Rangfolge der Alternativen resultiert. Die PROMETHEE-Methode ermöglicht es somit nicht nur eine strikte Präferenz oder Indifferenz zu äußern, sondern auch unscharfe, abgestufte Präferenzeinschätzungen vorzunehmen und zusätzlich Präferenzschwellen für diese mit einzubeziehen, um Unsicherheiten zu berücksichtigen. Die Präferenzen des Entscheiders sollen somit in einer möglichst natürlicheren Art und Weise wiedergegeben werden (vgl. Götze 2008; Zimmermann und Gutsche 1991). Durch den erweiterten Präferenzbegriff wird eine eingeschränkte Kompensationsmöglichkeit geschaffen. Dabei können die schlechten Erfüllungsgrade eines Kriteriums nicht durch Gute eines anderen kompensiert werden, was zumeist auch nicht der Präferenz des Entscheiders entspricht (vgl. Geldermann 2006). PROMETHEE wird daher als geeignete Methode gesehen, wenn eine Kompensation von Kriterien vermieden und gleichzeitig möglichst viele Informationen erhalten bleiben sollen. Weiterhin stellt sie ein einfaches Verfahren dar, das auch von Nicht-Spezialisten verwendet werden kann. Der Rechenaufwand hält sich zudem in Grenzen (vgl. Le Teno und Mareschal 1998; Götze 2008). Als Nachteilig wird der Umgang mit qualitativen Variablen gesehen, da die Messung der Ausprägungen meist auf kardinalen Niveau erfolgt, wodurch die Einbeziehung qualitativer Attribute eingeschränkt ist (vgl. Götze 2008). Zudem wird darauf hingewiesen, dass die Nutzung von ordinalen Informationen nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist. Es lassen sich jedoch zahlreiche Beispiele finden, bei denen im Rahmen der Entscheidungsfindung eine Überführung von qualitativen Kriterienausprägungen in quantitative stattgefunden hat (vgl. Keyser und Peeters 1996; Hirzel 2015).

5.3.5.4 Systematische Auswahl einer problemadäquaten Bewertungsmethode

Im vorherigen Unterkapitel wurden unterschiedliche Methoden zur multikriteriellen Bewertung kurz erläutert. Dabei hat sich gezeigt, dass es nicht eine bestgeeignete MADM-Methode gibt, sondern dass deren Vorteilhaftigkeit sehr stark vom Problemkontext abhängig ist. Aus diesem Grund wird in diesem Unterkapitel auf systematischem

¹⁵⁷ Eine Unvergleichbarkeit liegt dann vor, wenn bei einem paarweisen Vergleich zweier Alternativen sowohl der Ausgangsfluss als auch der Eingangsfluss einer Alternative größer oder kleiner ist, als bei der anderen Alternative. Eine genaue Erläuterung von Eingangs- und Ausgangsflüssen erfolgt im späteren Verlauf der Arbeit in Kapitel 6.1.2.

¹⁵⁸ Die vollständige Präordnung erfolgt dabei durch die Aggregation der zuvor bestimmten Eingangs- und Ausgangsflüsse zu einem Nettofluss. Eine genaue Erläuterung hierzu erfolgt im späteren Verlauf der Arbeit in Kapitel 6.1.2.

Wege die problemspezifische Auswahl einer adäquaten Methode vorgenommen. Als Orientierung dient das systematische Vorgehen von Guitouni & Martel (vgl. Guitouni und Martel 1998). Deren Konzept umfasst insgesamt sieben Schritte anhand derer die bestehenden Anforderungen an eine Methodik mit den spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen MADM-Methoden systematisch verglichen werden können. Da bereits eine gewisse Eingrenzung möglicher Methoden stattgefunden hat, sind an dieser Stelle nicht alle Schritte des Verfahrens relevant und die Auswahl beschränkt sich auf die folgenden vier Bereiche:

- (1) Die Präferenzen des Entscheidungsträgers
- (2) Die Art des Entscheidungsproblems
- (3) Die Art der Informationen
- (4) Die Art der Kriterien

(1) Die Berücksichtigung der Präferenzen des Entscheiders betrifft aus methodischer Sicht vier Bereiche: Die Art ihrer Angabe, den Zeitpunkt zu dem sie berücksichtigt werden, die Präferenzstruktur und die daraus resultierende Anordnung der Alternativen. Die Art der Angabe kann dabei direkt erfolgen, über Tradeoffs oder durch paarweisen Vergleich. Zur Angabe der Präferenzstruktur können folgende fünf binären Relationen verwendet werden (vgl. Roy 1991).

- | | |
|---------|--|
| $a I b$ | <u>Indifferenz-Situation:</u>
a ist indifferent zu b |
| $a P b$ | <u>Präferenz-Situation:</u>
a wird b strikt vorgezogen |
| $a Q b$ | <u>Schwache-Präferenz-Situation:</u>
a wird als mindestens so gut wie b eingeschätzt |
| $a R b$ | <u>Unvergleichbarkeit:</u>
a und b sind unvergleichbar |
| $a S b$ | <u>Outranking Relation:</u>
a ist mindestens so gut wie b und es gibt keinen Grund dem zu widersprechen |

Die Verwendung unterschiedlicher Präferenzstrukturen schlägt sich letztlich auch in der Anordnung der Alternativen nieder. Bei einer vollständigen Präordnung werden die Alternativen in eine strikte Anordnung gebracht, während bei einer partiellen Anordnung Unvergleichbarkeiten mit einbezogen werden.

(2) Nach der Art des Entscheidungsproblems lassen sich drei Arten von Entscheidungen unterteilen (vgl. Roy 1980): Die Selektion der besten Alternativen (α -Entscheidung), das Sortieren in unterschiedliche Klassen (β -Entscheidung) sowie die Ordnung der untersuchten Alternativen (γ -Entscheidung).

(3) Die Art der Informationen, die von einer Methode verarbeitet werden können, lassen sich in ordinale- und kardinale Informationen unterteilen. Zudem kann entsprechend der Eigenschaft der Informationen in deterministische und nicht deterministische Verfahren unterschieden werden.

(4) Der vierte Punkt adressiert den Umgang mit Kriterien innerhalb einer Methode. Hierbei wird betrachtet, ob es die Möglichkeit zur Berücksichtigung unterschiedlicher Präferenzintensitäten für ein Kriterium gibt. Diese kann absolut (binär) oder nicht-absolut erfolgen. Zudem wird betrachtet, ob eine Methode die Kompensation von unterschiedlichen Kriterienausprägungen zulässt. Dabei kann es zu keiner Kompensation kommen, zu einer teilweisen oder zu einer vollständigen Kompensation.

Basierend auf dieser Kategorisierung können die Anforderungen an eine geeignete Methode in den einzelnen Bereichen wie folgt definiert werden:

- Die MADM-Methode sollte dem Ziel dienen, den Entscheider bei der Strukturierung der verfügbaren Alternativen zu unterstützen. Der Fokus der Methode sollte daher auf der Erstellung einer Ordnung von Alternativen liegen, womit es sich um eine γ -Entscheidung handelt.
- Die Angabe der Präferenzen des Entscheiders sollte auf Basis paarweisen Vergleichs erfolgen. Dieser erleichtert die Bewertung und verringert die Komplexität für den Entscheider. Neben der Berücksichtigung von Indifferenz und Präferenz stellt zusätzlich auch die Berücksichtigung von Unvergleichbarkeiten eine Grundanforderung an die Methodik dar. Zudem soll es ermöglicht werden Präferenzintensitäten nicht nur absolut zu betrachten.
- Die Anforderung nach Unvergleichbarkeit führt gleichzeitig auch dazu, dass der Informationsverlust aufgrund totaler Kompensation vermieden werden bzw. die Informationen erhalten bleiben sollen. An dieser Stelle besteht ein gewisser Konflikt zwischen diesem Anspruch auf der einen Seite und dem Bedürfnis einer möglichst einfachen Lösungsdarstellung auf der anderen Seite. Somit besteht die gleichzeitige Anforderung zur Bildung einer partiellen und einer vollständigen Präordnung.
- Die im Kontext dieser Arbeit zu verarbeitenden Informationen bedingen den Einbezug von sowohl quantitativen als auch qualitativen Daten. Die Methode muss daher in der Lage sein, ordinale und kardinale Informationen zu berücksichtigen. Zudem ist das vorliegende Entscheidungsproblem zwar durch multiple Unsicherheiten gekennzeichnet, dennoch sollen die Informationen, die sich aus der vorgelagerten Simulation ergeben, als deterministisch angenommen werden.¹⁵⁹

¹⁵⁹ *Den bestehenden Unsicherheiten ist durch geeignete Maßnahmen entsprechend an anderer Stelle Rechnung zu tragen (z. B. durch Szenarien und/oder Sensitivitäten).*

Auf Grundlage der geschilderten Kategorisierung, werden in Tabelle 13 die zuvor beschriebenen MADM-Verfahren in Bezug auf die methodischen Anforderungen dieser Arbeit miteinander verglichen.

Der Vergleich der definierten Anforderungen mit den Merkmalen der Methoden offenbart, dass keine den Anforderungen gänzlich gerecht wird. Die Prävalenzverfahren erfüllen jedoch die meisten Kriterien. Weiterhin bietet sich die Möglichkeit, durch die Verbindung von PROMETHEE I und II sowohl Unvergleichbarkeiten zu berücksichtigen als auch eine vollständige Präordnung zu erstellen. Im direkten Vergleich zwischen ELECTRE und PROMETHEE wird letzterer zudem eine höhere Transparenz und bessere Verständlichkeit zugesprochen. Unscharfen Präferenzvorstellungen und Unsicherheiten in den Kriterienausprägungen kann durch die Verwendung verallgemeinerter Präferenzfunktionen in einfacher Weise Rechnung getragen werden (vgl. Oberschmidt 2010). Aufgrund des hohen Stellenwertes dieser zwei Aspekte im Rahmen der Arbeit wird zur Bewertung der Produktionsstrategien auf das PROMETHEE-Verfahren zurückgegriffen.

Tabelle 13: Differenzierungsmerkmale unterschiedlicher MADM-Methoden

	1. Präferenzen des Entscheiders		2. Art des Entscheidungsproblems	3. Informationen		4. Art der Kriterien	
	Angabe der Präferenzen	Präferenzstruktur	Präordnung	Ordinal	Kardinal	Präferenzstärke	Kompen-sation
Nutzwertanalyse	Diekt	{ P, I }	Vollständig		✓	Absolut	Total
AHP	Paarweiser Vergl.	{ P, I }	Vollständig		✓	Absolut	Partiell
MAUT	Tradeoff	{ P, I }	Vollständig		✓	Absolut	Partiell
ELECTRE I	Paarweiser Vergl.	{ S, R }	Partiell	✓	✓	Nicht-Absolut	Partiell
ELECTRE II	Paarweiser Vergl.	{ S, R }	Partiell	✓	✓	Nicht-Absolut	Partiell
PROMETHEE I	Paarweiser Vergl.	{ P, I, R }	Partiell	✓	✓	Nicht-Absolut	Partiell
PROMETHEE II	Paarweiser Vergl.	{ P, I }	Vollständig	✓	✓	Nicht-Absolut	Partiell

α = Selektion der besten Alternative
 β = Sortieren in Klassen
 γ = Ordnung der untersuchten Alternativen
 P = Präferenz
 I = Indifferenz
 R = Unvergleichbarkeit
 S = Outranking-Relation

5.4 Zusammenfassung der methodischen Ausgestaltung der Planungsmethodik

In diesem Kapitel wurde auf Grundlage bestehender Defizite bei der strategischen Planung der Produktion für den jungen Markt für LiB die Notwendigkeit einer Planungsmethodik definiert, die dies ermöglichen soll. Auf Grundlage der Defizite wurden Implikationen für die Planung im jungen Markt für LiB abgeleitet und Anforderungen an eine entsprechende Planungsmethodik definiert. Deren Zweck ist es, den Planer bei der Entscheidung für eine Produktionsstrategie zu unterstützen. Die Planungsmethodik überführt daher das Entscheidungsproblem in ein Entscheidungsmodell, das relevante Informationen zusammenführt und den Planer bei der komplexen Entscheidung für eine Produktionsstrategie unterstützt. In den vorangegangenen Unterkapiteln wurden die zentralen Komponenten eines Entscheidungsmodells beschrieben und diesen adäquate Methoden zugeordnet entsprechend der definierten Anforderungen, die sich aus dem dieser Arbeit zugrundeliegenden Planungsproblem ergeben. Die einzelnen Komponenten des Entscheidungsmodells sowie die entsprechende Auswahl passfähiger Methoden stellen die Lösung der anfangs formulierten Forschungsfrage 2 dar und sind in Abbildung 38 nochmals zusammenfassend dargestellt.

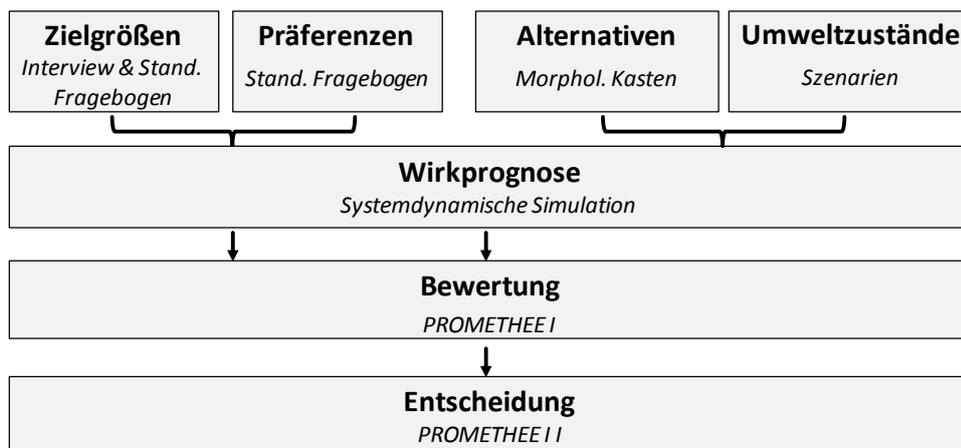


Abbildung 38: Methodische Ausgestaltung der Planungsmethodik und der Komponenten des Entscheidungsmodells

Die Erfassung der für den Planer relevanten Zielgrößen erfolgt auf Grundlage eines Interviews, das von einem standardisierten Fragebogen flankiert wird. Ebenfalls auf Basis des Fragebogens werden dessen Präferenzen erfasst. Für die strukturierte und systematische Konzeption von alternativen Produktionsstrategien bietet sich die Auswahl mit Hilfe eines morphologischen Kastens an. Die globale Umwelt und deren Entwicklung soll über Szenarien abgebildet werden. Für den Planer relevante Aspekte des Wettbewerbsumfeldes sowie dessen Entwicklung werden dagegen wiederum im Rahmen des Interviews und Fragebogens erhoben. Generelle Entwicklungen des Wettbewerbsumfeldes, wie z. B. die Entwicklung der Preise für LiB werden auf Basis von Sekundärliteratur ermittelt. Die Wirkprognose erfolgt mit Hilfe systemdynamischer Modellie-

Die Simulation bietet den Vorteil, die Konsequenzen von alternativen Entscheidungen und Umweltentwicklungen auf das Produktionssystem und die Zielgrößen abzubilden. Die Bewertung der einzelnen Strategien erfolgt letztlich mittels des MADM-Verfahrens PROMETHEE I durch die Anordnung der einzelnen Strategiealternativen in eine partielle Rangordnung. Dieser Schritt ermöglicht es etwaige Unvergleichbarkeiten aufzuzeigen. Daran anschließend wird mit Hilfe von PROMETHEE II eine vollständige Rangordnung hergestellt, die dem Entscheider die vorteilhafteste Produktionsstrategie in vereinfachter Weise aufzeigt. Aufgrund der sequentiellen Anwendung von PROMETHEE I und II bleiben die relevanten Kriterienausprägungen erhalten, wodurch gleichzeitig der Anspruch nach Transparenz gewahrt wird.

6 Methodische Kombination von System Dynamics und PROMETHEE

Im vorherigen Kapitel wurde auf Grundlage des bestehenden Planungsproblems eine entsprechende Planungsmethodik konzeptioniert und methodisch ausgestaltet, mit der das Entscheidungsproblem für eine Produktionsstrategie in ein problemadäquates Entscheidungsmodell überführt werden kann. Den methodischen Schwerpunkt und Kern des Entscheidungsmodells bilden die Phasen der Wirkprognose und der Bewertung. Aufgrund ihres zentralen Stellenwertes für diese Arbeit werden in diesem Kapitel die Simulationsmethode System Dynamics und das MADM-Verfahren PROMETHEE nochmals eingehender beschrieben. Zudem wird ein Überblick über bereits bestehende Modelle im thematischen und methodischen Kontext dieser Arbeit gegeben. Der Fokus liegt dabei auf solchen, die auf einer methodischen Kombination von System Dynamics und MADM-Verfahren bzw. PROMETHEE beruhen. Abschließend wird aufgrund identifizierter Defizite und Probleme die Notwendigkeit einer integrierten und kontinuierlichen Bewertung formuliert und ein entsprechendes Vorgehen hierzu entwickelt.

6.1 Grundlagen der Kernmethoden

Die prinzipiellen Eigenschaften und Anwendungsbereiche von System Dynamics und PROMETHEE wurden bereits in Kapitel 5.3.4 bzw. Kapitel 5.3.5 erläutert. Nachdem beide Methoden als wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit zur Wirkprognose und Bewertung ausgewählt wurden, sollen in diesem Unterkapitel ergänzend die methodischen Grundlagen von SD und PROMETHEE beschrieben werden.

6.1.1 Grundlagen der Modellierung mit System Dynamics

Den Ausgangspunkt für die Erstellung eines Simulationsmodells bildet in der Regel das Vorliegen eines Problems, das es zu lösen gilt. Die Modellentwicklung verfolgt dabei das Ziel, einen vereinfachten Ausschnitt des für die Problemstellung relevanten Realitätsausschnitts zu konstruieren.¹⁶⁰

Das auf der problemrelevanten Abstraktion der Realität basierende Modell wird anschließend für Simulationsanalysen genutzt und die daraus gewonnenen Erkenntnisse an der Realität geprüft. Ist die generierte Lösung zufriedenstellend, kann der Modellentwicklungszyklus abgeschlossen werden. Ist dies nicht der Fall, wird das Modell revidiert. Die Modellentwicklung kann daher als iterativer Prozess aufgefasst werden (vgl. Strohhecker 2008).

¹⁶⁰ In diesem Kontext wird entsprechend von der Erstellung eines homomorphen Modells ausgegangen, vgl. hierzu Kapitel 5.2.1.

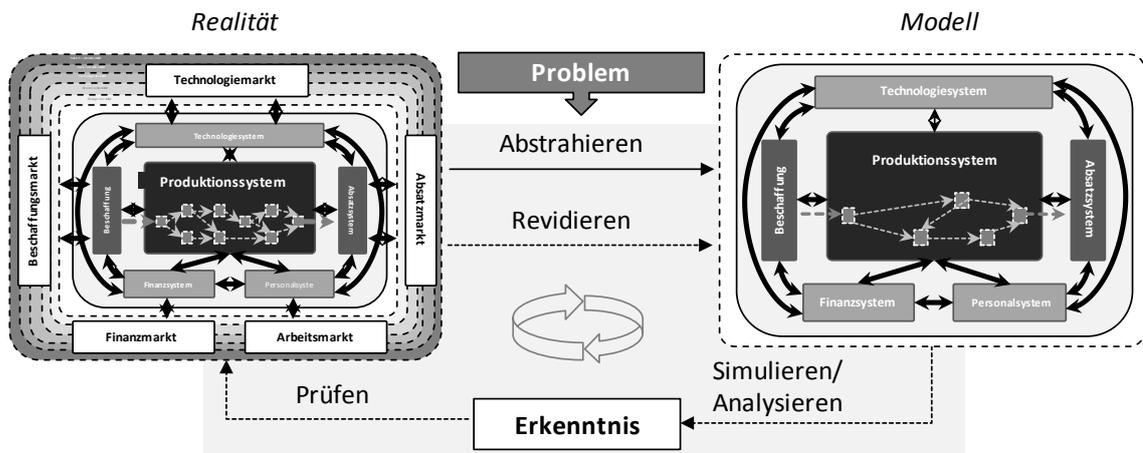


Abbildung 39: Grundlegendes Schema eines Modellierungsprozesses (in Anlehnung an Strohhecker 2008)

Dem geschilderten Modellierungsprozess liegt die Modellierung mit System Dynamics (SD) zugrunde, was elementar für die Lösung eines Problems ist. SD versteht sich als ganzheitliche Methode zur Lösung von dynamisch-komplexen Problemen, weshalb der Modellierungsprozess umfassender ist. Neben der Modellierung und Simulation stehen bei SD die Generierung eines Problemverständnisses sowie der damit einhergehende Lernprozess durch die Simulation und Analyse von Problemlösungsstrategien im Mittelpunkt (vgl. Strohhecker 2008). Entsprechend lässt sich der Modellierungsprozess mit System Dynamics wie folgt darstellen:

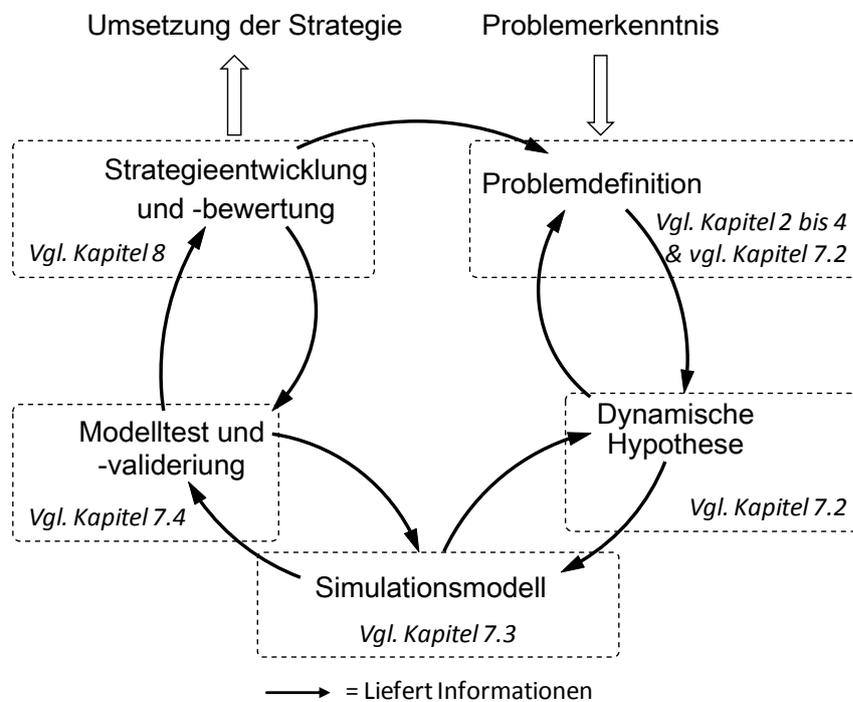


Abbildung 40: Iterativer Modellierungsprozess für systemdynamische Simulationsmodelle (in Anlehnung an Strohhecker 2008)

Der Modellierungsprozess mit System Dynamics umfasst somit insgesamt fünf Phasen, die auch dem in dieser Arbeit entwickelten Simulationsmodell zugrundeliegen. Die Verortung in den jeweiligen Kapiteln ist ebenfalls aus Abbildung 40 zu entnehmen.

Problemdefinition: Die Problemdefinition gilt als elementare Phase der Modellentwicklung. Ihr Ziel ist die Identifizierung des zugrundeliegenden Problems sowie die Beschreibung des problematischen Verhaltens des Realsystems. Dadurch soll sichergestellt sein, dass ein Modell problem- und zielbezogen entwickelt wird und die Systemgrenzen adäquat festgelegt werden. Entsprechend werden erste Schlüsselvariablen und der zu betrachtende Zeithorizont abgeleitet. Deren Verhalten oder das des gesamten Systems wird in einem Referenzmodus abgebildet, der das dynamische Verhalten in der Zukunft abbilden soll. Der Wahl der Systemgrenzen liegt die Prämisse zugrunde, das dynamische Systemverhalten möglichst auf Basis endogener Einflüsse zu beschreiben. Entsprechend sollte die Anzahl exogener Einflüsse möglichst gering gehalten werden.¹⁶¹ Die Systemgrenzen sind entsprechend solange zu erweitern, bis das Problem systemendogen abgebildet werden kann (vgl. Sterman 2000).

Dynamische Hypothese: Zur Beschreibung des Systemverhaltens werden dynamische Hypothesen gebildet. Sie dienen der Erklärung eines Problems basierend auf Thesen bezüglich des problematischen dynamischen Verhaltens des Systems. Mit Hilfe von Kausaldiagrammen werden alle relevanten Systembestandteile und Rückkopplungen der Systemstrukturen erfasst und abgebildet. Diese qualitative Abbildung ermöglicht es im Falle von ex post Analysen Erkenntnisse über die Entstehung eines Problems zu gewinnen sowie im Falle einer ex ante Analyse Aussagen über die mögliche Entstehung eines Problems bzw. die zukünftige Entwicklung eines System zu treffen (vgl. Sterman 2000).¹⁶²

Simulationsmodell: Die bisherigen Schritte haben vorrangig dazu gedient, das Verständnis für das dynamische Problem sowie dessen Transparenz und Kommunizierbarkeit zu verbessern. Im dritten Schritt werden nun die Systembestandteile und Wirkbeziehungen des qualitativen Kausaldiagramms formalisiert. Hierzu werden diese in sogenannte Bestands- und Flussgrößen überführt, wodurch eine Beschreibung der qualitativen Systemstruktur durch ein Differentialgleichungssystem mit Parametern und Anfangswerten erfolgt. Die Parametrisierung von Konstanten sowie die Initialisierung der Variablen sind somit ebenfalls Bestandteile dieser Phase (vgl. Sterman 2000; Lerch 2015). Liegt der Fokus des Simulationsmodells auf der ex ante Analyse, wie es bei der strategischen Planung der Produktion der Fall ist, wird es als sinnvoll erachtet, Modelle auf

¹⁶¹ *Ein Austausch mit der Umwelt ist über die Systemgrenzen nach wie vor möglich. Die externen Variablen werden hierbei jedoch nicht von dem internen dynamischen Verhalten beeinflusst (vgl. Milling 1984).*

¹⁶² *Eben diese qualitative Darstellung der endogen erklärenden Systemstruktur anhand von Kausaldiagrammen wird in Abbildung 35 unter „Qual. System Dynamics“ dargestellt.*

Basis strategischer Gesetzmäßigkeiten zu entwickeln. Dabei kann es sich z. B. um plausible oder empirisch belegte Hypothesen wie Erfahrungskurveeffekte oder Lebenszyklen handeln (vgl. Adam 1996; Wansart 2012).

Modelltest und Validierung: Ziel dieser Phase ist die Überprüfung der Modellgültigkeit. Aufgrund des Verwendungszwecks des Modells zur strategischen Entscheidungsunterstützung, kommt diesem Aspekt der Modellierung eine bedeutsame Rolle zu. Die bei der Überführung eines schlecht strukturierten Realsystems in ein Simulationsmodell zusammenhängenden Notwendigkeit zu dessen Vereinfachung, kann zu einem fehlerhaften Abbild des realen Systemverhaltens führen (vgl. Law und Kelton 2000). Abgesehen von Fehlern, die auf dieser strukturellen Abweichung zum Realsystem basieren, müssen auch etwaige Messfehler am realen System in Betracht gezogen werden. Diese können ebenfalls zu Abweichungen von Modellwerten führen. Der Grad der Übereinstimmung von Realsystem und Modell kann daher nicht als Maßstab für eine Validierung dienen. Vielmehr muss sichergestellt sein, dass das reale System zweckdienlich abgebildet wird. Entsprechend muss die Beurteilung der Güte eines Modells stets im Kontext von dessen Form und Anwendungsbereich geschehen (vgl. Größler 2008). Insbesondere in Fällen, in denen das Realsystem keine Vergleichsdaten liefern kann, erfolgt die Validierung direkt am Modell. Die Systemstruktur ist dabei für die Wirkprognose von großer Bedeutung, da sie das Systemverhalten und somit das Ergebnis der Simulation bestimmt. Entsprechend stellt die Strukturvalidität einen zentralen Aspekt für die Zweckmäßigkeit des Modells dar. Zudem ist die Validität der verwendeten Parameter ein weiterer Untersuchungsgegenstand. Letztlich sollte die Verhaltensvalidierung des Modells, im Sinne der Überprüfung der Plausibilität von Ergebnissen unter Extrembedingungen, ebenfalls Bestandteil dieser Phase sein (vgl. Kleine 2013).

Strategieentwicklung und -bewertung: Gegenstand dieser Phase ist die Anwendung des Modells im Rahmen von Simulationsstudien. Durch die Simulation von Strategien wird versucht, jene zu identifizieren, die das Modellverhalten in einer Weise beeinflussen, dass das in Phase 1 definierte Problem des Entscheiders in adäquater Weise gelöst wird. Hierzu werden unterschiedliche Szenarien im Sinne von „Was-wäre-wenn“-Analysen durchgeführt. Hierbei wird das aus der Interaktion von Umweltzuständen und Handlungsalternativen resultierende Systemverhalten analysiert und die alternativen Strategien diesbezüglich bewertet. Dabei ist stets darauf zu achten, dass die Strategien und die evtl. veränderte Modellstruktur sich auch im realen System umsetzen lassen (vgl. Sterman 2000; Lerch 2015).

Die Erstellung von Kausal- sowie Bestands- und Flussdiagrammen stellen wesentliche Instrumente von System Dynamics dar, die explizit Gegenstand einzelner Phasen der Modellierung sind. Auch wenn aufgrund der sequentiellen Struktur des Modellierungsprozesses der Eindruck entstehen könnte, dass beide Diagramme nacheinander entwickelt werden, so werden diese in der Regel eher simultan und iterativ erstellt (vgl. Wolstenholme 1994). Im Folgenden wird kurz auf die Funktionsweise dieser Instrumente eingegangen.

Kausaldiagramme: Kausaldiagramme werden zur Formulierung der dynamischen Hypothese verwendet. Ferner können sie ohne weitere Spezifizierung oder Quantifizierung der Modellkomponenten dafür genutzt werden, eine qualitative Aussage über das Systemverhalten zu treffen. Mit Hilfe von Kausaldiagrammen können somit durch die Abbildung der wesentlichen Kausalbeziehungen und Wirkverzögerungen zwischen den einzelnen Schlüsselvariablen die Rückkopplungsstrukturen in einem komplexen System visualisiert werden (vgl. Strohhecker 2008; Schröter 2006). Einen wesentlichen Bestandteil von Kausaldiagrammen bilden die Schlüsselvariablen, die über Pfeile miteinander verbunden sind. Die Pfeile gehen dabei von der Quelle, der unabhängigen Variablen, zu der abhängigen Variablen, welche als Senke fungiert. Ist der Pfeil dabei mit einem Minuszeichen versehen, bedeutet dies, dass der Wert der abhängigen Variablen sinkt, wenn der der unabhängigen Variablen steigt. Ist indes der Pfeil mit einem Pluszeichen versehen, bedeutet dies im Umkehrschluss, dass beide im Wert steigen oder fallen. Wird der Pfeil zudem von zwei parallelen Linien durchzogen, liegt in diesem Schritt eine zeitliche Wirkverzögerung vor (vgl. Schröter 2006; Sterman 2000). In Abbildung 41 ist ein zu dem Kontext dieser Arbeit passendes Beispiel für ein Kausaldiagramm dargestellt.

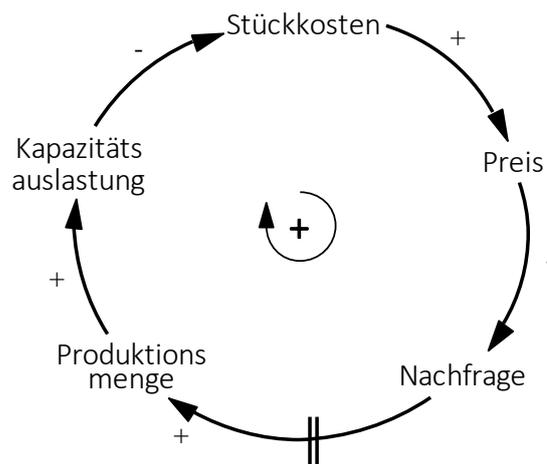


Abbildung 41: Beispielhafte Darstellung eines Kausaldiagramms (vgl. Strohhecker 2008)

Das Kausaldiagramm liest sich demnach wie folgt: Mit steigenden Stückkosten steigt der Preis, wodurch sich die Nachfrage verringert. Mit einer verringerten Nachfrage geht mit zeitlicher Verzögerung auch eine Reduzierung der Produktionsmenge einher, wodurch es zu einer Reduzierung der Kapazitätsauslastung kommt. Eine geringere Auslastung führt wiederum zu erhöhten Stückkosten. Der Regelkreis ist somit selbstverstärkend, was durch ein Plus in der Mitte des Kreises zum Ausdruck gebracht wird. Ein Minuszeichen würde einen zielsuchenden Regelkreis ausweisen, der gegen einen Wert konvergiert.

Bestands- und Flussgrößen-Diagramm: Für die Problemstrukturierung stellen Kausaldiagramme ein geeignetes Hilfsmittel dar. Die Erstellung eines simulationsfähigen quantitativen Modells erfordert jedoch die Transformation in ein Bestands- und Flussgrößen-

Diagramm (vgl. Sterman 2000). Diesem kommt die Aufgabe zu, das System mathematisch in hinreichender symbolischer Form zu definieren (vgl. Kleine 2013). Grundlegende Elemente stellen hierbei die Bestands-, Fluss- und Hilfsvariablen sowie Informationsverbindungen zwischen den Variablen dar (vgl. Sterman 2000). Bei der Notation in Abbildung 42 stellen die Zufluss- und Abflussrate Flussgrößen dar. Sie werden durch einen Pfeil mit doppelter Linie und Ventil gekennzeichnet. Informationsflüsse werden dagegen durch einen einfachen gebogenen Pfeil symbolisiert. Als Rechtecke werden letztlich die Bestands- bzw. Zustandsvariablen dargestellt, die durch die Flussvariablen verändert werden.

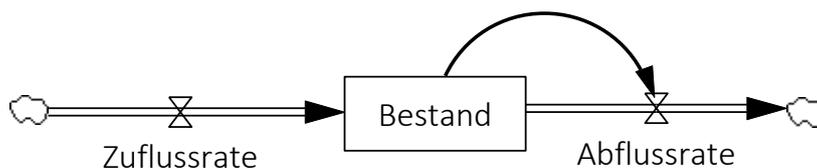


Abbildung 42: Notation eines Bestands- und Flussgrößen-Diagramms

Die mathematische Beschreibung von Modellen in System Dynamics erfolgt durch gewöhnliche Differentialgleichungen erster Ordnung, wobei die Zeit t die einzige unabhängige Variable darstellt (vgl. Sterman 2000; Kleine 2013). Abbildung 42 ist somit gleichbedeutend mit folgendem Gleichungssystem:

$$B(t) = B(0) + \int_0^t \frac{dB(t)}{dt} dt = B(0) + \int_0^t [Z(t) - A(t)] dt \quad (6.1)$$

mit:

B : Bestandsvariable Z : Zuflussrate von B A : Abflussrate von B t : Zeit

Die Lösung solcher Gleichungssysteme auf analytischem Wege ist in der Regel äußerst schwierig und nur in wenigen Ausnahmen, wie etwa bestimmten linearen Systemen, möglich. Eine numerische Approximation im Rahmen von Simulationsmodellen ist dagegen fast immer durchführbar (vgl. Bossel 2004; Kunath 2009). Durch die Überführung der mathematischen Beschreibung des Modells in eine Simulationssoftware¹⁶³ kommt es zu einer äquivalenten Umformulierung des Gleichungssystems in eine EDV-Notation. Im Falle der Software Vensim wird das Gleichungssystem in folgende Form überführt:

$$B(t) = B(0) + \int_0^t [Z(t) - A(t)] dt \rightarrow B = \text{INTEG} ("Z" - "A", B0) \quad (6.2)$$

¹⁶³ Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Software-Anwendung Ventana Vensim® 5.7a zurückgegriffen. Die nachfolgende Transformation bezieht sich somit ebenfalls auf die Vensim-Notation.

Die Gleichungssysteme im Anhang 4 dieser Arbeit sind in dieser Notation verfasst und in entsprechender Weise zu interpretieren.¹⁶⁴

6.1.2 Grundlagen der multikriteriellen Bewertung mit PROMETHEE

Die grundlegenden Eigenschaften von PROMETHEE wurden bereits in Kapitel 5.3.5.3 erläutert und sollen an dieser Stelle nicht nochmals wiederholt werden. In diesem Kapitel steht daher verstärkt das methodische Vorgehen zur multikriteriellen Bewertung mit PROMETHEE im Vordergrund. Die nachfolgende Erläuterung zur Erstellung einer Rangordnung der Alternativen nach PROMETHEE I und II basiert auf dem Vorgehen von Brans et. al. (vgl. Brans et al. 1986; Brans und Mareschal 2005).

Ausgangspunkt eines jeden MADM-Verfahrens stellt das Vorhandensein einer diskreten Menge an Alternativen $A_i = \{a_1, \dots, a_a\}$ dar, die anhand eines Sets an Kriterien $C_j = \{c_1, \dots, c_c\}$ bewertet werden sollen. Die Bewertung einer Alternativen A_i in Bezug auf das Kriterium C_j wird durch eine Kriterienausprägung $x_{i,j} = f_j(a_i)$ beschrieben. Dabei ist es möglich, alle reellwertigen Kriterienausprägungen in ihrer natürlichen Einheit zu erfassen, während qualitative Angaben erst in entsprechende Ausdrücke überführt werden müssen (vgl. Macharis et al. 1998). Durch den Vergleich aller Alternativen mit den relevanten Kriterien ergibt sich eine Entscheidungsmatrix (vgl. Oberschmidt 2010; Hirzel 2015).

Tabelle 14: Schematische Darstellung einer Entscheidungsmatrix

	C_1	C_2	...	C_{c-1}	C_c
A_1	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	...	$x_{1,c-1}$	$x_{1,c}$
A_2	...	...	...	...	...
...
A_{a-1}	...	...	...	...	...
A_a	$x_{a,1}$	$x_{a,2}$	...	$x_{a,c-1}$	$x_{a,c}$

Die Entscheidungsmatrix bildet die Grundlage für den darauf folgenden paarweisen Vergleich. Hierzu werden für jedes Kriterium C_j zwei Alternativen miteinander verglichen und die Differenz der Kriterienausprägung d_j ermittelt:

$$d_j(A_i, A_s) = f_j(a_i) - f_j(a_s) = x_{i,j} - x_{s,j} \quad \text{mit } j \in \{1, \dots, c\}; i, s \in \{1, \dots, a\}; \quad (6.3)$$

Nachdem die Differenzen der Kriterienausprägungen d_j bestimmt sind, muss der Entscheider für jedes Kriterium C_j noch eine Präferenzfunktion F_j ermitteln, die seiner Präferenzstruktur für das Kriterium entspricht. Auf Basis der Präferenzfunktion lässt sich die Präferenz P_j ermitteln. Dabei besteht, wie bereits schon in Kapitel 5.3.5.4 beschrieben,

¹⁶⁴ Die bisherigen Erläuterungen zu System Dynamics beziehen sich auf die grundlegenden Aspekte dieser Methode. Für eine detailliertere Beschreibung wird an dieser Stelle auf Sterman 2000 oder Strohhecker 2008 verwiesen.

bei PROMETHEE auch die Möglichkeit, neben den absoluten Präferenzen ebenfalls schwache bzw. starke Präferenzen zu berücksichtigen (vgl. Brans und Mareschal 2005).

$$P_j(A_i, A_s) = 0 \quad \text{Indifferenz von } A_i \text{ und } A_s \quad (6.4)$$

$$P_j(A_i, A_s) \approx 0 \quad \text{Schwache Präferenz von } A_i \text{ gegenüber } A_s \quad (6.5)$$

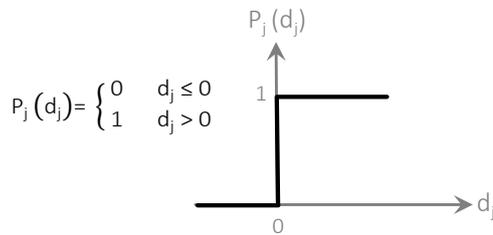
$$P_j(A_i, A_s) \approx 1 \quad \text{Starke Präferenz von } A_i \text{ gegenüber } A_s \quad (6.6)$$

$$P_j(A_i, A_s) = 1 \quad \text{Strikte Präferenz von } A_i \text{ gegenüber } A_s \quad (6.7)$$

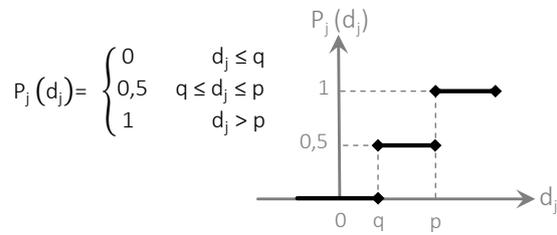
mit $j \in \{1, \dots, c\}$; $i, s \in \{1, \dots, a\}$;

Zur Festlegung seiner Präferenzstruktur bietet PROMETHEE dem Entscheider die Möglichkeit, auf eine bereits vordefinierte Auswahl an Präferenzfunktionen zurückzugreifen.

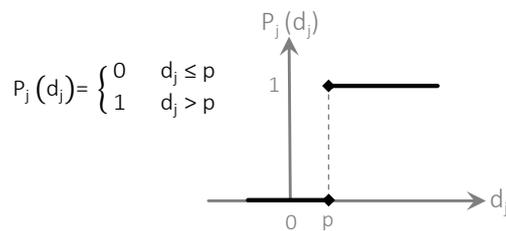
Typ I: Gewöhnliches Kriterium



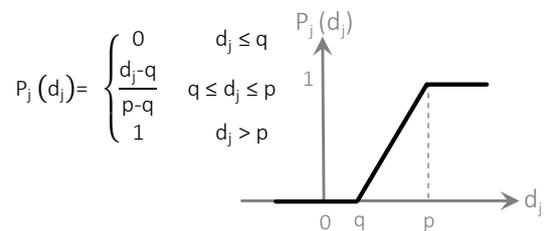
Typ IV: Stufenkriterium



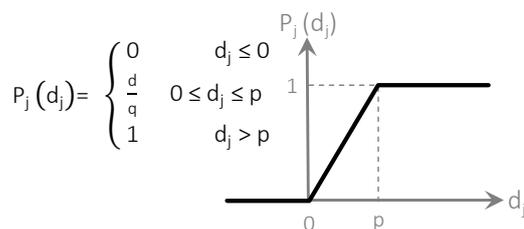
Typ II: Quasikriterium



Typ V: Lineare Präferenz mit Indifferenzbereich



Typ III: Lineare Präferenz



Typ VI: Gaußsches Kriterium

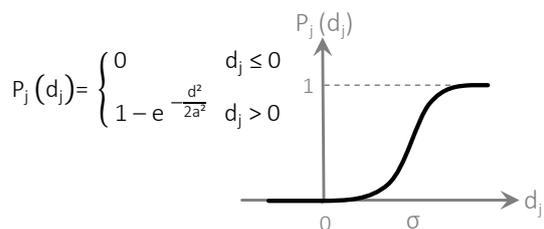


Abbildung 43: Verallgemeinerte Präferenzfunktionen (vgl. Zimmermann und Gutsche 1991)

Die genaue Auswahl ist dabei von dem jeweiligen Anwendungsfall abhängig. So kann es für ein Kriterium ausreichend sein, eine absolute Präferenz anzugeben (vgl. Typ 1), während bei einem anderen Kriterium erst ab einer bestimmten Differenz eine Präferenz empfunden wird, die zudem indifferent ist (vgl. Typ 5). Durch die Verwendung dieser verallgemeinerten Präferenzfunktion ist es somit möglich, den natürlichen Präfe-

renzen des Entscheiders gerecht zu werden. Neben der eigentlichen Präferenz des Entscheiders muss zudem noch dessen intendierte Entwicklungsrichtung für die Kriterien erfasst werden. Dabei ist die Frage zu beantworten, ob das Kriterium maximiert oder minimiert werden soll (vgl. Hirzel 2015).

$$P_j(A_i, A_s) = F_j(v \cdot d_j(A_i, A_s)) \quad \text{mit } v = \begin{cases} 1 & \text{falls Maximierung} \\ -1 & \text{falls Minimierung} \end{cases} \quad (6.8)$$

Für den Entscheider spielt neben der Präferenz für ein Kriterium auch dessen Relevanz in Bezug auf die anderen Kriterien eine Rolle. Zu diesem Zweck werden die Kriterien zusätzlich mit Gewichtungen versehen, die deren Bedeutung für den Entscheider ausdrücken. Gängige Verfahren hierzu sind etwa die Gleichgewichtung aller Kriterien, die direkte Festlegung z. B. über eine Punkteskala oder der paarweise Vergleich z. B. mit der 9-Punkte Skala nach Saaty. Unabhängig davon, mit welchem Verfahren die Kriterien gewichtet werden, erfolgt in der Regel im Anschluss deren Normierung (vgl. Götze 2008; Oberschmidt 2010).

$$\sum_{j=1}^c W_j = 1 \quad (6.9)$$

Eine Besonderheit des hier vorliegenden Planungsproblems resultiert aus dem strategischen Betrachtungszeitraum. Es erscheint nicht plausibel, dass bestimmte Kriterien für den Entscheider über den gesamten Zeitraum hinweg die gleiche Bedeutung besitzen. So ändert sich beispielsweise die Bedeutung der Produktionskosten oder der Kundenzufriedenheit über die einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus hinweg (vgl. Höft 1992). Zudem sind Kriterien, wie z. B. eine staatliche Förderung oder der Schutz von geistigem Eigentum, zu verschiedenen Zeitpunkten der strategischen Planung von unterschiedlicher Bedeutung für den Entscheider. Um diesem Aspekt gerecht zu werden, wird die Gewichtung der Kriterien nicht als fix angenommen W_j , sondern variiert¹⁶⁵ über die Zeit $W_j(t)$ ¹⁶⁶.

Mit Kenntnis der jeweiligen Kriteriengewichtung sowie den Präferenzen des Entscheiders, kann anschließend der Präferenzindex für jede Alternativenkombination gebildet werden.

$$\pi(A_i, A_s) = \sum_{j=1}^c P_j(A_i, A_s) \cdot W_j \quad \text{mit } j \in \{1, \dots, c\}; i, s \in \{1, \dots, a\}; t \in \{1, \dots, k\}; \quad (6.10)$$

¹⁶⁵ Eine ähnliche Berücksichtigung variierender Gewichtungen in Abhängigkeit der Zeit findet sich in Oberschmidt 2010.

¹⁶⁶ Diese Zeitabhängigkeit wird bei den nachfolgenden Formeln zwecks besserer Lesbarkeit nicht explizit dargestellt und soll daher implizit gelten.

Die Höhe von $\pi(A_i, A_s)$ ¹⁶⁷ gibt dabei Auskunft, wie stark Alternative A_i die Alternative A_s dominiert. Der Präferenzindex stellt somit ein Maß für die relative Vorziehungswürdigkeit einer Alternative gegenüber einer anderen dar (vgl. Brans und Mareschal 2005).

Zum Vergleich einer Alternative mit allen andern über sämtliche Kriterien hinweg werden die Präferenzindizes der Alternativen summiert. Hierdurch ergibt sich für jede Alternative A_i ein Ausgangsfluss $\phi^+(A_i)$ und ein Eingangsfluss $\phi^-(A_i)$. Die Höhe der Ausgangs- bzw. Eingangsflüsse geben somit Auskunft über das Maß, inwiefern eine Alternative alle anderen dominiert bzw. von diesen dominiert wird (vgl. Götze 2008).

$$\phi^+(A_i) = \frac{1}{a-1} \sum_{s=1}^a \pi(A_i, A_s) \quad \text{mit } i, s \in \{1, \dots, a\}; \quad (6.11)$$

$$\phi^-(A_i) = \frac{1}{a-1} \sum_{s=1}^a \pi(A_s, A_i) \quad \text{mit } i, s \in \{1, \dots, a\}; \quad (6.12)$$

Mit dem Vorliegen der Eingangs- und Ausgangsflüsse kann durch den paarweisen Vergleich der Flüsse zweier Alternativen eine partielle Rangfolge erstellt werden, die zugleich das Ergebnis von PROMETHEE I darstellt. Diese partielle Präordnung kann dabei anhand folgender Entscheidungsregeln erfolgen (vgl. Hirzel 2015; Chen und Hwang 1992):

Präferenz von A_i gegenüber A_s , falls:

$$\phi^+(A_i) > \phi^+(A_s) \quad \text{und} \quad \phi^-(A_i) < \phi^-(A_s) \quad (6.13)$$

$$\phi^+(A_i) > \phi^+(A_s) \quad \text{und} \quad \phi^-(A_i) = \phi^-(A_s) \quad (6.14)$$

$$\phi^+(A_i) = \phi^+(A_s) \quad \text{und} \quad \phi^-(A_i) < \phi^-(A_s) \quad (6.15)$$

$$\text{Indifferenz zwischen } A_i \text{ und } A_s, \text{ falls:} \quad (6.16)$$

$$\phi^+(A_i) = \phi^+(A_s) \quad \text{und} \quad \phi^-(A_i) = \phi^-(A_s) \quad (6.17)$$

Unvergleichbarkeit zwischen A_i und A_s , falls:

$$\phi^+(A_i) > \phi^+(A_s) \quad \text{und} \quad \phi^-(A_i) > \phi^-(A_s) \quad (6.18)$$

$$\phi^+(A_i) < \phi^+(A_s) \quad \text{und} \quad \phi^-(A_i) < \phi^-(A_s) \quad (6.19)$$

Durch die Anwendung obiger Entscheidungsregeln lässt sich ein entsprechend gerichteter Graph zur Darstellung der partiellen Präordnung bilden.

Zur Erstellung einer vollständigen Präordnung wird auf Basis der Differenz zwischen den Eingangs- und Ausgangsflüssen ein Nettofluss $\phi^0(A_i)$ ermittelt. Diese Erweiterung ist

¹⁶⁷ Die Dominanz der Alternative A_s über Alternative A_i wird im Umkehrschluss durch den Präferenzindex $\pi(A_s, A_i)$ wiedergegeben.

Gegenstand des PROMETHEE-II-Verfahrens. Durch die Aggregation der Flüsse kommt es jedoch zu einem Informationsverlust, und es muss zudem auf das Aufzeigen bestehender Unvergleichbarkeiten verzichtet werden.

$$\phi^0(A_i) = \phi^+(A_i) - \phi^-(A_i) \quad \text{mit } i \in \{1, \dots, a\}; \quad (6.20)$$

Präferenz von A_i gegenüber A_s besteht, falls:

$$\phi^0(A_i) > \phi^0(A_s) \quad \text{mit } i, s \in \{1, \dots, a\}; \quad (6.21)$$

Indifferenz zwischen A_i und A_s besteht, falls:

$$\phi^0(A_i) = \phi^0(A_s) \quad \text{mit } i, s \in \{1, \dots, a\}; \quad (6.22)$$

Die sequentielle Anwendung von PROMETHEE I und PROMETHEE II ermöglicht es somit, zunächst eine partielle Präordnung zu erstellen, aus der Unvergleichbarkeiten ersichtlich werden. Anschließend kann unter Inkaufnahme des damit einhergehenden Informationsverlusts eine vollständige Präordnung mittels PROMETHEE II erstellt werden, wodurch die vorteilhafteste Lösung ersichtlich wird (vgl. Brans und Mareschal 2005; Weißfloch 2013).

6.2 Einordnung in bestehende wissenschaftliche Arbeiten

Diese Arbeit liegt aus thematischer und methodischer Perspektive in der Schnittmenge von drei Teilbereichen: Der strategischen Produktionsplanung,¹⁶⁸ der methodischen Kombination von SD und PROMETHEE bzw. MADM sowie der Produktion von LiB. Für alle drei Bereiche wird im Folgenden ein zusammenfassender Überblick zu bereits bestehenden und thematisch relevanten Modellen gegeben. Basierend auf dieser Bestandsaufnahme wird deren Eignung zur Lösung der Problemstellung dieser Arbeit bewertet und die bestehenden methodischen Defizite sowie der sich daraus ergebende Entwicklungsbedarf bestimmt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem methodischen Kern dieser Arbeit – der systemdynamischen Simulation und PROMETHEE. Der Betrachtungsfokus in den jeweiligen Teilbereichen wird dabei entsprechend der Verfügbarkeit bestehender Ansätze zum Teil auch über diesen methodischen Kern hinaus erweitert.

6.2.1 Bestehende Ansätze im Teilbereich LiB-Produktion

Systemdynamische Simulation ist mit dem spezifischen Fokus auf die LiB-Produktion bis dato kaum vorzufinden. Lediglich Hettesheimer und Lerch (vgl. Hettesheimer und Lerch 2014) analysieren die Verfügbarkeit von kritischen Materialien sowie qualifiziertem

¹⁶⁸ *Systemdynamische Modelle, die sich Fragestellungen des strategischen Managements oder der strategischen Unternehmensführung widmen, werden aufgrund der Inklusion des Produktionssystems ebenfalls mit berücksichtigt. Der Fokus soll jedoch auf den Modellen liegen, die sich mit der Simulation von Produktionsstrategien befassen.*

Personal als potentielle Restriktionen bei der Produktion von LiB. Aus diesem Grund wird in diesem Teilbereich der Betrachtungsrahmen etwas weiter ausgedehnt. Weitert man den Fokus von der Komponente LiB auf die gesamte Elektromobilität aus, so sind SD-Modelle weitaus geläufiger. Sie adressieren dabei vorwiegend die Diffusion unterschiedlicher Antriebstechnologien (vgl. Gomez et al. 2013; Struben und Sterman 2007; Kühn et al. 2014b; Kieckhäfer 2013). Werden auf Ebene der LiB auch nicht-systemdynamische Modelle mit betrachtet, so zeigt sich, dass neben Modellen zur Simulation der Batterieleistung (vgl. Ramadesigan et al. 2012) vorrangig Kostenmodelle zum Einsatz kommen, mit dem Fokus, die Herstellkosten unterschiedlicher Batteriesysteme zu modellieren. Besonders hervorzuheben ist dabei das bereits erwähnte „Battery Performance and Cost Model“ (BatPaC) des Argonne National Laboratory (vgl. Nelson et al. 2011). Es verbindet ein Modell zum Design eines Batteriesystems mit einem entsprechenden Kostenmodell. Es beruht auf den früheren Arbeiten von Gaines und Cuenca (vgl. Gaines und Cuenca 2000). Während es viele Modelle gibt, die einen Top-down-Ansatz verfolgen (vgl. Lache et al. 2010; Roland Berger 2011), zeichnet sich das BatPaC-Modell aufgrund des verfolgten Bottom-up-Ansatzes durch einen hohen Detaillierungsgrad und die Möglichkeit zur Variation oder Konzeption ganzer Batteriesysteme aus. Durch die EDV-technische Umsetzung mittels Microsoft Office Excel bietet das Modell eine hohe Transparenz und gute Nachvollziehbarkeit bezüglich der Modellergebnisse. Aus diesem Grund bildet es auch häufig die Grundlage für Modellerweiterungen in diesem Kontext (vgl. Sakti et al. 2015; Patry et al. 2015; Cluzel und Douglas 2012) oder fungiert als Informationsbasis für die Entwicklung anderer Modelle (vgl. Brodd und Helou 2013; Simon 2014; Hettesheimer und Lerch 2014; Huth 2014). Die Arbeit von Huth ist in diesem Kontext ebenfalls erwähnenswert. Er nutzt das BatPaC-Modell um auf Grundlage einer „Default“-Batteriekonfiguration, Informationen zu Investitionen für Produktionsanlagen mit drei unterschiedlichen Produktionskapazitäten zu generieren. Darauf basierend führt er Monte-Carlo-Simulationen durch, um für unterschiedliche Typen von Automobilherstellern, verschiedenen Fertigungstiefen auf ihre Wirtschaftlichkeit hin zu untersuchen. Huth beschäftigt sich dabei jedoch nicht nur mit einer Teilstrategie der Produktionsstrategie, sondern er sieht ebenfalls die Notwendigkeit, die rein monetäre Betrachtung durch eine multikriterielle Bewertung (AHP) zu komplementieren (vgl. Huth 2014).¹⁶⁹

¹⁶⁹ *Einschränkend ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Arbeit (von Huth) einer Reihe von Vereinfachungen unterliegt, die eine direkte Übertragung der Methode oder der Ergebnisse in die Praxis erschweren. So stellen z. B. neben der starken Fokussierung auf lediglich eine Teilstrategie und Vereinfachungen im Bereich des simulierten Batterie- und Produktionssystems, auch die fehlende Kopplung zwischen der vorgelagerten AHP und der nachfolgenden Monte-Carlo-Simulation eine Vereinfachung dar, die sich mitunter stark auf die Entscheidungsqualität auswirken kann. Die methodische Vereinfachung durch die ausbleibende Kopplung beider Verfahren führt dazu, dass es letztlich dem Entscheider überlassen bleibt, die Ergebnisse beider Schritte in eine Gesamtaussage zu überführen und zu interpretieren. Weiterhin beruhen die Gewichtungen für den AHP nicht auf der Aussage von Experten aus*

6.2.2 Bestehende Ansätze im Teilbereich Strategische Produktionsplanung

Im Teilbereich der Simulation von Produktionssystemen sind SD-Modelle weit verbreitet und seit Jahren etabliert. Im Folgenden sollen sowohl solche Modelle betrachtet werden, die sich explizit mit dem Produktionssystem und der Simulation von Produktionsstrategien befassen, als auch solche, die ein Modell des Gesamtunternehmens darstellen, indem das Produktionssystem einen Teilbereich repräsentiert. So wurde bereits 1971 von Zahn ein recht umfangreiches Unternehmensmodell entwickelt, das mehrere relevante Funktionsbereiche berücksichtigt (vgl. Zahn 1971). Bemängelt wird jedoch eine mangelnde Kapitalorientierung sowie das Außerachtlassen praxisrelevanter Effekte wie der Preisverfall durch Erfahrungskurveneffekte (vgl. Schöneborn 2004). Die Unternehmensmodelle von Wolstenholme (vgl. Wolstenholme 1990) und Bianchi (vgl. Bianchi 2002) adressieren hingegen produktionsrelevante Aspekte wie z. B. Produktionskapazitäten nicht oder nur unzureichend. Ein in allen Bereichen als umfangreich zu bezeichnendes Modell liefert Schöneborn (vgl. Schöneborn 2004). Es erlaubt zur Abwehr unternehmerischer Existenzbedrohungen, verschiedene Abwehrstrategien (wie z. B. die Intensivierung von F&E) ex ante in Bezug auf ihre monetären Konsequenzen hin zu bewerten. Das Modell von Kunath weist dagegen wiederum eine größere Granularität auf, bezieht jedoch neben dem Markt- und Ressourcenumfeld zusätzlich noch die Ebene des globalen Umfelds mit ein (vgl. Kunath 2009).

Neben diesen Modellen auf Gesamtunternehmensebene, die Produktionssystem und Produktionsstrategien lediglich in einer aggregierten Form betrachten, existieren auch Ansätze, die sich explizit mit diesen befassen und daher im Kontext dieser Arbeit von besonderem Interesse sind. Auch wenn die Modellierung eines Produktionssystems auf unterschiedlichen Aggregationsstufen recht verbreitet ist, sind Modelle, die zudem die Interaktion aller Teilstrategien einer Produktionsstrategie abbilden und somit der systemischen Sicht auf das Produktionssystem gerecht werden, kaum vorzufinden. Hervorzuheben sind die Modelle von Foschiani (vgl. Foschiani 1995) und Dörner (vgl. Dörner 2000). Das Modell von Foschiani umfasst insgesamt sechs Module,¹⁷⁰ die je nach Problemstellung im Sinne eines Baukastens kombiniert werden können (vgl. Foschiani 1995). Er untersucht in seiner Arbeit anhand von vier Fallbeispielen Fragestellungen aus den produktionsstrategischen Bereichen der Fertigungsaufgabe, der Kapazitätsstrategie, der Technologiestrategie und der Infrastrukturstrategie. Die vier Bereiche stellen entsprechend seiner Definition die Elemente einer Produktionsstrategie dar, wobei in den Fallbeispielen jeweils eine andere Teilstrategie unter ebenfalls geänderten Rahmenbedingungen untersucht wird. Die jeweilig betrachteten Optionen stellen im Fall der Fertigungsaufgabe den Erhalt des herkömmlichen Systems oder dessen Erweiterung dar. Im

der Praxis, sondern wurden vom Autor selbst vorgenommen und spiegeln daher mitunter nicht zwingend deren tatsächlich praktische Relevanz wider.

¹⁷⁰ Neben dem Produktionsmodul existiert ein Marktmodul, ein Auftragsmodul, ein Kapazitätsmodul, ein Logistikmodul sowie ein Bewertungsmodul (vgl. Foschiani 1995).

Fall der Kapazitätsstrategie wird ein reaktiver, ein aktiver sowie ein offensiver Aufbau untersucht, während bei der Technologiestrategie die Wahl zwischen einem voll-, einer teil- oder einem nicht-automatisierten System besteht. Die Infrastrukturstrategie analysiert unterschiedliche Schichtmodelle bezüglich deren Erfolge. Zur Bewertung der Optionen können mit Hilfe eines entsprechenden Moduls zieladäquate Kennzahlen wie Marktanteil oder ROI abgebildet werden (vgl. Foschiani 1995).

Dörner befasst sich in seiner Arbeit mit der wissensbasierten Evaluierung zukünftiger Produktionsstrategien. Eine Besonderheit seines Modells stellt der Umgang mit unscharfen Informationen dar. Durch eine sequentielle Optimierung des aktuellen Systemzustandes soll eine optimale Produktionsstrategie gefunden werden. Als Elemente der Produktionsstrategie definiert Dörner dabei den Werkverbund, den Standort und die Technologie. In seinem Fallbeispiel befasst er sich mit der Fragestellung, mit welcher Produktionsstrategie ein Automobilhersteller zwei Absatzmärkte möglichst wirtschaftlich versorgen kann. Ausgehend von der Definition der lokal zu fertigenden Fahrzeugmodelle werden unterschiedliche Handlungsoptionen automatisch gebildet und miteinander verglichen. Als Bewertungsgrößen einer Produktionsstrategie werden der Deckungsbeitrag, die „Time-to-Customer“ sowie die Anzahl der abgesetzten Fahrzeuge betrachtet (vgl. Dörner 2000).

6.2.3 Bestehende Ansätze im Teilbereich methodische Kombination von System Dynamics und MADM

Ein gemeinsames Problem der zuvor beschriebenen Produktionssystem-Modelle, das sie mit zahlreichen anderen Modellen aus anderen Bereichen verbindet, ist die Wahl einer (Produktions-) Strategie. Das Zielsystem eines Produktionssystems ist von Natur aus multikriteriell.¹⁷¹ Entsprechend bleibt es dem Entscheider überlassen, die unterschiedlichen vorliegenden Simulationsergebnisse zu bewerten und eine Strategiewahl zu treffen. Aufgrund der häufig vorliegenden Zielkonflikte zwischen einzelnen Zielgrößen wie z. B. Kosten und Qualität, ist eine solche Bewertung ohne geeignete Hilfestellung keineswegs als trivial anzusehen.

Aus diesem Grund gibt es unterschiedliche Ansätze von Autoren, die versuchen die Ergebnisse ihrer SD-Modelle in einer integrierten Form darzustellen und so die Auswahl zu erleichtern. Mostert bewertet in seiner Arbeit zwei Produktionsstandorte anhand der Größe „Gesamtstrategieeffekt“. Diese soll die prozentuale Zielerreichung einer Option widerspiegeln und setzt sich aus der integralen Berechnung der Abweichung von Soll- und Ist-Wert zusammen. Der Gesamtstrategieeffekt bildet dabei die Summe der Strategieeffekte von Stückkosten, Emissionen und Leistung (vgl. Mostert 2007). Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Belkin in seiner Arbeit. Er verwendet einen Differenzvektor zum Controlling der Leistung eines Prozesses mit den wahrgenommenen Kundenanforde-

¹⁷¹ vgl. Tabelle 8

rungen. Dieser ergibt sich aus der Abweichung von Soll-Leistung und der prognostizierten Leistung einer Strategie. Der Vektor wird dabei durch die Größen Qualität, Zeit und Kosten beschrieben (vgl. Belkin 2011).

Weiterhin existieren bereits einige wenige Ansätze zur Integration von System Dynamics und multikriterieller Bewertung auf Basis von MADM-Methoden. So haben etwa Gardiner und Ford (vgl. Gardiner und Ford 1980) oder Reagan-Ciricione (vgl. Reagan-Ciricione et al. 1991) bereits 1980 bzw. 1991 System Dynamics und MAUT zur Identifikation angemessener Strategien miteinander kombiniert. Ebenfalls SD mit MAUT verknüpften Santos et al., um Prozesse im Gesundheitswesen zu bewerten (vgl. Santos et al. 2007, 2002). Einen ersten Ansatz zur Kombination von System Dynamics und PROMETHEE wird von Brans et al. (vgl. Brans et al. 1998) in Form eines 11-stufigen Vorgehens zur Modellbildung und Auswahl von Strategien präsentiert. Ebenfalls auf SD und PROMETHEE fußt der Ansatz von Pruyt zur Generierung von Strategien zur Entwicklung eines nachhaltigen europäischen Energiesystems (vgl. Pruyt 2007, 2006). Die Anwendung einer Kombination aus SD und einem MADM-Verfahren auf Fragestellungen der Produktion, wurde bisher jedoch noch nicht vorgenommen.

Prinzipiell kann die Kombination von SD und MADM-Verfahren auf zwei Arten erfolgen (vgl. Macharis 2000):

- Eine Möglichkeit stellt die Nutzung von SD zur Simulation unterschiedlicher Strategien dar und die daran anschließende Verwendung von MADM zur Auswahl einer angemessenen Strategie. Die bisher genannten Kombinationsansätze basieren auf diesem Vorgehen. Hierzu werden handhabbare Größen aus der Simulation, wie z. B. Maximalwerte oder Zeitspannen bis zur Erreichung eines Wertes übernommen und zur Bewertung der jeweiligen Strategien in die MADM überführt. Pruyt verwendet zum Beispiel diskrete Zeitpunkte, zu denen er die Werte aus der Simulation in das PROMETHEE überführt.
- Die zweite Möglichkeit stellt die direkte Integration von MADM in das SD-Modell dar. Hierbei werden auf Basis von Ergebnissen der laufenden Simulation, Entscheidungen mittels der MADM getroffen und im Laufe der weiteren Simulation wiederum berücksichtigt. Eben diesen Ansatz verfolgt Macharis, um den geeignetsten¹⁷² Modalsplit für Häfen in Antwerpen zu bestimmen. Ein Wechsel des Transportmodus findet statt, sobald der Phi-Nettofluss eines Transportmodus im Vergleich zu den andern vorteilhafter ist. Einen ähnlichen Ansatz verwenden auch Springael et al. zur Bewertung von Strategien zur Verbesserung des Verkehrsflusses in urbanen Gebieten (vgl. Springael et al. 2002; Springael et al. 2000).

¹⁷² in Bezug auf Transportzeit, -kosten sowie Lieferzuverlässigkeit

6.3 Entwicklung einer kontinuierlichen Bewertungsmethodik für dynamisch-komplexe Systeme

Die Sichtung bestehender Ansätze zeigte, dass bis dato noch kein Ansatz besteht, der der vorliegenden Problemstellung der strategischen Produktionsplanung für junge Märkte am Beispiel der LiB-Produktion gänzlich gerecht wird. Im Folgenden werden daher die bestehenden Ansätze in den jeweiligen Teilgebieten bzgl. eines möglichen Beitrags für die vorliegende Problemstellung diskutiert. Insbesondere im Bereich der methodischen Kombination von SD und MADM werden die bestehenden Defizite und der daraus resultierende notwendige Entwicklungsbedarf zur Anwendung im hier vorliegenden dynamisch-komplexen System eingehender betrachtet. Die Entwicklung einer solchen kontinuierlichen Bewertungsmethodik ist Gegenstand des zweiten Teils dieses Unterkapitels.

6.3.1 Diskussion bestehender Ansätze und methodischer Entwicklungsbedarf

Die Literaturrecherche mit Fokus auf die Produktion von LiB zeigt, dass in diesem Bereich bisher keine nennenswerten systemdynamischen Ansätze vorliegen. Zur Abbildung der Konsequenzen verschiedener Produktionsstrategien auf das Produktionssystem bedarf es daher der Entwicklung eines Teilmodells, das die techno-ökonomischen Aspekte der LiB-Produktion systemdynamisch abbilden kann. Als Anknüpfungspunkt für die Parametrisierung des Teilmodells erscheint das BatPaC-Modell von ANL eine geeignete informatorische Basis zur konsistenten Modellierung der LiB-Produktion. Die konkrete Ausgestaltung dieses Teilmodells wird Gegenstand des nachfolgenden Kapitels 7.3.2 sein.

Im Rahmen der Analyse von Modellen zur systemdynamischen Wirkungsprognose von bestimmten Produktionsstrategien auf ein Produktionssystem, konnten hingegen bereits einige bestehende Ansätze identifiziert werden. Die Anwendung von SD auf das Gebiet der Produktion oder das Produktionssystem an sich, stellt kein Novum dar und ist aufgrund der breiten Anwendbarkeit von System Dynamics sowie der bis in die 1950er Jahre zurückreichenden Anwendungshistorie auch so zu erwarten. Ansätze, die sich mit der Simulation von konkreten Produktionsstrategien befassen und dabei die Wechselwirkungen aller Teilstrategien mitberücksichtigen, sind dagegen selten. Die untersuchten Ansätze weisen dabei in zwei für diese Arbeit relevanten Bereichen Defizite auf. Zum einen zeigt sich die Schwierigkeit im Umgang mit mehreren Zielgrößen bei der Bewertung einer Produktionsstrategie,¹⁷³ wodurch die Formulierung einer aggregierten Gesamtaussage bzw. -bewertung dem Anwender überlassen bleibt. Zum anderen zeigt sich bei Ansätzen, die eine solche Aggregation vornehmen, dass qualitative Kriterien oder Aspekte außen vor bleiben. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit insofern als problematisch anzusehen, da nicht nur die horizontalen Wechselwirkungen zwischen

¹⁷³ Siehe hierzu die Erläuterungen zu Foschiani 1995 und Dörner 2000 in Kapitel 6.2.2.

den Teilstrategien einer Produktionsstrategie berücksichtigt werden sollen, sondern auch die vertikalen Wechselwirkungen bzw. Rahmenbedingungen, die sich aus der Unternehmensphilosophie oder -leitsätzen ergeben. Diese liegen zumeist in qualitativer Form vor.

Die methodische Kombination von SD und bestimmten MADM-Verfahren stellt dabei eine Möglichkeit dar, den geschilderten Anforderungen gerecht zu werden. Die in diesem Bereich bestehenden Ansätze können entsprechend Kapitel 6.2.3 in die zwei Gruppen der „ex post“ und der „Integrierten“¹⁷⁴ Bewertung unterteilt werden. Die unterschiedliche Vorgehensweise beider Ansätze wird im Folgenden kurz diskutiert:

Die ex post Bewertung von Strategien im Anschluss an die Simulation, wirft unweigerlich die Frage nach dem Zeitpunkt auf, an dem die Bewertung stattfinden soll. Vergleicht man die beispielhaften Simulationsläufe der in Abbildung 44 dargestellten Strategien bzgl. eines Kriteriums miteinander, so zeigt sich das damit verbundene Dilemma für den Entscheider, das entsprechend als „Zeitproblem“ bezeichnet wird (vgl. Pruyt 2006). Während Strategie 1 zum Beispiel kurzfristig eine sehr schlechte Ausprägung aufweist, liefert sie langfristig den höchsten Wert.

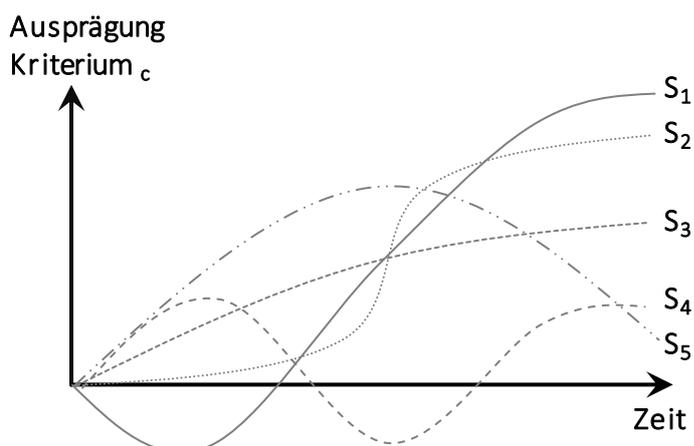


Abbildung 44: Potentielle Ausprägungen von Strategien über einen Simulationslauf (vgl. Pruyt 2006)

Zum Umgang mit dem Zeitproblem werden sechs Möglichkeiten vorgeschlagen (vgl. Pruyt 2006):

(1) *Fokussierung auf einen bestimmten Zeitpunkt*: Für manche Fragestellungen ist lediglich die lang- oder kurzfristige Perspektive einer Strategie relevant. Entsprechend kann die Entscheidung auf Basis der Werte des jeweiligen Zeitpunkts gefällt werden.

¹⁷⁴ Die Ansätze die eine integrierte Bewertung als Gegenstand haben basierten alle auf der Kombination von SD und PROMETHEE. Der Grund hierfür dürfte in der Nutzung der Phi-Nettoflüsse zur Entscheidung über einen Strategiewechsel liegen.

(2) *Diskontierung*: Diskontierung der jeweiligen Simulationsläufe auf die Gegenwart. Zur Bewertung kann dann der entsprechende „Barwert“ herangezogen werden. Dieser Barwert spiegelt dann den zukünftigen Wert bzw. Nutzen einer Strategie in der Gegenwart wider. Der Ansatz eignet sich daher idealerweise für monetäre Kriterien.

(3) *Integration der Simulationsläufe*

(4) *Qualitativer Vergleich des dynamisch-komplexen Verhaltens*: Qualitativer Vergleich der Simulationsläufe.

(5) *Beurteilung zu diskreten Zeitpunkten*: Die Kriterienausprägung der Strategien wird zu diskreten Zeitpunkten wie z. B. zum Jahr 2020 und 2030 erfasst und bewertet.

(6) *Beurteilung zu spezifischen Zeitpunkten*: Ähnlich wie Punkt (5) erfolgt auch hier eine Bewertung zu diskreten Zeitpunkten. Diese erfolgt jedoch nicht für spezifische Jahre sondern richtet sich nach dem Zeitpunkt, wann sich Entwicklungen bemerkbar machen, von sehr kurzfristig bis hin zu sehr langfristig.¹⁷⁵

Die Anwendung eines der Vorgehen zur Strategiebewertung sollte somit stets vor dem Hintergrund des für den Entscheider relevanten Sachverhalts gefällt werden und mit dem Bewusstsein, dass andere Vorgehen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Diese Aussage soll anhand von Abbildung 45 nochmals für ein Kriterium verdeutlicht werden.

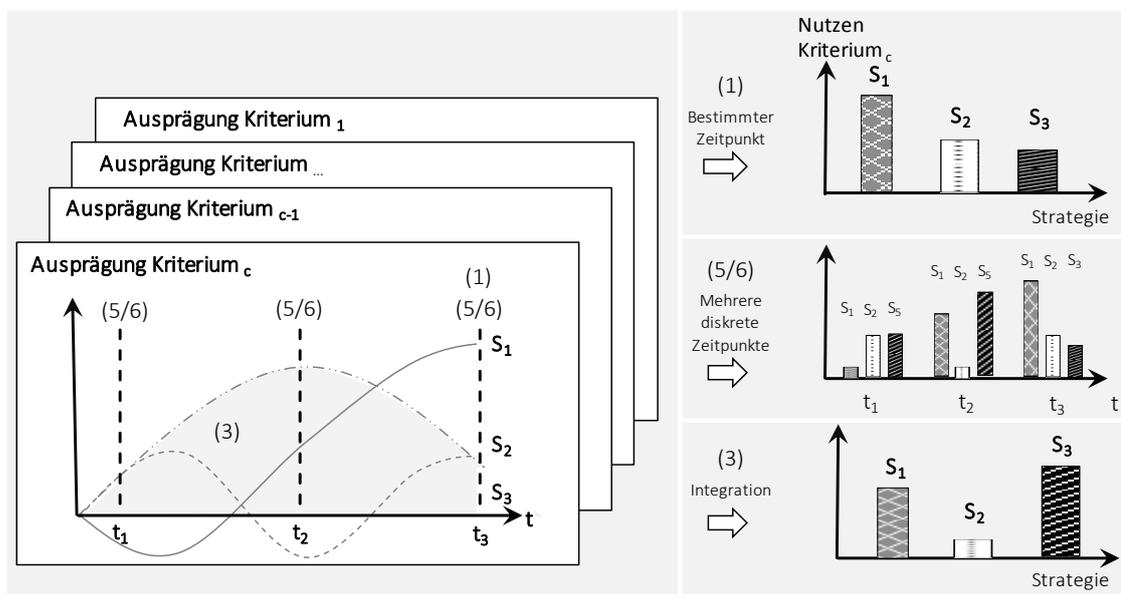


Abbildung 45: Veranschaulichung verschiedener Ansätze zur Lösung des Zeitproblems

¹⁷⁵ Im Beispiel von Pruyt erstreckt sich der Zeitrahmen vom Jahr 2010 (kurzfristig), 2020, 2050 bis hin zur einer sehr langfristigen Perspektive im Jahr 2100 (vgl. Pruyt 2006).

Im Rahmen dieser Arbeit muss eine „ex post“ Bewertung basierend auf einer dieser Vorgehensweisen als ungeeignet angesehen werden. Eine Bewertung entsprechend Punkt (1) würde zwar dazu führen, dass die langfristig vorteilhafteste Strategie gewählt wird, jedoch wird dabei der gesamte vorherige Verlauf ausgeblendet. So könnte sich eine solche Strategie beispielsweise gar nicht mehr umsetzen lassen, da das Unternehmen aufgrund der vorrangegangenen schlechten Strategieausprägung längst nicht mehr am Markt wäre. Als ebenfalls kritisch anzusehen sind die Vorgehen (5) und (6). Bei diesen werden zwar auch Werte im Laufe der Simulation erhoben, jedoch eignet sich ein solches Vorgehen eher für wenig dynamische Systeme, bei denen z. B. ein stetiger Simulationsverlauf zu erwarten ist. Im Fall des hier vorliegenden dynamisch-komplexen Systems, ist eine solche „Blitzlicht-Betrachtung“ jedoch nicht geeignet. Nachteilig an den Vorgehen (2) und (3) ist der damit einhergehende Informationsverlust durch die Aggregation. Das Bewertungsergebnis würde entsprechend eine „Black-Box“ darstellen, ohne weitere Informationen über die Vorteilhaftigkeit von Strategien über den Zeitverlauf zu liefern. Ein solches Vorgehen würde daher dem bis dato verfolgten Credo von möglichst großer Transparenz (im Sinne einer „Glass-Box“) für den Entscheider widersprechen. Zudem ergibt sich bei einer Diskontierung im Fall (2) eine höhere Gewichtung der näheren Zukunft, was in diesem Fall nicht erwünscht ist. Die qualitative Diskussion der Simulationsverläufe aus Punkt (4) stellt ebenfalls keine Option dar, da dem Entscheider eine Auswahl basierend auf einem quantitativen Ergebnis ermöglicht werden soll. Eine lediglich qualitative Diskussion würde kaum über die Ergebnisdarstellung der SD-Simulation hinausgehen und die eigentliche Interpretation der Ergebnisse sowie deren Bewertung wiederum gänzlich dem Entscheider überlassen.¹⁷⁶ Unabhängig von dem verwendeten Verfahren besteht weiterhin die Herausforderung darin, neben diesem einen betrachteten Kriterium, noch weitere Kriterien mit in die Bewertung einzubeziehen, um die Strategien über alle Kriterien hinweg bewerten zu können. Eine über den qualitativen Vergleich der Strategien und Kriterien hinausgehende Möglichkeit wird jedoch nicht aufgezeigt. Bei einer Anwendung der geschilderten Ansätze und dem damit einhergehenden Verlust an Informationen, steigt mit jedem weiteren Kriterium, die Unschärfe der Gesamtbewertung weiter an. Zudem sind Kompensationseffekte zwischen den Kriterien nicht auszuschließen und mangels Transparenz nicht nachvollziehbar. Die hier aufgezeigten Ansätze zur Überwindung des Zeitproblems sind somit aufgrund der hohen Dynamik und Komplexität des in dieser Arbeit betrachteten Systems, welche sich wiederum in den Simulationsläufen widerspiegeln, sowie aufgrund des damit einhergehenden Verlusts an Information und Transparenz nicht geeignet.

Der Vorteil der integrierten Ansätze besteht darin, dass sich das Zeitproblem erst gar nicht ergibt, da die Bewertung bereits Bestandteil der Simulation selbst ist. Zu bestimmten Zeitpunkten entstehen Entscheidungssituation,¹⁷⁷ bei deren Erreichen ein Vergleich

¹⁷⁶ vgl. hierzu auch Fußnote 173

¹⁷⁷ z. B. das Erreichen einer Kapazitätsgrenze in der Produktion und der daraus resultierenden Entscheidung zwischen dem Zukauf unterschiedlicher Produktionsanlagen.

der zur Verfügung stehenden Optionen stattfindet und die vorteilhafteste Option bzw. Strategie ausgeführt wird. Genaugenommen wird somit eine vorteilhafte Strategie durch die Summe der Einzelentscheidungen während der Simulation entwickelt. Dem Vorteil der Umgehung des Zeitproblems steht die sich hieraus ergebende Schwierigkeit zur Bewertung einzelner Produktionsstrategien gegenüber. So findet zum Beispiel keine explizite Ausweisung der einzelnen Phi-Nettoflüsse statt, und es ist lediglich ersichtlich, welcher zu einem bestimmten Entscheidungszeitpunkt der vorteilhafteste ist. Neben diesem Informationsverlust stellt auch die direkte Rückkopplung der gewählten Strategie auf die Simulation des Produktionssystems eine Schwierigkeit für die Bewertung einzelner Produktionsstrategien dar. So können während eines Simulationsverlaufs mehrere unterschiedliche Strategien verfolgt werden, die jeweils auf das Produktionssystem einwirken. Eine isolierte Bewertung des Beitrags einer einzelnen Strategie ist somit nicht mehr möglich. Zudem besteht die Gefahr, dass durch die Rückkopplung einer Strategie die eigentliche „natürliche“ Entwicklung einer anderen Strategie manipuliert wird.¹⁷⁸ Der „integrierte“ Ansatz ist somit in dieser Form ebenfalls nicht für eine Bewertung im Kontext dieser Arbeit geeignet.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass bestehende Ansätze zur Kombination von SD und MADM nicht ohne einen größeren Informationsverlust und eine reduzierte Transparenz auf dynamisch-komplexe Systeme anwendbar sind. Aufgrund dieses Defizits bestehender Ansätze ist eine dahingehende methodische Weiterentwicklung der Kombination von SD und MADM zur Verbesserung der Entscheidungsqualität notwendig und angebracht. Da als MADM-Verfahren PROMETHEE als Bestandteil der Planungsmethodik bestimmt wurde, wird sich die Weiterentwicklung entsprechend auf die Verbindung von SD und PROMETHEE konzentrieren.

6.3.2 Methodische Kombination von SD und PROMETHEE zur Anwendung in dynamisch-komplexen Systemen

Eine Kombination von SD und PROMETHEE auf Basis bestehender Ansätze ist nicht ohne einen mitunter erheblichen Verlust an Informationen und Transparenz durchführbar. Beide stellen jedoch eine essentielle Anforderung an die Planungsmethodik dar, um die Entscheidungsqualität zur strategischen Planung der Produktion in jungen Märkten zu verbessern (vgl. Kapitel 5.1). Aufgrund der vorliegenden Defizite ergibt sich die Notwendigkeit eines Vorgehens, mit dem System Dynamics und PROMETHEE kombiniert werden können, ohne dass daraus eine entsprechende Verminderung der Entschei-

¹⁷⁸ So könnte in Abbildung 44 durch die Wahl von Strategie 5 zu Beginn der Simulation, die Entwicklung von Strategie 1 negativ beeinflusst werden, sodass deren langfristig positive Entwicklung nicht stattfindet. Zum Beispiel könnte eine frühzeitige Entscheidung auf Basis des Kriteriums TCO für Fahrzeuge dazu führen, dass überwiegend Dieselfahrzeuge produziert werden (S1). In Folge dessen sinken die TCO für diese Fahrzeuge aufgrund von Skaleneffekten weiter und machen andere Fahrzeuge weniger attraktiv (z. B. S5). Der Effekt, dass S5 langfristig eine günstigere TCO erreicht hätte, wird daher nicht erkannt.

dungsqualität resultiert. Hierzu sind im Wesentlichen folgende Anforderungen zu erfüllen, die sich aus den Defiziten der genannten Vorgehen aus Kapitel 6.3.1 ergeben. Im Anschluss an die jeweiligen Anforderungen wird eine Lösung formuliert, wie dieser Rechnung getragen werden kann.

(1) Das Vorgehen muss in der Lage sein, das Zeitproblem zu überwinden, ohne zu relevanten Einbußen bezüglich des Informationsgehalts und der Transparenz der Ergebnisse zu führen.

Die Anforderung einer durchgehenden Transparenz der Vorteilhaftigkeit von Strategien bedingt unweigerlich die direkte Integration von PROMETHEE in dem System Dynamics als eigenständiges Modul. Im Gegensatz zu den bisherigen Vorgehen zur Integration, werden jedoch nicht nur die Entscheidungsregeln von PROMETHEE genutzt, sondern es sollen die gesamten Phi-Flüsse der jeweiligen Strategien ermittelt und über den gesamten Simulationsverlauf hinweg abgebildet werden. Dies bedeutet, dass die ϕ^0 -Flüsse (Phinetto-Flüsse) der Alternativen bzw. Strategien inkrementell über den Simulationsverlauf berechnet werden müssen.

(2) Die Vorteilhaftigkeit von Produktionsstrategien soll über den gesamten Simulationsverlauf zu jedem Zeitpunkt und unter Einbezug aller Kriterien ersichtlich sein.

Die Darstellung der Phinetto-Flüsse in Form der gewohnten Säulendiagramme ist dabei nicht mehr möglich. Vielmehr verdichten sich die einzelnen Flüsse zur Form einer Kurve (vergleiche Abbildung 46). Die Vorteilhaftigkeit einer Strategie wird dabei nicht mehr nur zu einzelnen Zeitpunkten ermittelt, sondern kontinuierlich über den gesamten Simulationsverlauf hinweg. Somit ist die genaue Vorteilhaftigkeit einer Strategie zu jedem einzelnen Zeitpunkt der Simulation einzusehen.

(3) Der Entscheider soll auf quantitativer Basis explizit die vorteilhafteste Produktionsstrategie (a) über den gesamten Zeitraum und (b) zu bestimmten Phasen des Lebenszyklus erkennen können.

Die vergleichende Gegenüberstellung aus Abbildung 46 verdeutlicht nochmals den Vorteil einer kontinuierlichen Bewertung und die damit einhergehende Verbesserung der Entscheidungsqualität: Erscheint beispielsweise Strategie 1 bei einer ein- oder auch mehrmaligen Bewertung als am vorteilhaftesten, so kann bei einer kontinuierlichen Bewertung das eigentlich oszillierende Verhalten der Strategie erkannt werden.¹⁷⁹ Der Entscheider wird somit davor bewahrt eine Entscheidung zu fällen, die lediglich auf einer temporären Vorteilhaftigkeit von Strategie 1 beruht.

¹⁷⁹ In diesem Beispiel erscheint diese Erkenntnis aufgrund des Verlaufs von Strategie 1 unter Kriterium c recht trivial. Dies ist jedoch nur der Fall, da ein identischer Verlauf für alle anderen Kriterien angenommen wurde. In der Regel unterscheiden sich die Verläufe von Strategien je nach Kriterium, sodass die daraus resultierenden Phinetto-Flüsse nicht mehr intuitiv zu erfassen sind.

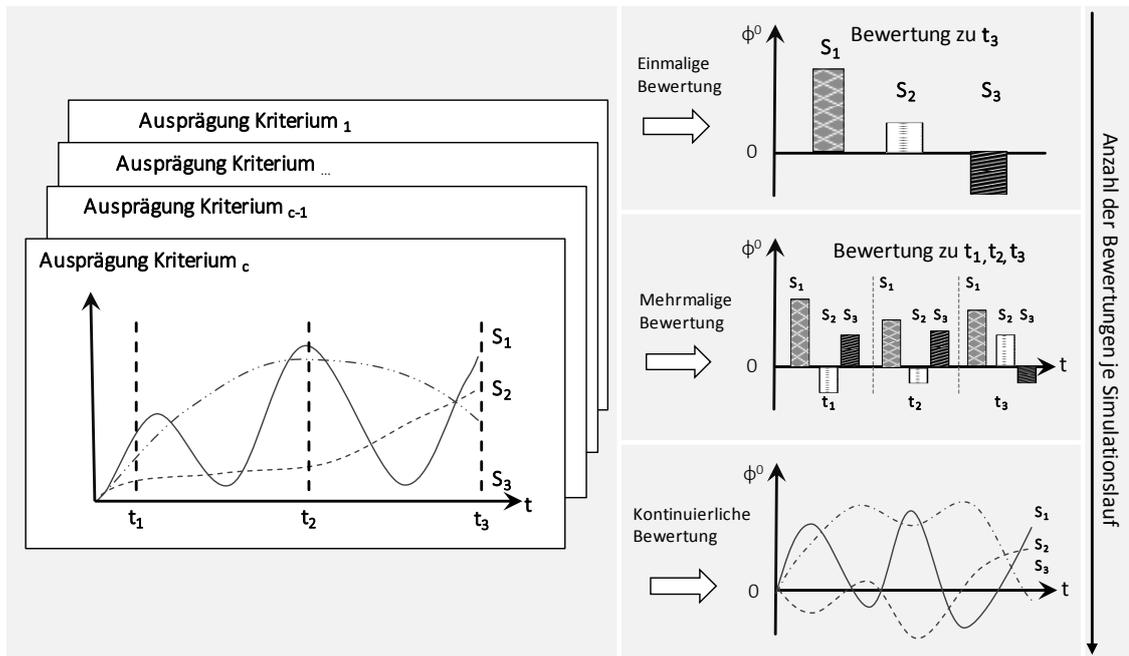


Abbildung 46: Vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse einer kontinuierlichen Bewertung mit PROMETHEE¹⁸⁰

(3a) Die Vorteilhaftigkeit einer Strategie im Vergleich zu anderen ist nun in ihrer gänzlichen Ausprägung zu jedem einzelnen Zeitpunkt der Simulation und über alle Kriterien hinweg ersichtlich. Jedoch lässt die kontinuierliche Darstellung der Phinetto-Flüsse in dieser Form nur eine qualitative Gesamtbewertung der einzelnen Produktionsstrategien anhand der jeweiligen Simulationsläufe zu. Diese qualitative Bewertung bietet jedoch nur bedingt eine geeignete Hilfestellung zur Auswahl einer konkreten Produktionsstrategie. Um dem Planer eine geeignete Entscheidungsunterstützung zu bieten, ist es somit notwendig, die Phinetto-Flüsse der Produktionsstrategien in eine aussagekräftige Entscheidungsgröße zu überführen. Per se würde es sich anbieten, die Summe oder die Mittelwerte der jeweiligen Flüsse zu bilden und die Entscheidung darauf zu stützen. Dies hätte jedoch zur Folge, dass es wiederum zu Kompensationseffekten kommen würde, sowie dass eine lediglich kurzfristige jedoch stark ausgeprägte Vorteilhaftigkeit mitunter zu stark ins Gewicht fallen könnte. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit die Phinetto-Flüsse der Produktionsstrategien über die Simulationsläufe hinweg integriert. Eine Besonderheit hierbei ist, dass die Integration über der jeweiligen Produktionsstrategie mit dem geringsten Phinetto-Fluss erfolgt anstatt beispielsweise über den Nullpunkt. Dieses Vorgehen entspricht vielmehr dem Grundgedanken, die Produktionsstrategien untereinander in Bezug auf ihre Vorteilhaftigkeit zu vergleichen. Zudem fallen dadurch Effekte, die alle Strategien gleichermaßen betreffen, weniger stark ins Gewicht.

¹⁸⁰ Für eine bessere Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse wird unterstellt, dass die anderen Kriterien einen identischen Verlauf zu Kriterium c aufweisen.

(3b) Zur Bewertung einer Produktionsstrategie für junge Märkte muss der zeitliche Simulationsrahmen mindestens die entsprechenden Phasen der Produktlebenszyklen umfassen. Der Einteilung in Kapitel 2.2.1 folgend sind dies die Phasen der Entstehung und des Wachstums. Da das Unternehmen sich auch darüber hinaus in einem reifen Markt behaupten und etablieren soll, sind zudem die Phase der Reife und die der Sättigung bzw. des Alters in eine Betrachtung mit einzubinden. Damit die Vorteilhaftigkeit einer Produktionsstrategie in einer Phase, unabhängig von deren bisherigen Verlauf, erfasst werden kann, findet für jede der genannten Phasen des Produktlebenszyklus eine Integration über den entsprechenden Zeitraum statt. Der Simulationszeitraum wird somit in drei Phasen unterteilt, für die jeweils separat und unabhängig eine Integration über die Phinetto-Flüsse durchgeführt wird. Als Konsequenz hieraus, können für jede Lebenszyklusphase geeignete Produktionsstrategien identifiziert werden, ohne dass es zu einer Verzerrung der Ergebnisse aufgrund besonders guter oder schlechter Ausprägung in vorangegangenen oder nachfolgenden Phasen kommt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit dem beschriebenen Vorgehen zur Kombination von SD und PROMETHEE eine Möglichkeit geschaffen wird, eine kontinuierliche Bewertung von Systemen vorzunehmen, die selbst und somit auch die daraus resultierenden Simulationsläufe, von einer hohen Dynamik und Komplexität geprägt sind. Die kontinuierliche Bewertung und explizite Darstellung der Phinetto-Flüsse über den gesamten Simulationslauf ermöglicht dabei eine große Informationsbeständigkeit und liefert für den Entscheider ein hohes Maß an Transparenz. Um diesem eine geeignete quantitative Entscheidungsunterstützung zu bieten, werden die Phinetto-Flüsse über relevante Lebenszyklusphasen integriert, um eine einfache monokriterielle Entscheidung zu ermöglichen. Diese Erkenntnisse stellen die Lösung der zu Beginn formulierten Forschungsfrage 3 dar. Die konkrete Umsetzung des Vorgehens erfolgt im Rahmen einer exemplarischen Anwendung in Kapitel 8.

7 Formale Modellierung und Implementierung

In den Kapiteln 5 und 6 wurde auf Grundlage der zuvor identifizierten Defizite bei der strategischen Planung für junge Märkte eine entsprechende Planungsmethodik entwickelt. Diese ermöglicht es auch, unter der dort vorherrschenden Unsicherheit und den dynamische-komplexen Umweltbedingungen eine robuste Produktionsstrategie zu identifizieren. Die formale Ausgestaltung der Planungsmethodik zu einem anwendbaren Entscheidungsunterstützungssystem ist Gegenstand dieses Kapitels.

7.1 Ziele und Anforderungen an ein strategisches Entscheidungsunterstützungssystem

Das in der Planungsmethodik integrierte Simulationsmodell soll der Verbesserung der Entscheidungsqualität dienen. Solche Modelle können als strategische Entscheidungsunterstützungssysteme genutzt werden. Diese sollen Entscheider speziell darin unterstützen, in schlecht strukturierten, strategischen, dynamisch-komplexen Entscheidungssituationen, die Konsequenzen ihrer Handlung *ex ante* zu analysieren und zu bewerten (vgl. Morecroft, J. D. W. 1984; Schröter 2006; Stumpfe 2003). Das Ziel der Simulation stellt jedoch nicht allein das Ergebnis in Form von robusten Produktionsstrategien dar, sondern in hohem Maße auch der gesamte Weg bis zum Ergebnis. Die Durchführung von Was-wäre-wenn-Analysen der unterschiedlichen Produktionsstrategien unter verschiedenen Szenarien, verbessert das Verständnis des Entscheiders für die systemischen Zusammenhänge. Die Konsequenzen seiner Entscheidungen, die für ihn transparent nachvollziehbar sind, führen zu einem Lernprozess und Erfahrungsgewinn und ermöglichen es ihm auf dieser Grundlage bessere Entscheidungen zu treffen. Entsprechend soll das Entscheidungsmodell als strategisches Entscheidungsunterstützungssystem zur Planung der Produktion ausgestaltet werden. Wesentliche Bestandteile eines solchen *SEPP* stellen die Datenkomponente, die Dialogkomponente sowie die Modellkomponente dar. In der Dialogkomponente ist die problemspezifisch relevante Datenbasis hinterlegt. Dabei kann es sich z. B. um modellexogene Zeitreihen oder sonstige Daten zur Modellparametrisierung handeln. Die Dialogkomponente ermöglicht dem Nutzer die Kommunikation mit dem Modell und somit die Durchführung verschiedener Analysen (vgl. Turban et al. 2001; Schröter 2006). Als Kern eines *SEPP* wird die Modellkomponente angesehen, die aus einem Tabellenkalkulations-, Optimierungs- oder wie in diesem Fall, aus einem Simulationssystem besteht und ein formales Modell der Problemstellung umfasst (vgl. Krallmann und Rieger 2001; Schröter 2006).

Für die formale Ausgestaltung des *SEPP* sind neben den bereits zuvor genannten Anforderungen, die durch die Planungsmethodik oder die methodische Kombination erfüllt werden, noch weitere konkrete instrumentelle Anforderungen bei der Modellierung des Entscheidungsunterstützungssystems zu berücksichtigen:

- Für eine sinnvolle Abbildung des dynamischen Systemverhaltens ist ein hoher Anteil endogener Variablen notwendig. Zudem kann durch diese die Entstehung von Simulationsergebnissen besser nachvollzogen werden, was einen besseren Lernerfolg ermöglicht.
- Das Modell und dessen Parametrisierung soll eine hohe Praxisnähe aufweisen. Für das Modell bedeutet dies, dass es das Produktionssystem einer LiB-Produktion in ausreichendem Maße widerspiegeln muss. Für die Modellparameter besteht dagegen die Anforderung, diese direkt aus der Praxis zu entnehmen. Dies gilt sowohl für die in der Simulation abgebildeten Produkte als auch für Kriterien und Relevanzen, die zur multikriteriellen Entscheidung benötigt werden.
- Die Daten für das Produktionssystem sollen bottom-up auf Basis des zu produzierenden Produkts und der entsprechenden Nachfrage generiert werden. Der daraus resultierende hohe Detaillierungsgrad verbessert die Transparenz und bietet gleichzeitig die Möglichkeit zur Modifikation einzelner Elemente.
- Damit das *SEPP* möglichst einfach handhabbar ist, soll es als „Stand-alone-Lösung“ entwickelt werden. Neben der einfacheren Handhabung für den Anwender wird zudem die Fehleranfälligkeit aufgrund von Kompatibilitätsproblemen verringert.

Die beiden letztgenannten Punkte haben damit direkten Einfluss auf die Gestaltung der Datenkomponente. Die Simulationssoftware Vensim ermöglicht es zwar auf externe Daten, z. B. aus Excel, zuzugreifen, jedoch verzögert sich die Simulationsdauer je nach Umfang des Datenaustauschs, und es erhöht sich die Komplexität beim Einfügen oder Ändern von Daten. Vor dem Hintergrund dieser Nachteile und aufgrund der zuvor genannten Anforderungen wird die Datenkomponente direkt in das System Dynamics-Modell integriert. Die Implementierung der Dialogkomponente in dem SD-Modell stellt keine Schwierigkeit dar. Es ist lediglich darauf zu achten, dass die Auswahl von Strategien und Szenarien zur Analyse anwenderfreundlich gestaltet wird.

7.2 Modellkonzept

Unter Beachtung der definierten instrumentellen Anforderungen wird im Folgenden ein Modellkonzept für das *SEPP* entwickelt. Basierend auf der Beschreibung des dynamischen Problemverhaltens werden Modellgrenzen und Schlüsselparameter identifiziert und eine erste grobe Modellstruktur erstellt.

7.2.1 Dynamisches Problemverhalten

Das dynamische Problemverhalten ergibt sich zum einen aus dem Grundmodell des Produktionssystems selbst und zum anderen durch dessen Beeinflussung aufgrund verschiedener Kombinationen von Produktionsstrategien. Entsprechend wird zuerst das dynamische Verhalten des Grundmodells erläutert, bevor im Anschluss der Einfluss

einzelner Teilstrategien auf dieses beschrieben wird. Abschließend wird auf Basis der vorherigen Ergebnisse eine problemadäquate Modellgrenze bestimmt.

7.2.1.1 Dynamisches Problemverhalten des Grundmodells

Die Notwendigkeit einer systemischen Betrachtung des Produktionssystems wurde an anderer Stelle bereits ausführlich erläutert. Ebenso wurde auf die Dringlichkeit eingegangen, Teilstrategien einer Produktionsstrategie nicht isoliert voneinander zu betrachten, sondern stets im Gesamtkontext mit den übrigen Teilstrategien. Weshalb diese Forderungen an entsprechender Stelle formuliert wurden, und wie sie die Leistung und Wettbewerbsfähigkeit eines Produktionssystems beeinflussen, wird anhand nachfolgender Abbildung 47 in Form eines Kausaldiagramms des dynamischen Problemverhaltens verdeutlicht. Abbildung 47 beinhaltet dabei die in Kapitel 4.1 beschriebenen relevanten Teilbereiche des Produktionssystems sowie die damit vernetzten Subsysteme eines Unternehmens.¹⁸¹

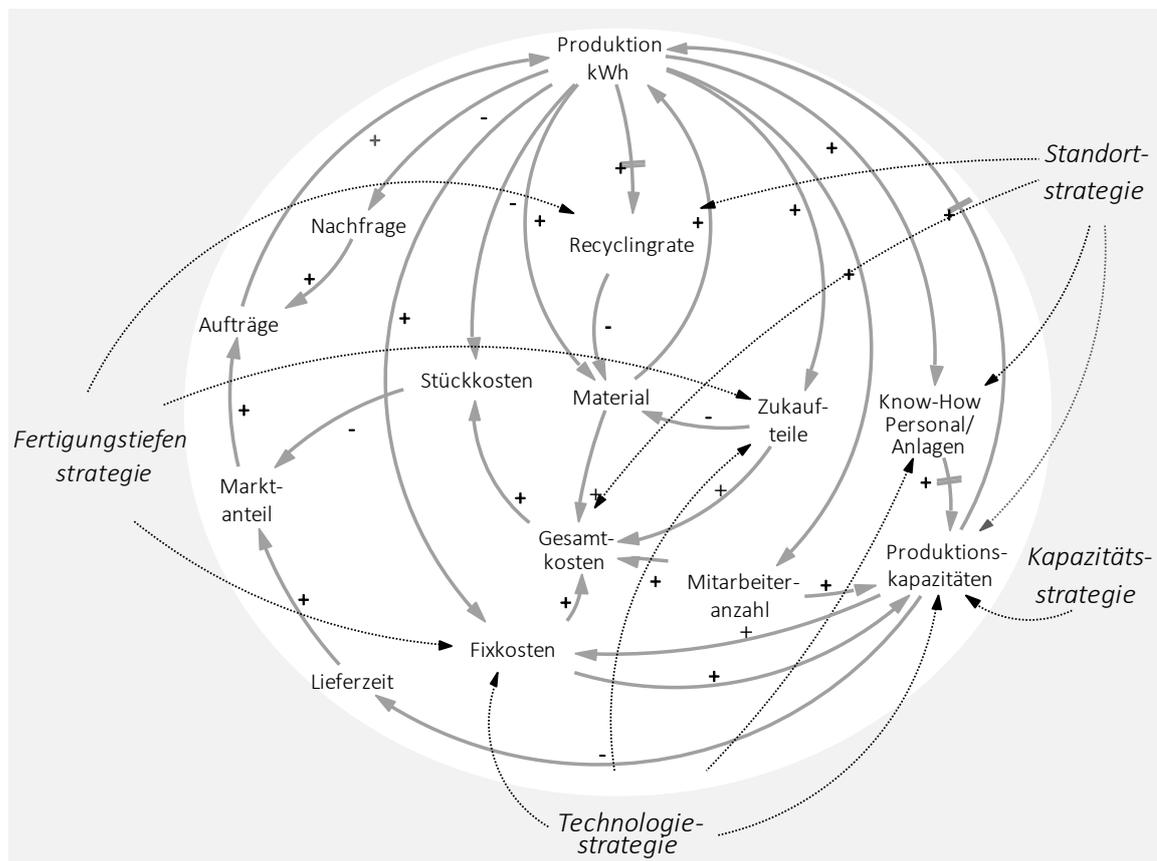


Abbildung 47: Kausaldiagramm des dynamischen Problemverhaltens

¹⁸¹ Beispielsweise spiegeln Materialbedarf und Zukaufteile das Subsystem Beschaffung wider usw.

Abbildung 47 beinhaltet zudem die Schlüsselvariablen und deren Wirkbeziehungen, die für eine zielgerichtete und problembezogene Beschreibung des Systemmodells relevant sind. Eine zentrale Rolle kommt hierbei entsprechend dem Fokus dieser Arbeit, der Produktion von LiB¹⁸² zu. Die *Produktion kWh*¹⁸³ kann als zentraler Treiber des Kausaldiagramms aufgefasst werden, da sie auf die meisten Variablen direkt einwirkt. In Abhängigkeit von eingehenden *Aufträgen*, wird versucht die entsprechende Produktionsmenge unter Berücksichtigung von *Mitarbeiteranzahl*, *Material* oder *Produktionskapazitäten* zu produzieren (vgl. Kapitel 4.1.3.3). Die produzierte Menge an kWh reduziert wiederum die *Nachfrage* des Marktes. Die Höhe der *Aufträge* für das Unternehmen ist dabei abhängig von der Gesamtanzahl an Aufträgen für den LiB-Markt, die sich zum einen aus der Diffusion von Elektrofahrzeugen ergibt (vgl. Kapitel 2) und zum anderen aus dem eigenen *Marktanteil*. Dieser richtet sich in dem Modell nach den in Kapitel 4.1.2 genannten Zielen für ein Produktionssystem, den Kosten und der Zeit.¹⁸⁴ Wenn sowohl die *Stückkosten* für das Produkt [in €/kWh] als auch die *Lieferzeit* in einem wettbewerbsfähigen Rahmen sind, können die *Marktanteile* und somit die eingehenden *Aufträge* ausgebaut werden. Die Einhaltung einer kurzen *Lieferzeit* bedingt dabei das stetige Vorhandensein ausreichender *Produktionskapazitäten*. Deren Vorhalten bzw. deren Ausbau erhöht jedoch nicht nur die Anlagenkapazitäten sondern auch die *Fixkosten* und so wiederum die *Stückkosten*. Auf der anderen Seite ermöglicht die Erhöhung der *Produktionskapazitäten* eine höhere *Produktion kWh*, wodurch statische Skaleneffekte realisiert werden können. Ebenfalls durch eine größere (in diesem Fall jedoch kumulierte) *Produktion kWh* lassen sich auf Seiten von Mitarbeitern und Anlagen dynamische Skaleneffekte, als *Know-how Personal/Anlagen* erreichen (vgl. Kapitel 3.2.6.). Beide Arten führen wiederum zu einer Verringerung der *Stückkosten*.

Das Ergebnis einer Intervention in diesem komplexen dynamischen Grundsystem ist bereits in dieser Form, ohne den Einfluss von Produktionsstrategien zu berücksichtigen, nur schwer vorhersehbar. Weshalb es notwendig ist, alle Teilstrategien einer Produktionsstrategie zu berücksichtigen, wird deutlich, wenn man deren Einfluss auf die Variablen des Modells betrachtet. So wirken die meisten Teilstrategien nicht nur auf eine Variable, sondern gleich auf mehrere zeitgleich ein, wodurch verstärkende und/oder kompensierende Wirkungen an unterschiedlichen Stellen des Systems entstehen und sich aufgrund bestehender Wirkbeziehungen gegenseitig beeinflussen. Außerdem wirken unterschiedliche Teilstrategien zum Teil auf dieselbe Variable ein und beeinflussen diese mitunter in gleicher oder entgegengesetzter Weise. Die Konzentration auf lediglich eine Auswahl an Teilstrategien würde somit, wie bereits in Kapitel 4.2.2 erläu-

¹⁸² In der Einheit kWh

¹⁸³ Die relevanten Schlüsselvariablen des Kausaldiagramms werden nachfolgend kursiv geschrieben.

¹⁸⁴ Ebenso stellt die Qualität ein solches Ziel dar. Da diese bei den gelieferten Produkten jedoch zu 100 % erfüllt sein muss, wird sie nicht explizit als Produktionsziel betrachtet. Dennoch wird sie als Faktor etwa bei dem Produktionsausschuss berücksichtigt.

tert, wichtige Wirkbeziehungen vernachlässigen und die Entscheidungsqualität mindern.

7.2.1.2 Dynamisches Problemverhalten aufgrund der Wirkung von Produktionsstrategien

Auf Grundlage des geschilderten dynamischen Problemverhaltens werden unter Berücksichtigung der vorherigen Kapitel, die Modellgrenzen festgelegt. Als Teil des Modells werden ebenfalls die Gestaltungsoptionen für die einzelnen Teilstrategien bestimmt, die es gemäß dem Modell zu operationalisieren gilt. Entsprechend der erläuterten Eigenheiten von Produktionsstrategien für junge Märkten (vgl. Kapitel 4.2), kommen für die Teilstrategien lediglich die in Abbildung 27 gelisteten Innovationsstrategien in Frage. Bezüglich deren inhaltlicher Ausgestaltung hat die Analyse der Marktakteure in Kapitel 2.2 gezeigt, dass derzeit in keinem Bereich der Teilstrategien eine dominante Strategie erkennbar ist. Aufgrund dessen ist es nicht möglich, bereits eine Teilstrategie als fixen Bestandteil einer Produktionsstrategie anzunehmen. Nichtsdestotrotz orientieren sich die potentiellen Gestaltungsoptionen für eine Teilstrategie an dem in Kapitel 2.2 beobachteten Verhalten bzw. Vorgehen der Akteure.

Fertigungstiefenstrategie: Die Analyse der Kooperationsformen und Wertschöpfungstiefen unterschiedlicher Akteure in Kapitel 2.2.6 zeigte eine hohe Heterogenität auf. Es erscheint jedoch, dass sich die OEMs, mit Ausnahme von Joint Ventures, auf ihr Kerngeschäft konzentrieren und das Batteriesystem in traditioneller Weise von Zulieferern beziehen. Zudem lässt sich aufgrund ihres bisherigen Scheiterns vermuten, dass Joint Ventures (JV) zwischen Tier1-Zulieferern und Zellherstellern wenig erfolgsversprechend sind. Andere JV-Konstellationen sind dagegen recht verbreitet, werden jedoch im Kontext dieser Arbeit nicht explizit betrachtet.¹⁸⁵ Aufgrund des nachfolgenden Fallbeispiels wird im Folgenden die Perspektive eines Tier1-Zulieferers eingenommen. Durch dessen Position innerhalb der Wertschöpfungskette ergeben sich für ihn die Option (a) das Batteriesystem selbst herzustellen und die Batteriezellen zuzukaufen. Zudem kann (b) eine Rückwärtsintegration mit dem Ziel, die Zellen selbst herzustellen, in Frage kommen. Letztlich kann aufgrund des hohen Materialwertes von LiB und gesetzlichen Regelungen auch (c) das Recycling von LiB-Systemen für das Unternehmen attraktiv sein.¹⁸⁶

¹⁸⁵ Dies ist darin begründet, dass die beteiligten Unternehmen in ihrem Kernbereich tätig bleiben bzw. entsprechendes Know-how in diesem Bereich zur Verfügung stellen. Solche Quasi-Integrationen als Zwischenformen werden daher nicht betrachtet. Der Mehrwert solcher Konstellationen ist zudem stark unternehmensspezifisch.

¹⁸⁶ Derzeit verfolgen Automobilhersteller in Kooperation mit Recyclingunternehmen entsprechende Ansätze zum Recycling von Batteriesysteme (vgl. Hettesheimer et al. 2013). Solche Aktivitäten könnten jedoch zukünftig auch von Batterieproduzenten selbst durchgeführt werden.

Die Wahl der Fertigungstiefe wirkt sich entsprechend direkt auf die Höhe der Fixkosten aus, die mit dem Aufbau einer Zellproduktion einhergehen. Im Gegenzug fallen die Kosten für Zukaufteile bzw. Zellen geringer aus. Eine Vorwärtsintegration hätte zudem Einfluss auf die Recyclingrate.

Standortstrategie: Prinzipiell erscheint als generelle Standortstrategie im Rahmen der strategischen Produktionsplanung für LiB anfänglich nur eine räumliche Verdichtung plausibel. Diese Annahme beruht auf der Notwendigkeit zur möglichst raschen Realisation von Skaleneffekten.¹⁸⁷ Die Wahl des Standortes soll sich entsprechend Kapitel 2.2.3 auf die dort aufgeführten elektromobilitätsrelevanten Länder China, USA, Südkorea, Deutschland und Japan beschränken. Die jeweiligen Länder unterscheiden sich dabei entsprechend der dort vorherrschenden Lohnkosten und Arbeitszeiten und Konstruktionskosten. Weiterhin ist die Personalfuktuation unterschiedlich stark ausgeprägt, was zu unterschiedlichen Lernraten führt. Die unterschiedliche Gesetzgebung in den Ländern bzgl. des Recyclings von Batterien oder unterschiedliche Exportraten von Gebrauchtfahrzeugen können zudem zu unterschiedlichen Rücklaufzeiten von Fahrzeugen führen. Neben diesen quantitativen Faktoren, die direkt in dem Modell berücksichtigt werden können, spielen vor allem die spezifischen qualitativen Standortfaktoren eine Rolle für die Entscheidung (vgl. Abbildung 28 und Tabelle 12). Diese werden über die multikriterielle Bewertung berücksichtigt. Als mögliche Standortoptionen werden aus obiger Aufzählung die Länder China und die USA betrachtet. Beide Länder sind in Bezug auf die quantitativen und qualitativen Standortfaktoren stark verschieden und versprechen daher einen höheren Erkenntnisgewinn als z. B. ein Vergleich zwischen (a) Japan und (b) USA¹⁸⁸. Zudem existiert in beiden Ländern bereits ein Zell- und Batteriefertigung, wodurch es möglich ist, durch Expertengespräche mit den entsprechenden Akteuren reale Einschätzungen über die Relevanz und Ausprägung von Kriterien für die Produktion von LiB in dem jeweiligen Land zu erhalten. Zudem ist es die Intention der Planungsmethodik, lediglich eine erste Planung mit einer noch recht hohen Granularität zu ermöglichen, die von einer anschließenden tiefergehenden Feinplanung in den jeweiligen Teilstrategien ergänzt werden sollte. Aus diesem Grund erscheint auch anfangs die Wahl zweier recht konträrer Standorte als passend. So sind beispielsweise einige wirtschaftliche Faktoren in den USA weniger gut ausgeprägt und im Gegenzug einige qualitative Faktoren besser ausgeprägt, die sich jedoch im Laufe der Zeit verändern. Zudem ist die Fluktuation geringer, wodurch eine höhere Lernrate beim Personal erreicht wird. In China ist dagegen die jährliche Arbeitszeit etwas höher, wodurch wiederum weniger Personal benötigt wird.

¹⁸⁷ Ein gutes Beispiel für die Gültigkeit dieser Annahme stellt der Bau der „Gigafactory“ von Tesla dar (vgl. Tesla Motors 2014b).

¹⁸⁸ Prinzipiell können jedoch nach einer entsprechenden Paramteranpassung auch andere Länder als die genannte betrachtet werden.

Kapazitätsstrategie: Der nachfragebezogene Aufbau von Anlagenkapazitäten ist essentiell für ein wettbewerbsfähiges Produktionssystem. Für den Ausbau von Kapazitäten sind, wie in Kapitel 4.1.3.3 erläutert, die (a) aggressive „Lead-Strategie“, die (b) defensive „Lag-Strategie“ oder die (c) „Track-Strategie“ am weitesten verbreitet. Die Vorteilhaftigkeit einer Strategie ist dabei stark abhängig vom Verlauf der Nachfrage. So führt ein schneller und vorausgreifender Ausbau der Kapazitäten zu einer kurzen Lieferzeit und ermöglicht bei entsprechend hoher Nachfrage die schnelle Realisierung von Skaleneffekten. Im Gegenzug führt sie jedoch bei einem Einbruch der Nachfrage zu Überkapazitäten und hohen Fixkosten. Der Aufbau von Kapazitäten erfolgt in dem Modell als synergetische Kapazitätserweiterung.¹⁸⁹ Dies bedeutet, es erfolgt eine Erhöhung der Kapazität aufgrund der zusätzlichen Anlagen, als auch aufgrund verbesserter Prozesstechnik.

Technologiestrategie: Die Technologiestrategie unterteilt sich in die Produkt- und Prozesstechnik. Die Produktion der Li-Ionen-Traktionsbatterie ist vom Prozess her ähnlich mit dem der Consumerzellen.¹⁹⁰ Entsprechend handelt es sich bei der verwendeten Prozesstechnik im Wesentlichen um eine bekannte Technologie, wie sie auch in anderen Bereichen eingesetzt wird (vgl. Heimes 2014). Zwar sind im Rahmen einzelner Prozessschritte durchaus radikale Prozessinnovationen möglich, jedoch wird für den Gesamtprozess der LiB-Produktion im Rahmen des Modells von einer evolutionären Entwicklung ausgegangen.¹⁹¹

Auf Seiten der Produkttechnik stehen für das Unternehmen im Rahmen der Strategieentscheidung zwei Möglichkeiten offen. Zum einen kann es Hochenergiebatterien produzieren, wie sie in PHEV und BEV verwendet werden, oder aber es kann sich entscheiden, zudem auch Hochleistungsbatterien für HEV herzustellen. Die Produktion beider Produkttechniken bietet den Vorteil, bereits frühzeitig Skaleneffekte mit der Produktion von Hochleistungsbatterien für HEV zu realisieren und somit bei der späteren Diffusion von PHEV und BEV einen Vorsprung zu haben. Gleichzeitig erfordert die Produktion von Hochleistungsbatterien bei geringerer Batteriekapazität die gleiche Ausstattung an Produktionsanlagen.¹⁹²

¹⁸⁹ vgl. Kapitel 4.1.3.3

¹⁹⁰ Je nach Zellgeometrie kommt es dabei natürlich zu Abweichungen (vgl. Kapitel 3.1.3).

¹⁹¹ Diese Annahme beruht auch darauf, dass es sich bei der Produktion einer LiB, insbesondere bei der Zellherstellung, um einen stark verketteten Produktionsprozess handelt (vgl. Kapitel 3.2). Eine Verbesserung eines einzelnen Prozessschrittes führt daher nicht unbedingt auch zu einer Verbesserung des Gesamtprozesses.

¹⁹² Beispielsweise wird die gleiche Anzahl an Beschichtungsanlagen benötigt, da die Elektrodenstärke geringer ist, die restliche Geometrie jedoch im weitesten Sinne gleich ist.

Die Technologiestrategie wirkt im Modell entsprechend auf die Höhe der Fixkosten und Komponentenkosten ein, und zudem beeinflusst sie die Produktionskapazitäten sowie die Lernrate der von Personal und Anlagen.

Die nachfolgende Tabelle 15 fasst nochmals die wesentlichen Parameter zusammen, die von Teilstrategien direkt beeinflusst werden.

Tabelle 15: Teilstrategien und davon beeinflusste Modellparameter

Standort	Fertigungstiefe	Technologiestrategie	Kapazitätsstrategie
Konstruktionskosten	Fixkosten	Fixkosten	Aufbaurate
Fluktuationsrate	Recyclingrate	Produktionskapazitäten	
Rücklauf Fahrzeuge	Zukaufteile	Lernrate Personal	
Lernrate Personal		Lernrate Anlagen	
Arbeitszeit		Zukaufteile	
Lohnkosten			

7.2.1.3 Festlegung der Modellgrenzen

Die Festlegung der Modellgrenzen stützt sich auf die zuvor gewonnenen Erkenntnisse sowie die Anforderung, alle problemrelevante Feedbackschleifen und endogenen Größen zu berücksichtigen. Die wesentlichen Feedbackschleifen und Schlüsselvariablen für die Beschreibung des Problemverhaltens sind in Abbildung 47 abgebildet. Die Abbildung wurde unter der Prämisse einer systemischen Betrachtung des Produktionssystems erstellt und bezieht daher alle damit verbundenen Subsysteme mit ein. Die Modellgrenze lässt sich daher in etwa wie in Abbildung 48¹⁹³ dargestellt festlegen. Zusätzlich wird der Absatzmarkt zum Teil endogen abgebildet. Eine solche Teilintegration bietet den Vorteil, das Zustandekommen und die Auswirkungen bestimmter Nachfrageverläufe auf transparentem Wege nachzuvollziehen. Gleichzeitig ist die Diffusion von Elektrofahrzeugen sehr komplex und sollte daher nicht als Teilaspekt eines Modells behandelt werden. Die Literaturrecherche in Kapitel 6.2.1 zu systemdynamischen Modellen hat gezeigt, dass hierzu umfassendere und weitaus besser geeignete Modelle existieren. Dem Absatzmarkt kommt daher im Rahmen dieses Modells eher eine Schnittstellenfunktion zu ebensolchen Modellen zu.

Nachdem die „räumlichen“ Grenzen für das Modell festgelegt sind, bedarf es einer zeitlichen Definition des Betrachtungsrahmens. Diese beruht auf mehreren Aspekten: Dem Produktlebenszyklus der LiB und dem damit verbundenen zeitlichen Rahmen für

¹⁹³ Die Abbildung basiert auf der bereits in Kapitel 4.1 erläuterten Abbildung 23. Die unternehmensexternen Umfeldler sowie der Technologie-, Beschaffungs-, Finanz- und Arbeitsmarkt befinden sich außerhalb der Modellgrenze und sind daher im Unterschied zu Abbildung 23 ausgegraut.

junge Märkte, dem Verlauf der prognostizierten Diffusion von Elektrofahrzeugen und dem Recycling von LiB.

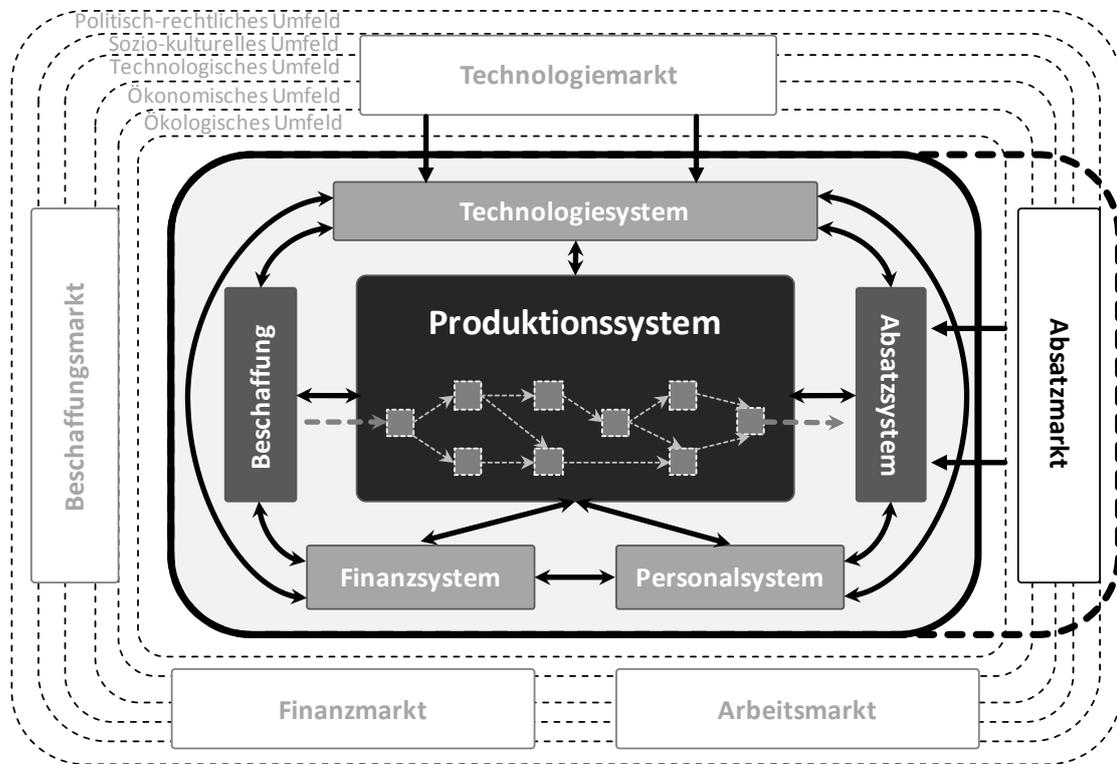


Abbildung 48: Festlegung der Modellgrenzen

Die LiB wird, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, voraussichtlich bis zum Jahr 2030 den Status-quo für Traktionsbatterien darstellen. Danach dürften alternative Batteriekonzepte einen Stand zur industriellen Massenfertigung erreicht haben.¹⁹⁴ Dieser Zeitraum ist vollkommen ausreichend, um sowohl die Phase des jungen Marktes als auch die der Reife zu umspannen und so ebenfalls den langfristigen Erfolg einer Produktionsstrategie zu analysieren. Der Zeitrahmen ist ebenfalls ausreichend dimensioniert, dass sowohl die HEV als auch PHEV und BEV einen relevanten prognostizierten Marktanteil erreicht haben.

Letztlich fällt bei einer Lebensdauer von ca. zehn Jahren pro Fahrzeug und zusätzlichen sonstigen Ausfällen bereits eine kritische Masse an Batteriesystemen von Fahrzeugen an, für die das Recycling von LiB wirtschaftlich sein könnte (vgl. Gaines 2014). Aufgrund dessen wird ein Betrachtungszeitraum bis zum Jahre 2030 als geeignet erachtet.

¹⁹⁴ Diese Annahme setzt entsprechend voraus, dass es zu keinen disruptiven Innovationen im Bereich der Traktionsbatterien kommt.

7.2.2 Modellstruktur

Auf Grundlage des dynamischen Problemverhaltens und der definierten Modellgrenze, lässt sich die Grundstruktur des Modells entsprechend Abbildung 49 beschreiben. Das Grundmodell besteht aus vier Sektoren, die wiederum aus mehreren Subsystemen bestehen, in die auch die Schlüsselvariablen aus dem Kausaldiagramm eingebettet sind.

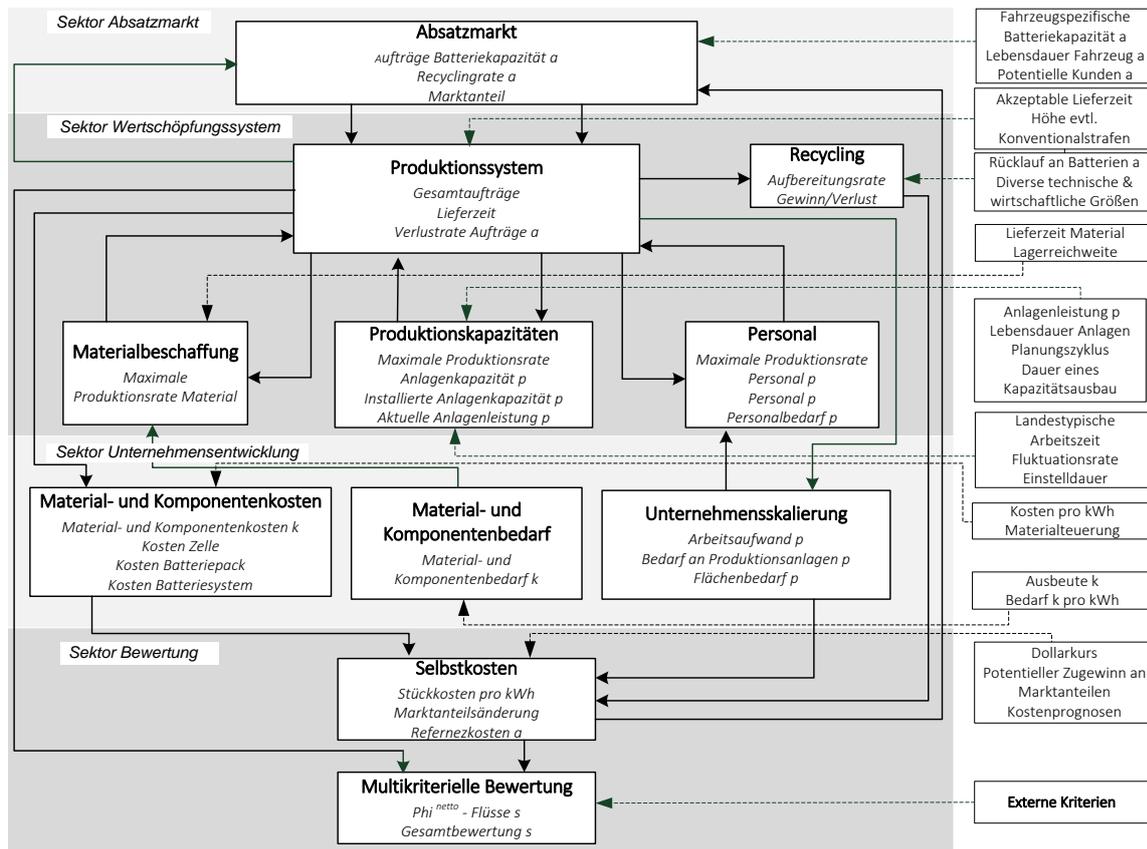


Abbildung 49: Modellstruktur, Modellgrenzen und Schlüsselvariablen

Der Sektor *Absatzmarkt* besteht lediglich aus dem gleichnamigen Subsystem. Er simuliert endogen die Nachfrage nach LiB und determiniert anhand des Marktanteils die Aufträge zur Produktion von Hochenergie- und Hochleistungsbatterien. Der Marktanteil richtet sich dabei nach der Lieferzeit und den Stückkosten je kWh Batteriekapazität.

Den Kern des Sektors im Wertschöpfungssystem bildet das Subsystem *Produktionssystem*. Es transformiert die eingehenden immateriellen Aufträge in materielle produzierte Batteriesysteme. Die maximale Produktion wird dabei vom verfügbaren *Personal*, den *Produktionskapazitäten* und vorhandenen Rohstoffen bzw. Vormaterialien durch die *Materialbeschaffung* limitiert. Ferner stehen die produzierten Batteriesysteme nach ihrer Obsoleszenz zum *Recycling* bereit. Die Lieferzeit der Batteriesysteme fließt in die multikriterielle Bewertung ein. Das Subsystem *Materialbeschaffung* bestimmt die maximale Produktionsrate auf Basis der verfügbaren Rohstoffe. Deren Beschaffung erfolgt unter Berücksichtigung der gewünschten Lagerreichweite und Beschaffungszeit. Im

Subsystem *Personal* wird äquivalent die maximale Produktionsrate basierend auf dem verfügbaren Personal und dessen spezifischem Erfahrungswert bestimmt. Die Anpassung des Personals erfolgt anhand der erwarteten Auftragseingänge unter Beachtung der landestypischen Fluktuation, Arbeitszeiten und Akquisedauer. Das Subsystem *Produktionskapazitäten* bildet das Produktionssystem aus Anlagensicht ab. Entsprechend der Anzahl und des Technologiegrades der installierten Anlagen bilden sie den dritten potentiellen Limitationsfaktor für die Produktion. Eine Anpassung des Anlagenbestands erfolgt zum einen im Rahmen regelmäßiger Planungszyklen auf Basis der erwarteten Nachfragentwicklung und zum anderen bei Ersatzinvestitionen von Anlagen, die ihre Lebensdauer erreicht haben. Aufgrund der starken Verkettung zwischen den Produktionsschritten und zur Wahrung der Fließproduktion erfolgt der Aufbau stets im Rahmen einer ganzen Anzahl an Produktionslinie und nicht auf der Ebene einzelner Produktionsanlagen. Letztes Subsystem des Sektors stellt das *Recycling* dar. Es simuliert das hydro-metallurgisches Recycling obsoleter Batteriesysteme und bestimmt anhand der entstehenden Fixkosten und des Prozessdeckungsbeitrags das Ergebnis des Recyclings von LiB. Dieses kann bei der Wahl einer entsprechenden Fertigungstiefe bei der Bestimmung der Stückkosten zusätzlich berücksichtigt werden.

Der dritte Sektor Unternehmensentwicklung umfasst den mit dem Produkt und dessen Produktionsmenge einhergehende Skalierung des Unternehmens auf die entsprechende Betriebsgröße. Im Sinne des Entscheidungsunterstützungssystems, kommt diesem Sektor die Funktion der Datenkomponente zu, da darin alle für das Modell relevanten technischen und wirtschaftlichen Größen hinterlegt sind. Die Datenbasis stützt sich dabei vorwiegend auf das bereits erwähnte BatPac-Modell. Dieses wurde genutzt, um den spezifische Material- und Komponentenbedarf sowie deren spezifische Kosten für ein Batteriesystem zu ermitteln. Zusätzlich dient das Modell der Ermittlung von Investitionen für einzelne Produktionsanlagen, des daraus resultierenden Flächenbedarfs und des zum Betrieb der Anlagen benötigten Personals. Ebenfalls konnten spezifische Degressionsfaktoren für die Produktionsanlagen darüber ermittelt werden.

Auf Grundlage der eingehenden Produktionsaufträge wird im Subsystem *Unternehmensskalierung* der notwendige Arbeitsaufwand zu deren Herstellung unter Einbezug von Skaleneffekten ermittelt. Dieser Aufwand dient anschließend als Maß für Personalanpassungen und zur Bestimmung der Lohnkosten. Weiterhin werden auf Grundlage der zu verarbeitenden Rohstoffe die notwendigen Produktionsanlagen ermittelt. Im Gegensatz zum Subsystem Produktionskapazitäten, bei der eine aggregierte Betrachtung aller Prozesse jeweils auf Wertschöpfungsstufe erfolgt, werden hier explizit für jeden Produktionsschritt die notwendige Anlagenkapazitäten und -kosten unter Beachtung von Größendegressionseffekten ermittelt. Das Ergebnis stellen die Investitionen dar, die notwendig sind um die entsprechende Menge an Materialien zu verarbeiten, die zur Erfüllung der Produktionsaufträge benötigt werden. Schließlich wird unter Kenntnis der Anzahl der jeweiligen Anlagen der Flächenbedarf ermittelt, der für deren Betrieb notwendig ist. Entsprechend liefert das Subsystem Auskunft über die flächenmäßige Größe des Unternehmens, die darin installierten Produktionsanlagen sowie

über die beschäftigten Mitarbeiter. Diese drei Faktoren stellen eine wichtige Größe bei der Berechnung der Stückkosten dar. Das Subsystem *Material- und Komponentenbedarf* beinhaltet die relevanten Materialien und Komponenten nach Art und Menge, die für ein Batteriesystem in Abhängigkeit der Antriebsform benötigt werden. Das Subsystem *Material- und Komponentenkosten* definiert entsprechend auf Basis der Produktionsaufträge und mittels des Materialbedarfs die Materialkosten für das Batteriesystem.

Der Sektor Bewertung besteht aus den Subsystemen *Selbstkosten* und *Multikriterielle Bewertung*. Unter Einbezug der genannten Kosten sowie von Zuschlägen für die indirekte Arbeit, werden im Subsystem *Selbstkosten* die resultierenden Stückkosten berechnet, mit denen das Unternehmen Batteriekapazitäten in kWh herstellen kann. Der Vergleich der Stückkosten mit denen des Wettbewerbs¹⁹⁵ gibt Auskunft über die Wettbewerbsfähigkeit des eigenen Produktionssystems und ermöglicht u.U. den Ausbau eigener Marktanteile. Im Subsystem *Multikriterielle Bewertung* fließen alle Ergebnisse des Modells zusammen. Auf Grundlage der Stückkosten, Lieferzeit sowie von weiteren entscheidungsrelevanten externen Kriterien wird eine multikriterielle Bewertung vorgenommen. Das PROMETHEE ist dabei endogen im Modell implementiert und berechnet simultan Eingangs- und Ausgangs-Flüsse sowie die daraus resultierenden Phinetto-Flüsse zur kontinuierlichen und dynamischen Bewertung der einzelnen Strategien.

Auf Grundlage obiger Modellstruktur lassen sich somit durch den Vergleich der Ergebnisse von Produktionsstrategien unter verschiedenen Szenarien und unter Berücksichtigung von Sensitivitäts- bzw. Risikoanalysen, robuste Strategien für unterschiedliche Wettbewerbsstrategien identifizieren.

7.3 Quantitativer Modellentwurf

Auf Grundlage des identifizierten dynamischen Verhaltens und der in Abbildung 49 dargestellten Grundstruktur des Modells werden nachfolgend die vier Modellsektoren anhand ihrer verhaltens- und strukturelevanten Bestands- und Flußgrößendiagramme erläutert. Zu diesem Zweck werden zu Beginn eines jeden Sektors vorab dessen Zweck und Funktionsweise kurz beschrieben. Für die einzelnen Subsysteme werden jeweils die wichtigsten Modellelemente abgebildet und auch die zugehörigen mathematischen Notationen näher erläutert.¹⁹⁶ Zudem wird anhand exemplarischer Simulationsläufe das Verhalten des Subsystems bzw. spezielle Charakteristika dargestellt.¹⁹⁷

¹⁹⁵ Als Grundlage für den Vergleich können Stückkosten auf Basis relevanter Studien oder auf Grundlage von Erfahrungskurven verwendet werden.

¹⁹⁶ Aufgrund des Umfangs des Gesamtmodells und einzelner Subsysteme werden diese der Übersicht wegen zum Teil nur ausschnittsweise abgebildet.

¹⁹⁷ Die Darstellung des Modellverhaltens ist ein Vorgriff auf die Validierung in Kapitel 7.4. Sie soll jedoch bereits an dieser Stelle gezeigt werden, da sie der Veranschaulichung und dem Verständnis des Subsektors dienen.

Zur einfacheren Interpretation dieser Notationen sollen an dieser Stelle ex ante eine Konvention für die häufigsten verwendeten Notationen sowie bestimmte Funktionen festgelegt werden.

Tabelle 16: Allgemeine Notationen und deren Bedeutung

Notation:	Erläuterung:
Z^+	Zuflussrate: Gekennzeichnet durch den Operator „+“
\bar{B}	Bestandsvariable: Gekennzeichnet durch einen Querstrich
A^-	Abflussrate: Gekennzeichnet durch den Operator „-“
$\langle S \rangle$	Schattenvariable ¹⁹⁸ : Gekennzeichnet durch eckige Klammern
T	Zeitliche Variablen
T	Zeitliche Konstanten
a, A	Index und Menge der Antriebsformen ($a \in A = \{\text{HEV, PHEV, BEV}\}$)
w, W	Index und Menge der Wertschöpfungsstufen ($w \in W = \{\text{System } s, \text{Modul } m, \text{Zelle } z, \text{Elektrode } e\}$)
r, R	Index und Menge der Recyclingstufen ($r \in R = \{1,..4\}$)
b, B	Index und Menge der Restriktionen ($b \in B = \{\text{Produktionskapazität } k, \text{Material } m, \text{Personal } p\}$)
$f^{\min}(x_1,..x_n)$	Minimum-Funktion: Gibt das minimale Argument wieder
$f^{\text{VZ}}(x, T, c)$	Verzögerungsfunktion: Gibt das Argument verzögert um die Zeit T wieder

7.3.1 Sektor Nachfragemarkt

Der Nachfragesektor bildet im Rahmen des Simulationsmodells die Diffusion unterschiedlicher Antriebsarten von Elektrofahrzeugen ab. Damit kann dieser Sektor zum einen als Taktgeber für die Produktion von LiB verstanden werden, zum anderen aber auch als Taktgeber für ein späteres Recycling dieser Batterien. Entsprechend unterteilt sich der Sektor Nachfragemarkt in vier Subsysteme. Drei dieser Systeme sind dabei von identischer Struktur und bilden jeweils die Absatz- und Obsoleszenzmenge von HEV, PHEV und BEV ab. Dem zentral gelagerten Subsystem „Marktanteilsbezogene Aufträge“ kommt anschließend die Aufgabe zu, auf Basis des eigenen Marktanteils und der Gesamtmenge an abgesetzten Fahrzeugen, die damit einhergehenden Aufträge zur Batterieproduktion zu bestimmen. Der Sektor Nachfragemarkt sowie dessen Subsysteme sind in nachfolgender Abbildung 50 dargestellt.

¹⁹⁸ Bei Schattenvariablen handelt es sich um Variablen, die bereits an einer anderen Stelle des Modells definiert wurden. Sie dienen zur verbesserten Verständlichkeit einer Darstellung wobei nicht ersichtlich ist, ob es sich um eine Fluß-, Bestands- oder Hilfsvariable handelt.

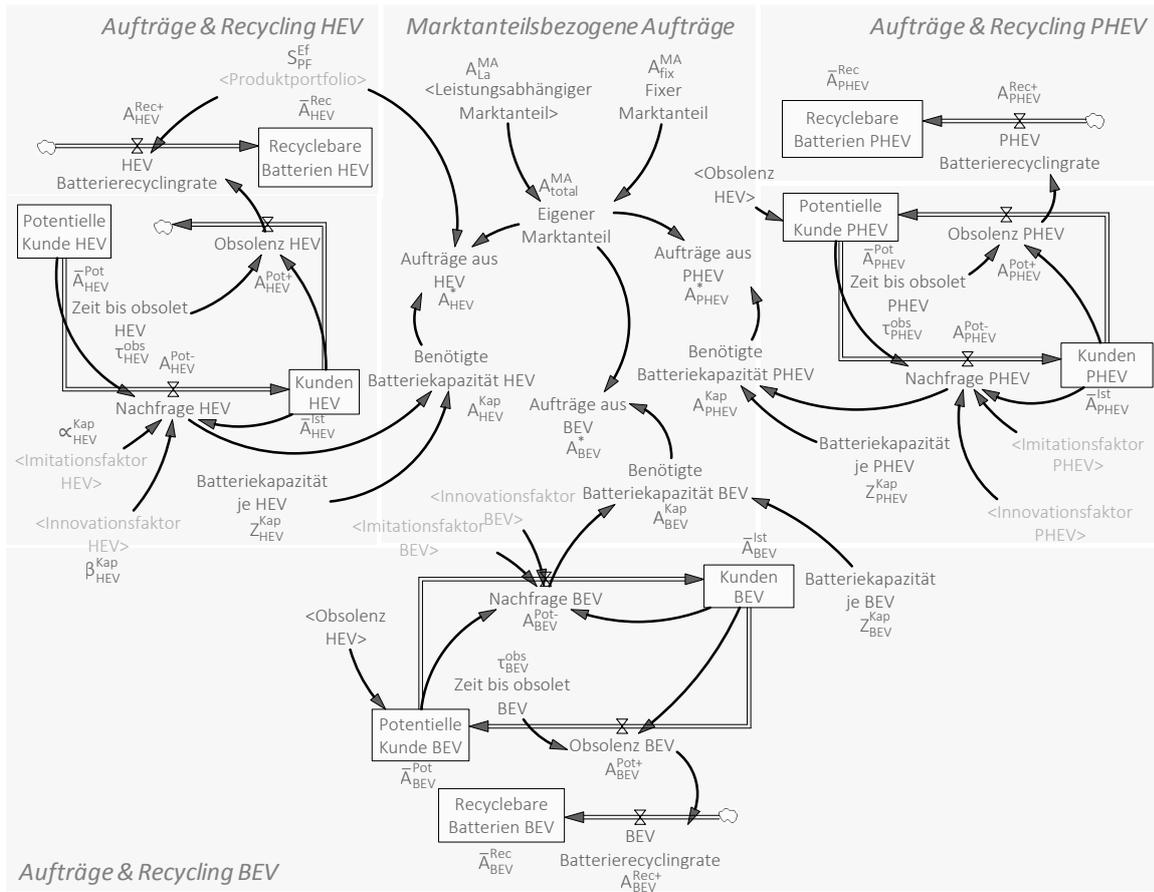


Abbildung 50: Sektor Nachfrage

Die Diffusion der Antriebsarten wird nach dem Modell von Bass abgebildet¹⁹⁹ und in ein entsprechendes Bestand- und Flußgrößendiagramm überführt.²⁰⁰ Ausgangspunkt für die Verbreitung einer Technologie bildet ein bestehender Bestand an potentiellen Kunden für eine Antriebsform \bar{A}_a^{Pot} . Dieser Kundenbestand reduziert sich entsprechend der Nachfrage über die Zeit $A_a^{\text{Pot+}}$ und wird durch den Innovationskoeffizienten β_a^{Kap} und Imitationskoeffizienten α_a^{Kap} bestimmt, die den Verlauf der Nachfragekurve festlegen. Die potentiellen Kunden werden entsprechend dieser Rate zu Kunden \bar{A}_a^{Ist} .

$$\bar{A}_a^{\text{Ist}}(t) = \bar{A}_a^{\text{Ist}}(t_0) + \int_{t_0}^t (A_a^{\text{Pot+}}(t) - A_a^{\text{Pot-}}(t)) dt \quad \forall a \in A \quad (7.1)$$

$$A_a^{\text{Pot+}}(t) = \frac{(\bar{A}_a^{\text{Pot}}(t) \cdot \alpha_a^{\text{Kap}} + \bar{A}_a^{\text{Pot}}(t) \cdot \bar{A}_a^{\text{Ist}}(t) \cdot \beta_a^{\text{Kap}})}{(\bar{A}_a^{\text{Pot}}(t) \cdot \bar{A}_a^{\text{Ist}}(t))} \quad \forall a \in A \quad (7.2)$$

¹⁹⁹ vgl. hierzu Bass 1969

²⁰⁰ vgl. hierzu Sterman 2000

$$A_a^{\text{Pot-}}(t) = \frac{\bar{A}_a^{\text{Ist}}(t)}{\tau_a^{\text{obs}}} \quad \forall a \in A \quad (7.3)$$

mit:

\bar{A}_a^{Ist} Bestehende Kunden eines Antriebs a [Fzg]

$A_a^{\text{Pot+}}$ Nachfragerate nach einer Antriebsform a [Fzg/Monat]

$A_a^{\text{Pot-}}$ Obsoleszenzrate einer Antriebsform a [Fzg/Monat]

\bar{A}_a^{Pot} Bestand an potentiellen Fahrzeugkunden [Fzg]

α_a^{Kap} Imitationskoeffizient [1/Monat]

β_a^{Kap} Innovationskoeffizient [Fzg/Monat]

τ_a^{obs} Durchschnittliche Zeit bis ein Fahrzeug obsolet wird [Monat]

Die Nachfragerate ergibt zusammen mit der spezifischen Batteriekapazität Z_a^{Kap} je Antriebsform den Gesamtbedarf A_a^{Kap} an Batteriekapazitäten. Aus diesem Gesamtbedarf sowie dem eigenen Marktanteil $A_{\text{total}}^{\text{MA}}$ werden die eingehenden Produktionsaufträge A_a^* je Antriebsform, in kWh bestimmt.

$$A_a^*(t) = A_{\text{total}}^{\text{MA}} \cdot \sum_a Z_a^{\text{Kap}} \cdot A_a^{\text{Kap}}(t) \quad \forall a \in A \quad (7.4)$$

$$A_{\text{total}}^{\text{MA}}(t) = A_{\text{La}}^{\text{MA}}(t) + A_{\text{fix}}^{\text{MA}} \quad (7.5)$$

mit:

A_a^* Aufträge zur Batterieproduktion für eine Antriebform a [kWh/Monat]

$A_{\text{total}}^{\text{MA}}$ Eigener Marktanteil am Batterienachfragemarkt [Dmnl]

Z_a^{Kap} Spezifische Batteriekapazität einer Antriebsform a [kWh/Fzg]

A_a^{Kap} Gesamtbedarf an Batteriekapazitäten für eine Antriebsform [kWh/Monat]

$A_{\text{La}}^{\text{MA}}$ Leistungsabhängiger Marktanteil [Dmnl]

$A_{\text{fix}}^{\text{MA}}$ Fixer Marktanteil aufgrund fester Lieferbeziehungen [Dmnl]

Aufgrund des langen Simulationszeitraums wird zudem berücksichtigt, dass die Fahrzeuge nach einer gewissen Dauer obsolet werden und veraltete Fahrzeuge ersetzt werden. Dies betrifft jedoch nur die Antriebstechnologien PHEV und BEV. Die Rückführung der Kunden in den Bestand der potentiellen Kunden ist im Fall der HEV nicht implementiert. Somit entleert sich der Bestand an Kunden über die Dauer, ohne dass dieser wieder aufgefüllt wird. Durch dieses Verhalten soll dem Fakt Rechnung getragen werden, dass die HEV im Allgemeinen als Übergangstechnologie gesehen werden. Neben der Rückführung des Kundenstamms kommt der Obsoleszenzrate noch eine zweite

Funktion zu. Sie bestimmt die Rate an Fahrzeugen bzw. Fahrzeugbatterien, die für das Recycling zur Verfügung stehen $A_a^{\text{Rec}+}$. Die Schattengröße Produktportfolio repräsentiert den Strategieeffekt²⁰¹ $S_{\text{PF}}^{\text{Ef}}$. Im Fall von Strategien, die eine Produktion von HEV-Hochleistungsbatterien nicht vorsehen, werden hierdurch die entsprechenden Produktions- und Recyclingaufträge nicht berücksichtigt.

Anhand nachfolgender Abbildung soll nochmals die Entstehung der Batterienachfrage exemplarisch verdeutlicht werden.

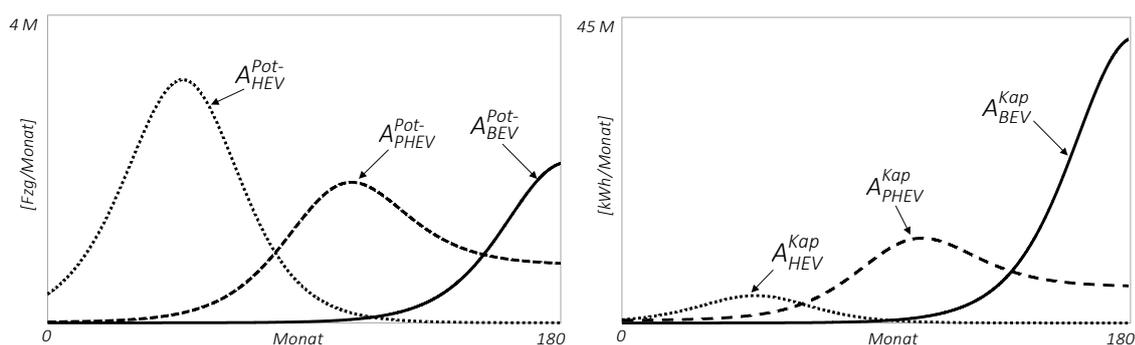


Abbildung 51: Modellierung der Batterienachfrage

Die linke Abbildung zeigt dabei die Diffusion der unterschiedlichen Antriebsformen, wobei auch das Versiegen der Nachfrage nach HEV erkennbar ist. Die rechte Abbildung zieht zusätzlich die spezifische Batteriekapazität der unterschiedlichen Fahrzeugantriebe mit ein und zeigt so den resultierenden Gesamtbedarf an Batteriekapazitäten. Der Vergleich beider Abbildung verdeutlicht, den großen Einfluss der spezifischen Batteriekapazität auf die Kapazitätsnachfrage.

7.3.2 Sektor Wertschöpfungssystem

Der Wertschöpfungssektor bildet das Produktionssystem des Unternehmens sowie dessen Leistungsfähigkeit ab. Ausschlaggebend hierfür ist die zeitgerechte Bereitstellung der zur Auftragserfüllung notwendigen Produktionsfaktoren. Entsprechend umfasst der Sektor Wertschöpfungssystem neben dem Subsektor Produktion auch die Subsektoren Materialbeschaffung, Produktionskapazitäten sowie Personal zur Berücksichtigung essentieller Elementarfaktoren. Während die Produktion der Auftragserfüllung dient, wirken die übrigen Subsektoren restriktiv auf das Leistungsvermögen des Produktionssystems ein.

²⁰¹ Als Strategieeffekt werden solche Effekte bezeichnet, die in Abhängigkeit einer gewählten Produktionsstrategie auftreten oder eben auch nicht.

7.3.2.1 Subsektor Produktion und Distribution

Aufgabe des Subsektors Produktion ist die Transformation der eingehenden Bestellaufträge in fertige Batteriesysteme.²⁰² Abbildung 52 zeigt einen Ausschnitt des Subsektors, in dem der Auftragseingang sowie die Berechnung der Lieferzeit und Teile der Auftrags- und Produktionskette dargestellt sind.

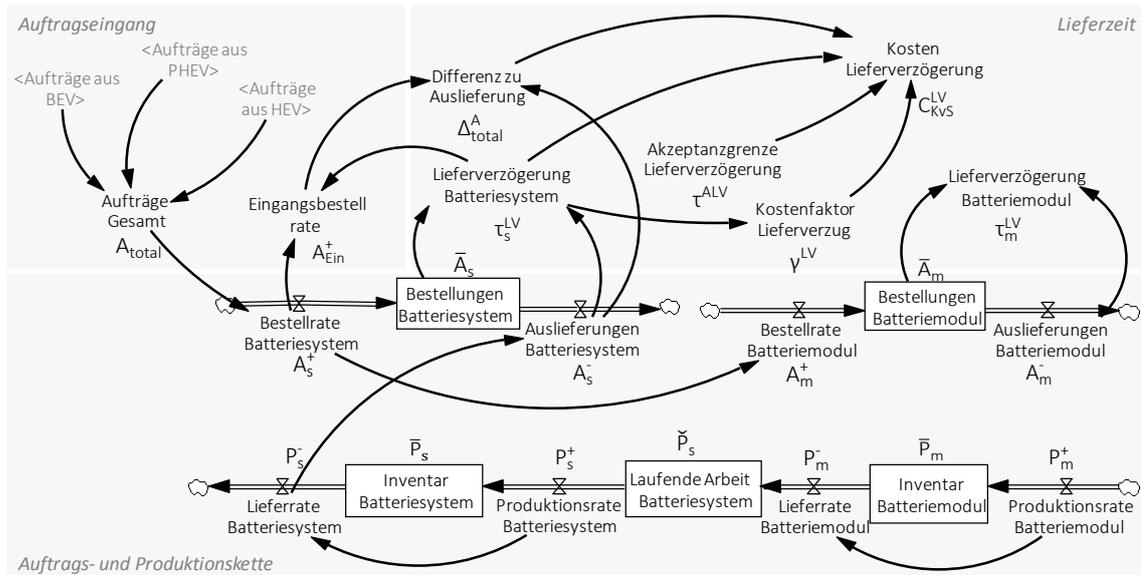


Abbildung 52: Subsektor Produktion mit Fokus Auftragseingang und Lieferzeit

Aus den antriebsspezifischen Aufträgen des Sektors Nachfrage ergibt sich die Gesamtanzahl an eingehenden Aufträgen nach Batteriekapazitäten A_{total} . Diese gehen als konkrete Bestellungen nach fertigen Batteriesystemen in den Modellbereich Auftrags- und Produktionskette ein. Aufträge und Produktion sind dabei entgegen gerichtet und spiegeln die unterschiedlichen Produktionsstufen der Batterieherstellung wider.²⁰³ So wird für die eingehende Zahl an Aufträgen für Batteriesysteme A_s^+ , die entsprechende Zahl an Modulen A_m^+ , Zellen A_z^+ und Elektroden A_e^+ bestellt. Dabei wird unterstellt, dass es zu keinerlei relevanten Verzögerungen bei der Informationsübertragung kommt.²⁰⁴ Die einzelnen Bestellaufträge lösen den Produktionsprozess, je nach verfolgter Fertigungstiefe, mit der Produktion der Elektroden oder der Batteriemodule aus. Im Rahmen des Produktionsprozesses wird entsprechend Kapitel 3.2, von einer Fließfertigung ausge-

²⁰² Die Grundstruktur des Subsektors ist dabei an das Supply-Chain-Modell nach Sterman angelehnt welches eine gängige Form zur Modellierung von Produktionsprozessen darstellt (vgl. Sterman 2000).

²⁰³ Die weiteren Produktionsstufen „Batteriezelle“ und „Batterielektrode“ sind in Abbildung 53 dargestellt.

²⁰⁴ Diese Annahme trifft auch dann zu, wenn im Rahmen einer Strategieoption ein Teil der Produktion (z. B. Zelle oder Elektrode) unternehmensextern erfolgt.

gangen, d.h. die Zwischenprodukte werden ohne nennenswerte Lagerdauer an den nächsten Produktionsschritt weitergereicht. Das finale Produkt ist dabei das zur Auslieferung bereitstehende Batteriesystem (in kWh). Deren Anzahl in kWh wird durch die Lieferrate Batteriesysteme P_s^- gegeben und bestimmt die Menge an auslieferbaren Batteriesystemen A_s^- (mit $A_s^- = P_s^-$). Die Lieferverzögerung τ_s^{LV} kann dann entsprechend Little's Law²⁰⁵ berechnet werden.

$$\tau_s^{LV}(t) = \frac{\bar{A}_s(t)}{(A_s^-(t) + A_{VR}^-(t))} \quad \forall s \in S \quad (7.6)$$

mit:

\bar{A}_s	Aktueller Auftragsbestand an Batteriesystemen	[kWh/Monat]
A_s^-	Aktuelle Auslieferungsrate an Batteriesystemen	[kWh/Monat]
τ_s^{LV}	Lieferzeit bei aktueller Produktionsrate	[Monat]
A_{VR}^-	Kapazitätsbedingte Verluste an Aufträge ²⁰⁶	[kWh/Monat]

Mit Kenntnis der bestehenden Lieferzeit τ_s^{LV} , kann die Menge an Batteriesystemen bestimmt werden, die nicht innerhalb der maximal tolerierbaren Lieferzeit τ^{ALV} ausgeliefert werden kann. Für diese Differenzmenge Δ_{total}^A werden anschließend basierend auf dem Grad der Lieferverzögerung²⁰⁷ γ^{LV} etwaige Strafzahlungen C_{KVS}^{LV} ermittelt. Als Referenz für die Zahlung wird entsprechend γ^{LV} ein Anteil an vergleichbaren Referenzkosten für Batteriekapazitäten auf dem Markt Sz_{Tr}^{Ef} erhoben.²⁰⁸

$$C_{KVS}^{LV}(t) = \begin{cases} \gamma^{LV} \cdot Sz_{Tr}^{Ef}(t) \cdot \Delta_{total}^A(t), & \tau_s^{LV}(t) > \tau^{ALV}(t) \\ 0, & \tau_s^{LV}(t) \leq \tau^{ALV}(t) \end{cases} \quad \forall s \in S \quad (7.7)$$

mit:

C_{KVS}^{LV}	Strafzahlungen für stark überhöhte Lieferverzögerung	[€/Monat]
γ^{LV}	Faktor für den Grad der Lieferverzögerung $\epsilon \in [0,1]$	[Dmnl]
Δ_{total}^A	Differenzmenge von Bestellungen und Lieferungen	[kWh/Monat]
τ^{ALV}	Maximal tolerierbare Lieferzeit	[Monat]

²⁰⁵ vgl. Little 1961

²⁰⁶ Die Variable ist in Abbildung 53 im Bereich „Fehlmenge Kapazitätsdelta“ abgebildet und wird nachfolgend noch näher erläutert. An dieser Stelle müssen sie berücksichtigt werden, da sie nicht in die Produktionsrate mit einfließen.

²⁰⁷ Die Werte sind dabei in einer Tabellenfunktion hinterlegt. Die Beziehung zwischen einer unabhängigen und abhängigen Variablen wird dabei mittels einer Wertetabelle festgelegt (vgl. Ventana 2002).

²⁰⁸ Eine tiefere Erläuterung erfolgt in Kapitel 7.3.4.1

Sz_{Tr}^{Ef} *Erfahrungskurve für LiB-Herstellkosten im Szenario Trend* [€/kWh]

Die Differenz zwischen Bestellungen und Lieferungen lässt sich dabei mit Hilfe der Verzögerungsfunktion f^{VZ} bestimmen. Diese gibt ab dem Zeitpunkt $t = 0$, den Wert der eingehenden Bestellungen A_s^+ wieder, verzögert um die Lieferzeit τ_s^{LV} . Somit kann die Differenz an Batteriekapazitäten bestimmt werden, zwischen der Menge zum Zeitpunkt des Bestelleingangs und der nach der Lieferzeit τ_s^{LV} tatsächlich gelieferten Menge.

$$\Delta_{total}^A(t) = f^{VZ}(A_s^+, \tau_s^{LV}, 0) - A_s^-(t) \quad \forall s \in S \quad (7.8)$$

mit:

$f^{VZ}(A_s^+, \tau_s^{LV}, 0)$ *Verzögerungsfunktion der Bestellrate A_s^+* [kWh/Monat]

A_s^+ *Aktuelle Bestellrate A_s^+* [kWh/Monat]

Während sich der vorherige Modellausschnitt vorrangig auf die Auftragseingänge sowie die Lieferzeit fokussiert, steht im nachfolgenden Abschnitt die Bestimmung der kapazitätsbedingten Fehlmengen und von Produktionsrestriktionen im Mittelpunkt.

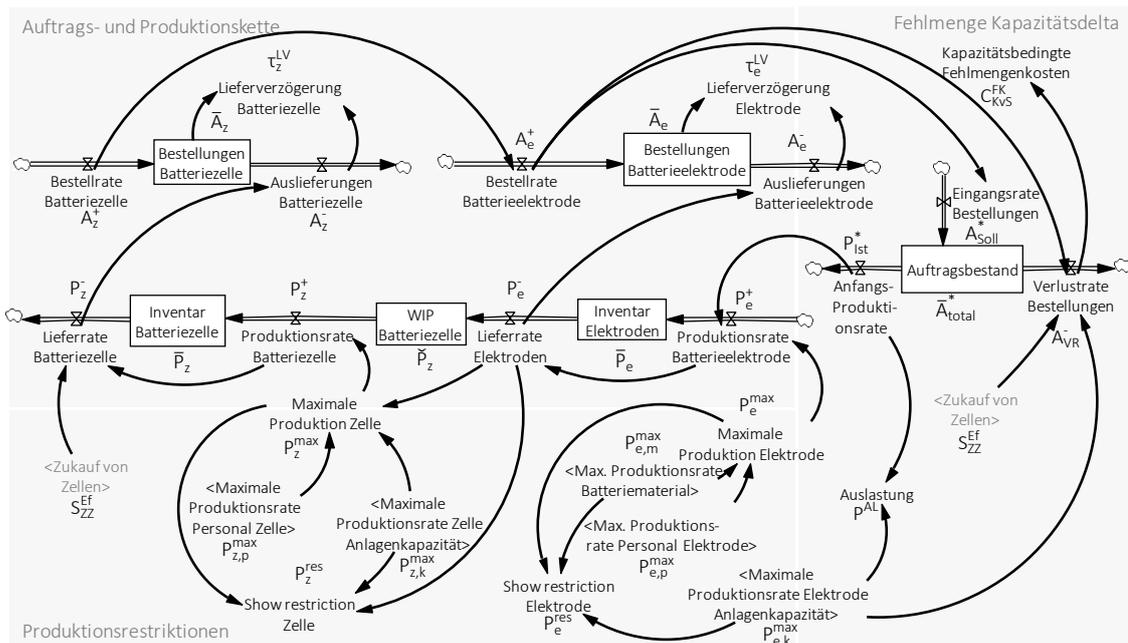


Abbildung 53: Subsektor Produktion mit Fokus auf Produktionsrestriktionen und Fehlmengen

Bestellaufträge, die aus Sicht der verfügbaren Anlagenkapazität zeitlich umsetzbar sind, bilden die Anfangsproduktionsrate P_{Ist}^* für den ersten Produktionsschritt der Elektrodenfertigung. Aufträge, die kapazitätsbedingt nicht bedient werden können A_{VR}^- , gehen nicht in die Produktion ein und müssen extern beschafft werden, wodurch Fehlmengenkosten entstehen C_{KVS}^{FK} . Im Normalfall ist die maximale Produktionskapazität der Elektrodenfertigung ausschlaggebend. Wird jedoch eine Strategie verfolgt, in der Batte-

riezellen zugekauft werden, ausgedrückt durch den Strategieeffekt S_{ZZ}^{Ef} , ist die maximale Produktionskapazität der Modulfertigung entscheidend.

$$C_{KvS}^{FK}(t) = \begin{cases} A_{Soll}^*(t) - p_{e,k}^{max}(t), & S_{ZZ}^{Ef} = 0 \wedge p_{e,k}^{max} < A_{Soll}^* \\ A_{Soll}^*(t) - p_{m,k}^{max}(t), & S_{ZZ}^{Ef} = 1 \wedge p_{m,k}^{max} < A_{Soll}^* \\ 0 & \end{cases} \quad \forall e, m \in W; k \in B \quad (7.9)$$

mit:

C_{KvS}^{FK} Kapazitätsbedingte Fehlmengenkosten [€/Monat]

A_{Soll}^* Eingangsrate an Bestellungen [kWh/Monat]

S_{ZZ}^{Ef} Strategieeffekt Zellzukauf [0= kein Zukauf; 1= Zukauf von Zellen] [kWh/Monat]

$p_{m,k}^{max}$ Maximale Produktionskapazität Modul [kWh/Monat]

$p_{e,k}^{max}$ Maximale Produktionskapazität Elektrode [kWh/Monat]

Die effektive Produktionsrate wird, abgesehen von den bestehenden Produktionskapazitäten, zusätzlich von einer ausreichenden Menge an verfügbaren Materialien $P_{w,M}^{max}$ ²⁰⁹ sowie von verfügbarem Personal $P_{w,P}^{max}$ bestimmt. Kommt es bei einem der genannten Elementarfaktoren zu einem Engpass, reduziert sich die Produktionsrate entsprechend auf dieses Minimum.

$$P_w^{max}(t) = f^{\min}(p_b^{max}(t)) \quad \forall w \in W; b \in B \quad (7.10)$$

mit:

$f^{\min}(p_b^{max})$ Minimale Produktionsrate der potentiell restriktiven Elementarfaktoren b [kWh/Monat]

Die nachfolgende linke Abbildung zeigt exemplarisch den zeitlichen Verlauf der Lieferverzögerung basierend auf der in Abbildung 51 dargestellten Nachfrageentwicklung. Hierbei wurden drei unterschiedliche Strategietypen abgebildet. Zum einen eine Produktionsstrategie, in der Batteriezellen zugekauft werden, zum anderen eine, in der auf die Produktion von Hochleistungsbatterie für HEV verzichtet wird sowie eine Produktionsstrategie mit gänzlicher Abdeckung der Produkte und Prozesse. In der rechten Abbildung ist ergänzend die Entwicklung der Auftragseingänge sowie die tatsächliche Produktionsrate dargestellt.

²⁰⁹ Für die nachfolgenden Produktionsschritte bildet das vorherige Zwischenprodukt einen potentiellen Materialengpass.

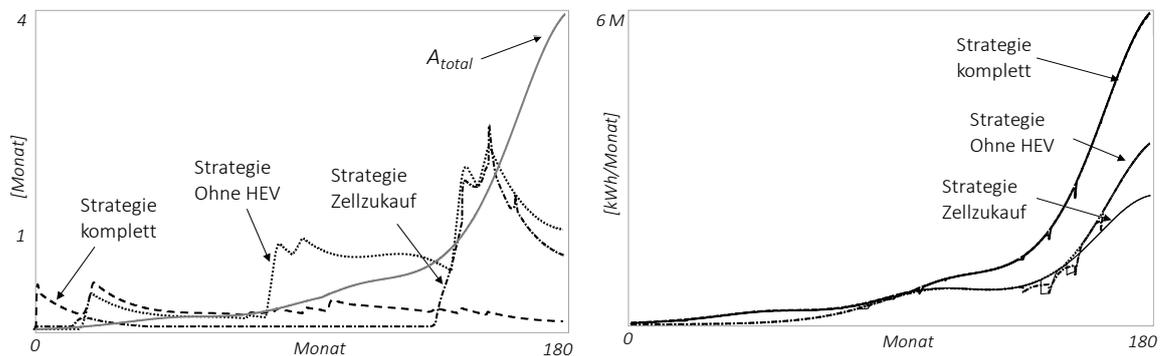


Abbildung 54: Effekte auf die Lieferzeit und der Einfluss von Soll- und Ist-Produktionsrate

Die linke Darstellung verdeutlicht den Effekt unterschiedlicher Strategien auf die Lieferzeit. Bei einem Zukauf von Zellen ist die Lieferzeit entsprechend gering, bis diese in großem Umfang nachgefragt werden. Ebenso ist die Lieferzeit bei einer Produktion ohne HEV-Batterien zu Beginn relativ niedrig und steigt an, sobald die Nachfrage nach PHEV zunimmt. Für die Strategie komplett ist die Lieferzeit kurz- und mittelfristig länger als bei den beiden andern, kann dieses Niveau jedoch auch bei großer Nachfrage halten. Die Effekte, die auf die Lieferzeit wirken, sind ebenfalls in der rechten Abbildung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass zu den Zeitpunkten, in denen ein Peak entsteht, die Produktionsrate von ihrem Soll abweicht.

7.3.2.2 Subsektor Produktionskapazitäten

Der Subsektor Produktionskapazitäten befasst sich mit der kapazitiven Ausgestaltung der Produktionsanlagen und ist im Subsektor Produktion verantwortlich für etwaige Restriktionen in diesem Bereich.

Im Subsektor Produktionskapazitäten werden die Produktionsanlagen²¹⁰ für die einzelnen Produktionsstufen entsprechend der erwarteten Bestellaufträge beschafft. Der Strategieeffekt S_{KA}^{Ef} Kapazitätsaufbau legt dabei fest, welche Kapazitätsstrategie verfolgt wird und somit, ob die Kapazitäten den Aufträgen entsprechend vorrausschauend oder eher zurückhaltend aufgebaut werden. Hierfür wird in festen Planungsperioden der erwartete Kapazitätsbedarf $\Delta K_{w,k}^{An}$ basierend auf der Differenz zwischen installierter Kapazität $K_{w,k}^*$ und der prognosebasierten Kapazitätsaufbaurrate S_{KA}^{Ef} ermittelt und gegebenenfalls der Aufbau neuer Anlagen $A_{w,k}^{An}$ eingeleitet. Dabei wird ebenfalls berücksichtigt, dass die technische Leistungsfähigkeit der Anlagen sich mit der Zeit verbessert, sodass neuinstallierte Anlagen eine höhere Produktionskapazität zu gleichen Investitionen bieten (ausgedrückt durch $\hat{K}_{w,k}^{An}$).

²¹⁰ Der Begriff Produktionsanlagen umfasst dabei alle Anlagen die für die jeweilige Produktionsstufe benötigt werden. Auf eine differenzierte Betrachtung soll an dieser Stelle verzichtet und auf den Subsektor Unternehmensskalierung in Kapitel 7.3.3.1 verwiesen werden.

$$A_{w,k}^{An}(t) = \frac{\Delta K_{w,k}^{An}(t)}{\bar{K}_{w,k}^{An}(t)} \quad \forall w \in W; k \in B \quad (7.11)$$

mit:

$A_{w,k}^{An}$ Anzahl neu zu installierender Produktionsanlagen [Dmn]

$\Delta K_{w,k}^{An}$ Kapazitätsdelta zwischen erwartetem Kapazitätsbedarf und Ist [kWh/Monat]

$\bar{K}_{w,k}^{An}$ Aktuelle Produktionskapazität einer Anlage [kWh/Monat]

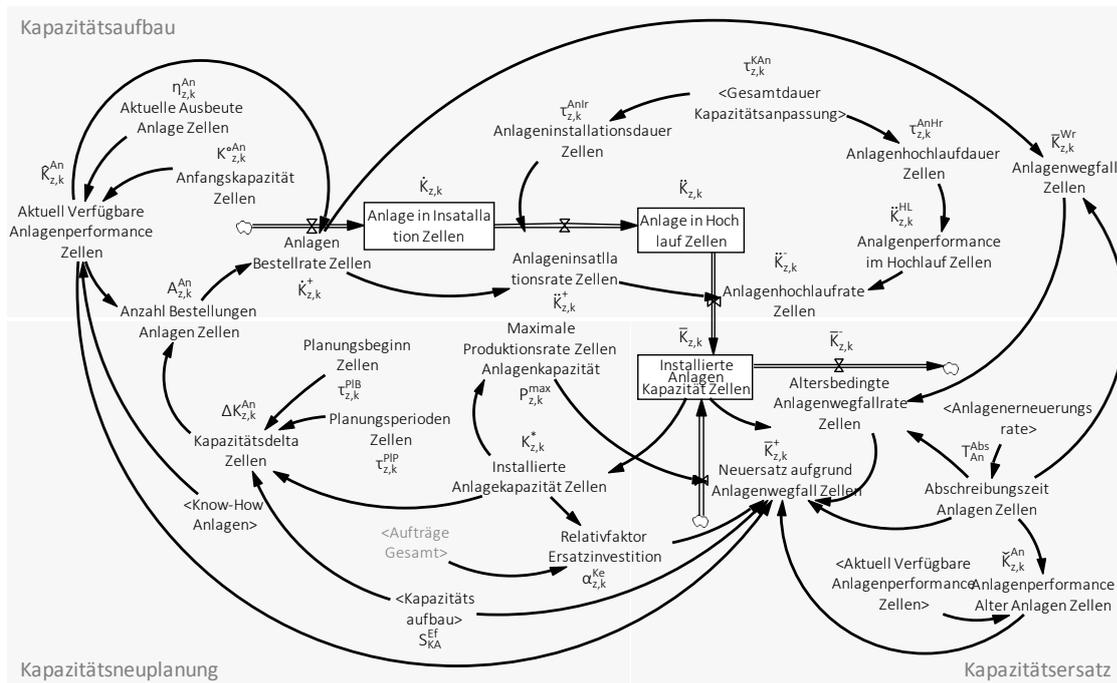


Abbildung 55: Subsektor Produktionskapazität²¹¹

Der Planungsrhythmus $\tau_{w,k}^{PIP}$ entspricht dabei dem Zeitbedarf, der notwendig ist, die Anlagen zu bestellen und zu installieren $\tau_{w,k}^{Anlr}$ sowie bis diese ihre volle Kapazität erreichen $\tau_{w,k}^{AnHr}$. Somit werden die bestellten Anlagen $\dot{K}_{w,k}^+$ nach einer gewissen Verzögerung installiert $\ddot{K}_{w,k}^+$ und befinden sich danach in der Hochlaufphase $\ddot{K}_{w,k}^-$, bis sie komplett eingerichtet sind und ihre volle Kapazität erreicht haben und dem Bestand an Anlagen $\bar{K}_{w,k}$ voll zugerechnet werden. Dieser Bestand definiert gleichzeitig aus Sicht der Produktionskapazitäten die maximal mögliche Produktionsmenge an Batteriekapazitäten $p_{w,k}^{max}$ und stellt somit eine der drei potentiellen Restriktion im Subsektor Produktion dar.

²¹¹ Die Abbildung bildet exemplarisch den Modellbereich für die Produktionsstufe der Zelle (Index z) ab. Die Darstellung für die Wertschöpfungsstufen der Elektrode, des Moduls und des Batteriesystems sind identisch aufgebaut. Für die Erläuterung des Subsektors wird daher der Index w verwendet.

$$\bar{K}_{w,k}(t) = \bar{K}_{w,k}(t_0) + \int_t^{\cdot} \bar{K}_{w,k}^-(t) dt - \int_t^{\cdot} \bar{K}_{w,k}^-(t) dt + \int_t^{\cdot} \bar{K}_{w,k}^+(t) dt \quad (7.12)$$

$$\forall w \in W; k \in B$$

mit:

$\bar{K}_{w,k}$ *Installierte Anlagenkapazität der Produktionsstufe w* [Dmnl]

$\bar{K}_{w,k}^-$ *Produktionskapazitäten von Anlagen im Hochlauf* [kWh/Monat]

$\bar{K}_{w,k}^+$ *Ersatzinvestitionen aufgrund von Obsoleszenz* [kWh/Monat]

$\bar{K}_{w,k}^-$ *Obsoleszenz von Produktionskapazitäten* [kWh/Monat]

Innerhalb des Anlagenbestands veralten Anlagen mit der Zeit T_{An}^{Abs} und scheiden mit der Rate $\bar{K}_{z,k}^-$ aus, wodurch Ersatzinvestitionen $\bar{K}_{z,k}^+$ notwendig werden. Die alten Anlagen werden dabei im Turnus von T_{An}^{Abs} durch technisch leistungsfähigere neue Anlagen ausgetauscht. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Anlagenutzungsdauer der kalkulatorischen Abschreibungsdauer entspricht. Veraltete Anlagen werden jedoch nur dann ersetzt, wenn auch der Bedarf an diesen Kapazitäten besteht, ansonsten erfolgt keine Ersatzinvestition.

$$\bar{K}_{w,k}^+(t) = \begin{cases} \frac{\bar{K}_{w,k}^-}{\bar{K}_{w,k}^{An}} \cdot \bar{K}_{z,k}^{An}, & p_{w,k}^{max} \leq S_{KA}^{Ef} \\ \frac{\bar{K}_{w,k}^-}{\alpha_{z,k}^{Ke}}, & p_{w,k}^{max} > S_{KA}^{Ef} \end{cases} \quad \forall z \in W; k \in B \quad (7.13)$$

mit:

$\bar{K}_{w,k}^{An}$ *Anlagenleistung alter Anlagen* [kWh/Monat]

$\alpha_{z,k}^{Ke}$ *Relativfaktor zur Anpassung der Ersatzinvestitionen* [Dmnl]

S_{KA}^{Ef} *Strategieeffekt Kapazitätsaufbau* [kWh/Monat]

Die nachfolgende linke Abbildung zeigt die Auswirkung unterschiedlicher Kapazitätsstrategien auf den Kapazitätsaufbau, bei stetig wachsender Nachfrage. Während bei der Lead-Strategie stets ausreichend Produktionskapazitäten vorgehalten werden, pendeln die Kapazitäten bei der Match-Strategie um den Verlauf der Nachfrage. Bei der Follow-Strategie laufen die Kapazitäten dagegen stets hinterher.

Im linken Bereich der nachfolgende Abbildung 56 zeigt die installierte Anlagenkapazität $\bar{K}_{w,k}$ in Abhängigkeit der erwarteten Auftragseingänge sowie die damit einhergehende Bestellrate an Anlagen $\dot{K}_{w,k}^+$. Diese richtet sich wie bereits erwähnt nach der verfolgten Kapazitätsstrategie S_{KA}^{Ef} . Die Abbildung verdeutlicht, dass bei einer Unterschreitung der

prognostizierten Nachfrage entsprechende Bestellungen ausgelöst werden und nach einem zeitliche Versatz, entsprechend dem Zeitraum zum Aufbau der Anlagen,²¹² die Kapazitäten in dem Maße angepasst sind, dass sie die aktuelle Nachfrage bedienen können. Entwickelt sich die Nachfrage nicht wie erwartet, entstehen Überkapazitäten, die erst nach der Abschreibungszeit der Anlagen wieder abgebaut werden können. In der Abbildung ist dieser Effekt durch den stufenweisen Kapazitätsabbau in der Mitte des Simulationslaufs zu erkennen.

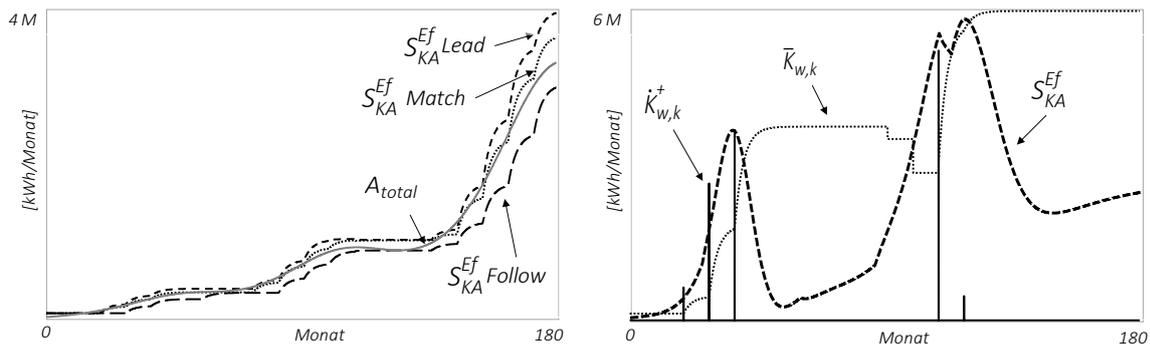


Abbildung 56: Kapazitätsausbau entsprechend unterschiedlicher Kapazitätsstrategien (links) und Kapazitätsaufbau bei einem dynamischen Nachfrageverlauf (rechts)

7.3.2.3 Subsektor Material

Der Subsektor Material befasst sich mit der termingerechten Akquise der notwendigen Rohstoffen und Komponenten zur Batteriesystemproduktion. Das Batteriematerial fungiert hierbei jedoch nur für den ersten Produktionsschritt der Elektrodenfertigung als limitierender Faktor. Für die weiteren Produktionsstufen werden zwar die notwendigen Materialien mit in die Beschaffung einbezogen, die aus Materialsicht maximal mögliche Produktion wird hierbei jedoch primär durch die Verfügbarkeit der Vorprodukte determiniert. Der Fokus soll daher auf deren Verfügbarkeit liegen.

Das Modell ist angelehnt an den beschaffungsrelevanten Teil des Supply-Chain-Modells von Sterman (vgl. Sterman 2000). Ausgehend von der erwarteten Nachfrage nach Batteriesystemen sowie dem spezifischen Materialbedarf pro kWh B_m^{kWh} wird die notwendige Menge an Materialien bestimmt. Die tatsächliche Bestellmenge M_m^+ bezieht neben dem geplanten Bedarf M_m^{An} zusätzlich den aktuellen Lagerbestand \bar{M}_m sowie die gewünschte Lagerreichweite von einem Monat T_m^{Lr} mit ein.

²¹² Der Prognosezeitraum entspricht dem dazu benötigten Zeitraum.

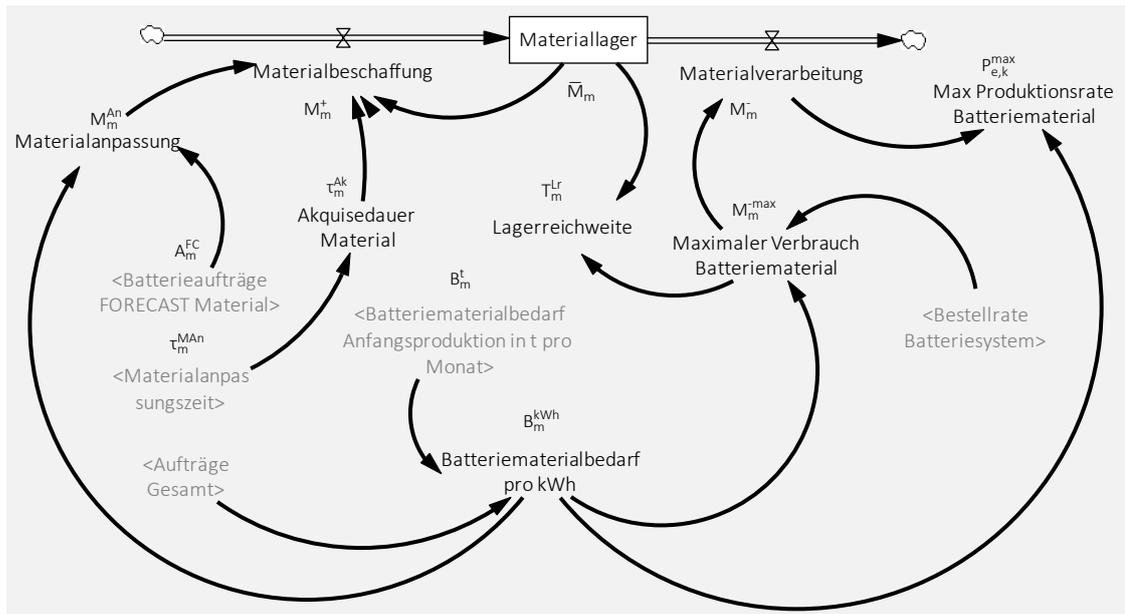


Abbildung 57: Modellstruktur des Subsektors Material

$$M_m^+(t) = f^{VZ}(M_m^{An}(t) + M_m^{Ar}(t), \tau_m^{Ak}) \quad \forall m \in B \quad (7.14)$$

$$M_m^{Ar}(t) = \begin{cases} -\frac{\bar{M}_m(t)}{T_m^{Lr}(t)}, & T_m^{Lr}(t) > 1 \\ \frac{\bar{M}_m(t)}{T_m^{Lr}(t)}, & T_m^{Lr}(t) \leq 1 \end{cases} \quad \forall m \in B \quad (7.15)$$

mit:

M_m^+ Materialbeschaffungsrate [kg/Monat]

M_m^{An} Geplante Materialanpassung [kg/Monat]

τ_m^{Ak} Akquisedauer für Materialanpassung [Monat]

\bar{M}_m Aktueller Lagerbestand [kg]

T_m^{Lr} Aktuelle Lagerreichweite [Monat]

Die maximal mögliche Produktionsrate $P_{e,k}^{max}$ unter Berücksichtigung des Materialaspekts ergibt sich anschließend aus der Materialverarbeitungsrate M_m^- und dem Materialbedarf an kWh B_m^{kWh} .

$$P_{e,k}^{max}(t) = \frac{M_m^-(t)}{B_m^{kWh}(t)} \quad \forall e \in W; m \in B \quad (7.16)$$

mit:

$P_{e,k}^{\max}$	Maximale Produktionsrate unter Materialaspekt	[kWh/Monat]
M_m^-	Materialverarbeitungsrate	[kg/Monat]
B_m^{kWh}	Materialbedarf je kWh	[kg/kWh]

Die nachfolgende Abbildung 58 stellt links die Materialbeschaffungs- und Materialverarbeitungsrate den bereits in Kapitel 7.3.2.1 verwendeten drei Strategietypen bei einer stetig wachsenden Nachfrage gegenüber.

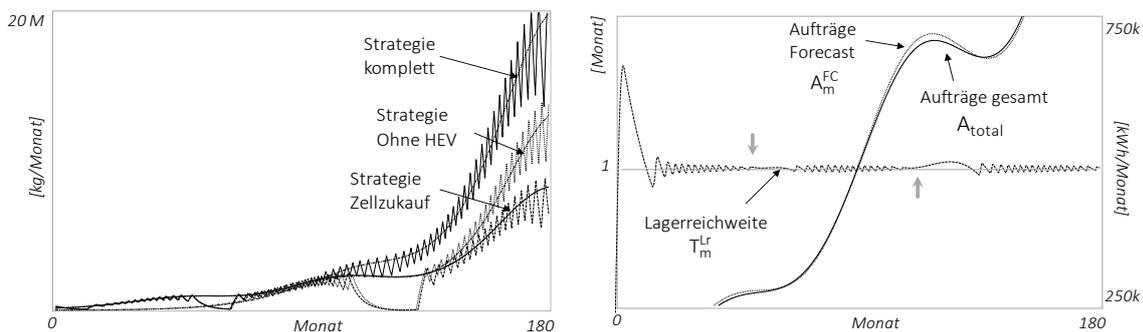


Abbildung 58: Materialbeschaffungs- und Verarbeitungsrate und deren Auswirkung auf die Lagerreichweite

Es ist zu erkennen, wie die Verarbeitungsrate konstant bleibt, während die Beschaffungsrate in Abhängigkeit des Lagerbestandes darum pendelt. Auffallend ist der Effekt, dass bei der Strategie mit Zellzukauf und ohne HEV- Batteriekapazitäten die Beschaffungsrate teilweise bis auf Null sinkt. Dieser Effekt wird in der rechten Abbildung erläutert. Hier ist die Lagerreichweite für die Strategie mit Zellzukauf dargestellt. Diese schwankt entsprechend der Materialbeschaffung um den gewünschten Wert von einem Monat. Zum gleichen Zeitpunkt, in dem die Beschaffungsrate im linken Bild auf Null sinkt, ist zu erkennen, dass die Lagerreichweite eine Zeitlang über dem angestrebten Wert verweilt. Der Grund hierfür wird sichtbar bei einem Vergleich des Verhältnisses der ausschnittsweise dargestellten Bestellmenge und prognostizierten Bestellmenge. Die zu diesem Zeitpunkt erwartete Bestellmenge und somit auch die entsprechende Materialakquisierate liegen über dem tatsächlichen Wert. Die Materialbeschaffungsrate im linken Bild sinkt daher so lange ab, bis das überschüssige Material verbraucht ist und die Lagerreichweite von einem Monat wieder erreicht wird.

7.3.2.4 Subsektor Personal

Der Subsektor Personal bildet den letzten potentiell restriktiven Elementarfaktor für die Produktion von Batteriesystemen ab.

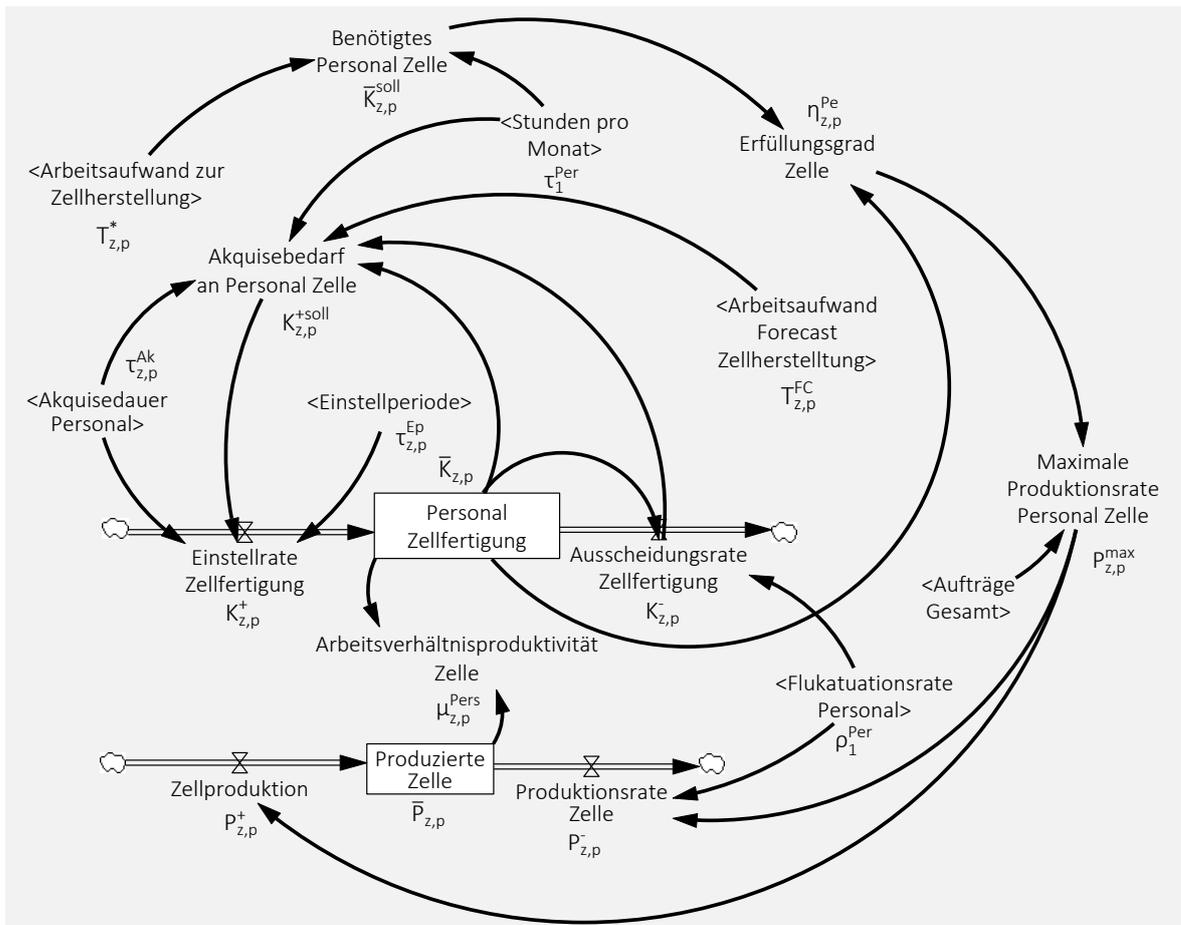


Abbildung 59: Modellstruktur des Subsegments Personal

Ausgehend von dem ermittelten Arbeitsaufwand je Produktionsstufe²¹³ $T_{w,p}^*$ sowie der landesspezifischen monatlichen Arbeitszeit τ_1^{per} , wird die Gesamtanzahl an benötigtem Personal bestimmt $\bar{K}_{w,p}^{soll}$. Die maximale mögliche Produktionsrate aus Sicht der Personalverfügbarkeit $P_{w,p}^{max}$ ergibt sich dabei aus dem Produkt der Bestellaufträge und einem Faktor Erfüllungsgrad $\eta_{w,p}^{pe}$, der den Quotienten aus dem verfügbaren Personalbestand $\bar{K}_{w,p}$ und dem benötigten Personal darstellt. Der Personalbestand lässt sich auf Basis der landesspezifischen fluktuationsbedingten Ausscheidungsrate $K_{w,p}^-$ und der Einstellungsrate $K_{w,p}^+$ berechnen.

$$\bar{K}_{w,p}(t) = \bar{K}_{w,p}(t_0) + \int_t (K_{w,p}^+(t)) dt - \int_t (K_{w,p}^-(t)) dt \quad \forall w \in W; p \in B \quad (7.17)$$

²¹³ Es handelt sich dabei um eine Schattenvariable, die im Subsektor Unternehmensskalierung erhoben wird und die ebenda nochmals eingehender erläutert wird.

mit:

$\bar{K}_{w,p}$ Personalbestand in der Produktionsstufe w [Personal]

$K_{w,p}^+$ Personaleinstellungsrate [Personal/Monat]

$K_{w,p}^-$ Personalauscheidungsrate [Personal/Monat]

Die Einstellungsrate richtet sich nach dem prognostizierten Bedarf an Personal $K_{w,p}^{+soll}$, unter Berücksichtigung des bereits bestehenden Bestands sowie der durchschnittlichen Fluktuation über der Personalakquisedauer $\tau_{w,p}^{Ep}$.

$$K_{w,p}^+(t) = f^{VZ}(K_{w,p}^{VZ+}(t), \tau_{w,p}^{Ak}) \quad \forall w \in W; p \in B \quad (7.18)$$

$$K_{w,p}^{VZ+} = \begin{cases} \frac{K_{w,p}^{+soll}}{\tau_{w,p}^{Ep}}, & \frac{K_{w,p}^{+soll}}{\tau_{w,p}^{Ep}} \geq 1 \\ 0 & \end{cases} \quad \forall w \in W; b \in B \quad (7.19)$$

mit:

$K_{w,p}^{+soll}$ Akquisebedarf an Personal [Personal/Monat]

$\tau_{w,p}^{Ep}$ Akquisedauer Personal [Monat]

Die nachfolgende linke Abbildung verdeutlicht das Verhältnis von Personalbedarf $\bar{K}_{w,p}^{soll}$ und Bestand $\bar{K}_{w,p}$ sowie den sich daraus ergebenden Erfüllungsgrad $n_{w,p}^{Pe}$.

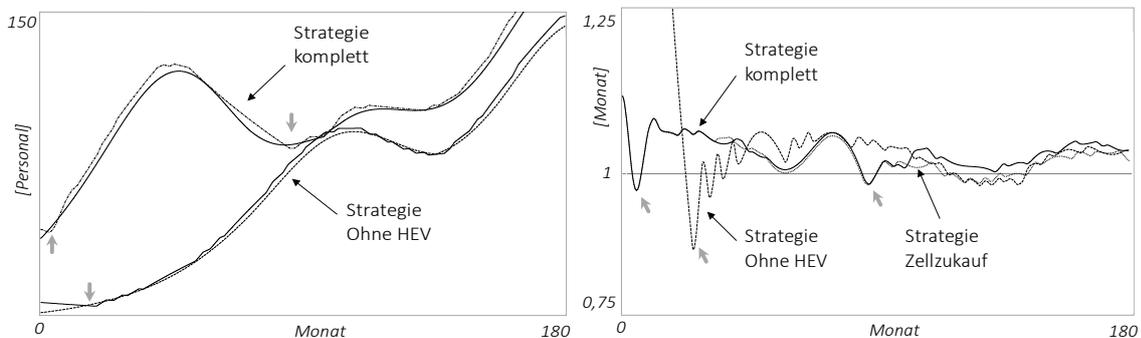


Abbildung 60: Personalbedarf und Bestand und resultierender Erfüllungsgrad

Auf der linken Abbildung ist der geringere Bedarf an Personal zu erkennen, der sich daraus ableitet, dass keine HEV-Batterien gefertigt werden. Der Bedarf steigt auch erst zeitverzögert mit wachsender Nachfrage nach PHEV- und BEV-Batterien an. Ist der Bestand gleich dem Bedarf, ergibt sich daraus ein Erfüllungsgrad von eins. An den mit Pfeilen gekennzeichneten Stellen unterschreitet der Bestand den Bedarf. Der Effekt kann auf der rechten Abbildung eingesehen werden. Zu den Zeitpunkten, bei denen es zu einer Unterschreitung kommt, sinkt der Erfüllungsgrad unter den Wert von eins, wodurch es zu einer Verknappung an Personalkapazitäten kommt.

7.3.2.5 Subsektor Recycling

Das letzte Subsegment des Sektors Wertschöpfungs-system bildet das Recyclingmodell. Dabei handelt es sich um einen Strategieeffekt, d.h. es ist optionaler Bestandteil der Produktionsstrategie und wird bei der Wahl der Fertigungstiefe im Rahmen einer Vorwärtsintegration mitberücksichtigt. Modelliert wird ein hydrometallurgischer Recyclingprozess von Fahrzeugbatterien mit NMC-Aktivmaterial.²¹⁴

Während für das Recycling von Starter- oder Gerätebatterien bereits Ansätze zur Reverse-Logistics bestehen (vgl. Schultmann et al. 2003), ist der aktuelle Stand der Forschung zum Recycling von LiB aufgrund der Neuartigkeit und aktuell noch geringen praktischen Relevanz noch auf einer wenig konkreten Ebene. Entsprechend gibt es derzeit auch keine Anlagen zum Recycling von LiB in großem Maßstab. Um dennoch eine ungefähre Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit von LiB-Recycling zu erhalten, wurde das Modell auf Basis von Informationen aus dem Forschungsprojekt „LithoRec“ erstellt (vgl. Kwade und Bärwaldt 2012). Der Problematik, dass mit Ausnahme einer hydrometallurgischen Aufbereitungsanlage keinerlei Informationen zu einzelnen Anlagenkosten vorliegen, wird im Rahmen des Projekts durch eine Schätzung der Investitionen begegnet. Hierfür werden sowohl summarische als auch Faktormethoden verwendet. Diese weisen in der Regel eine Fehlerbreite von 20-30 % auf (vgl. Peters et al. 2003). Die Ergebnisse der Schätzung und der Simulation sind entsprechend dieser Unsicherheit zu interpretieren. Das Subsegment und die Thematik des Recyclings von LiB stellen jedoch nicht den Schwerpunkt dieser Arbeit dar und sollen lediglich eine Orientierung bieten. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse des Recyclings stets vor diesem Hintergrund und der insgesamt vorliegenden Unsicherheit betrachtet werden, weshalb eine solche Fehlerbreite unter diesen Aspekten als akzeptabel²¹⁵ erscheint.

Die Berechnung der jahresbezogenen Kosten der Recyclingprozesskette werden dabei durch einen stoff- und energiestromorientierten Ansatz ermittelt (vgl. Rentz 1979; Remmers 1991). Entsprechend zeigt der Ausschnitt des Subsegments²¹⁶ in Abbildung 61 zum einen die Bereiche des Recyclingaufkommens sowie den hydrometallurgischen Recyclingprozess. Zum anderen werden auch zwei Bereiche dargestellt, die zur Berechnung des Prozessdeckungsbeitrags $DB_{\text{total}}^{\text{R}*}$ und der Fixkosten $C_{\text{total}}^{\text{R}}$ dienen.

²¹⁴ vgl. hierzu Kapitel 3.1.3

²¹⁵ Für eine detailliertere Abhandlung des Recyclings von LiB sei an dieser Stelle auf Kwade und Bärwaldt 2012 verwiesen, deren Arbeit als Grundlage für die Modellierung und Parametrisierung dieses Subsegmentes dient, sowie auf Hoyer 2015.

²¹⁶ Dabei sind alle relevanten Bereiche dargestellt. Das Gesamtmodell umfasst neben dem „Demontagewerk“ noch die Stufen „Mechanisches Aufbereitungswerk“ und „Hydrometallurgische Aufbereitung“, die jeweils die gleiche Modellstruktur wie das „Demontagewerk“ aufweisen und aus diesem Grund der Übersicht wegen nicht zusätzlich dargestellt sind.

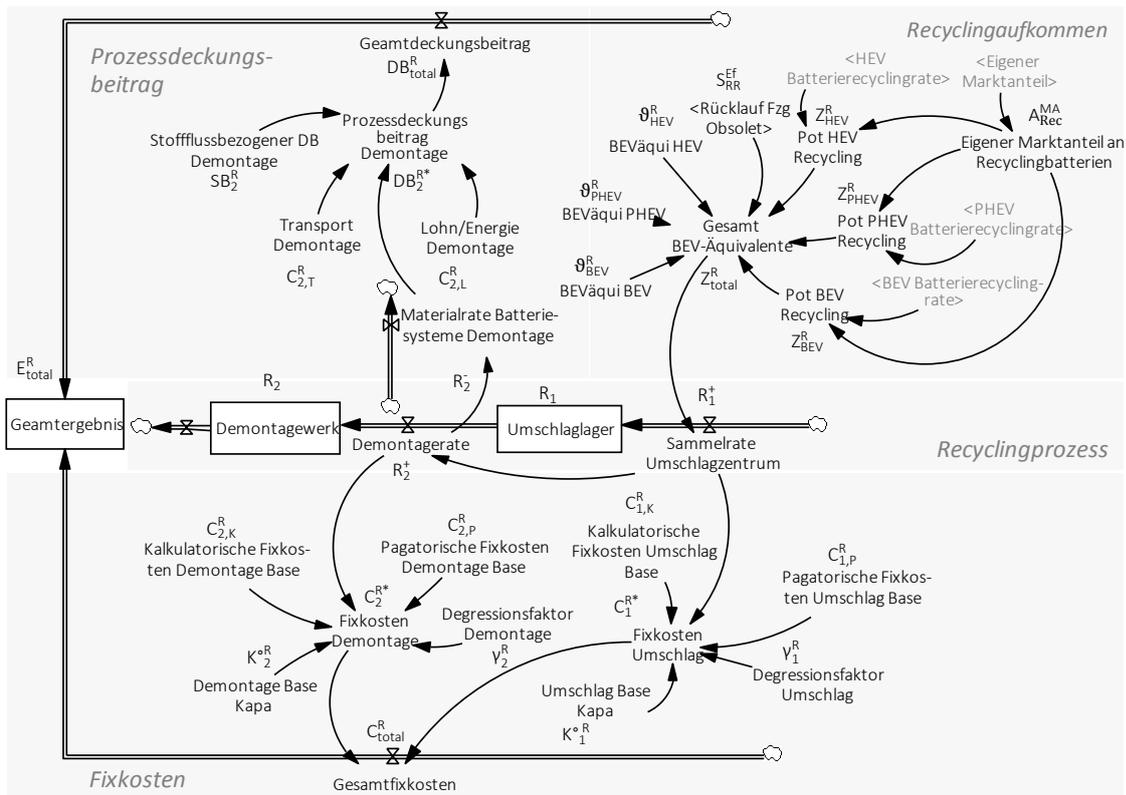


Abbildung 61: Ausschnitt des Subsegments Recycling

Das wirtschaftliche Ergebnis des Batterierecyclings E_{total}^R lässt sich somit wie folgt bestimmen:

$$E_{total}^R(t) = E_{total}^R(t_0) + \int_{t_0}^{t_e} (DB_{total}^{R*}(t) - C_{total}^R(t)) dt \quad (7.20)$$

$$DB_{total}^{R*}(t) = \sum_r DB_r^{R*}(t) \quad \forall r \in R \quad (7.21)$$

$$C_{total}^R(t) = \sum_r C_r^R(t) \quad \forall r \in R \quad (7.22)$$

mit:

- E_{total}^R Ergebnis des Batterierecyclings [€]
- DB_{total}^{R*} Prozessdeckungsbeitrag [€/Monat]
- DB_r^{R*} Spezifischer Prozessdeckungsbeitrag einer Recyclingstufe r [€/Monat]
- C_{total}^R Fixkosten der Recyclinganlagen [€/Monat]
- C_r^R Spezifische Fixkosten einer Recyclinganlage r [€/Monat]

Der spezifische Prozessdeckungsbeitrag der einzelnen Recyclingstufen DB_r^{R*} berechnet sich aus dem stoffflussbezogenen Deckungsbeitrag SB_r^R , abzüglich der Personalkosten $C_{r,L}^R$ und Transportkosten $C_{r,T}^R$, multipliziert mit der spezifischen Materialrate R_r^- .

$$DB_r^{R*}(t) = (SB_r^R(t) - C_{r,L}^R(t) - C_{r,T}^R(t)) \cdot R_r^-(t) \quad \forall r \in R \quad (7.23)$$

mit:

SB_r^R *Stoffflussbezogener Deckungsbeitrag der Recyclingstufe r* [€/Monat]

$C_{r,L}^R$ *Personalkosten einer Recyclingstufe r* [€/t]

$C_{r,T}^R$ *Transportkosten einer Recyclingstufe r* [€/t]

R_r^- *Spezifischen Materialrate einer Recyclingstufe r* [t/Monat]

Die Fixkosten der spezifischen Recyclingstufen ergeben sich aus der Summe der kalkulatorische Kosten²¹⁷ $C_{r,K}^R$ und pagatorische Kosten²¹⁸ $C_{r,P}^R$. Da mit steigender Anlagenkapazität die Fixkosten unterproportional ansteigen, werden bei deren Berechnung eintretende Skaleneffekte berücksichtigt.²¹⁹ Dies erfolgt anhand eines Größendegressionskoeffizient p_r^R und dem Verhältnis zwischen der potentiellen Recyclingrate einer neuen Anlage R_r^+ sowie der einer Referenzanlage K_r^{oR} .

$$C_r^R(t) = (C_{r,K}^R(t) + C_{r,P}^R(t)) \cdot \left(\frac{R_r^+(t)}{K_r^{oR}} \right)^{p_r^R} \quad \forall r \in R \quad (7.24)$$

mit:

$C_{r,K}^R$ *Kalkulatorische Kosten einer Recyclinganlage r* [€/Monat]

$C_{r,P}^R$ *Pagatorische Kosten einer Recyclinganlage r* [€/Monat]

R_r^+ *Potentielle Recyclingrate einer Anlage r* [BEVäqui/Monat]

K_r^{oR} *Recyclingrate einer Referenzanlage r* [BEVäqui/Monat]

p_r^R *Größendegressionskoeffizient für eine Recyclinganlage r* [Dmnl]

²¹⁷ Die kalkulatorischen Kosten setzen sich aus den kalk. Zinskosten und Abschreibungen zusammen.

²¹⁸ Die pagatorischen Kosten umfassen Instandhaltung & Reparatur, investitionsbezogene Versicherung und Verwaltung, Betriebsnebenkosten sowie Führungspersonalkosten und sonstige Gemeinkosten.

²¹⁹ Auf die Funktion von Größendegressionseffekten wird im Subsegment „Unternehmensskalierung“ nochmals ausführlicher eingegangen.

Die Größe der jeweiligen Recyclingstufen richtet sich dabei nach der jeweils vorgelagerten Recyclingstufe, wobei alle stets in gleichem Maße erweitert werden. Ausschlaggebend für einen Ausbau ist die eingehende Menge an recyclebaren Batteriesystemen Z_{total}^R . Die Gesamtanzahl der Batterien ergibt sich dabei zum einen aus dem eigenen Marktanteil zum Zeitpunkt der Produktion des obsoleten Batteriesystems $A_{\text{Rec}}^{\text{MA}}$ sowie aus der aktuellen Rücklaufquote an Batteriesystemen Z_a^R . Zur einfacheren Handhabung der Batteriesysteme unterschiedlicher Antriebsarten wurde entsprechend (vgl. Kwade und Bärwaldt 2012) ein Umrechnungsfaktor eingeführt, der die jeweiligen Batteriesysteme in BEV-Äquivalente umrechnet.²²⁰ Die Rücklaufquoten multipliziert mit diesen Äquivalenzfaktoren ϑ_a^R und einer landesspezifischen Rücklaufquote $S_{\text{RR}}^{\text{Ef}}$, ergibt somit das Gesamtrecyclingaufkommen für die Anlage.

$$Z_{\text{total}}^R = S_{\text{RR}}^{\text{Ef}} \cdot \sum_a \vartheta_a^R \cdot Z_a^R \quad \forall a \in A \quad (7.25)$$

$$Z_a^R = \sum_a A_a^{\text{Rec}+} \cdot A_{\text{Rec}}^{\text{MA}} \quad \forall a \in A \quad (7.26)$$

$$\vartheta_a^R = \begin{cases} 1/10, & a = \text{HEV} \\ 1/3, & a = \text{PHEV} \\ 1, & a = \text{BEV} \end{cases} \quad \forall a \in A \quad (7.27)$$

mit:

Z_{total}^R	Recyclingaufkommen von Batteriesystemen	[BEVäqui/Monat]
$S_{\text{RR}}^{\text{Ef}}$	Strategieeffekt landesspezifischen Rücklaufquote r	[Dmnl]
ϑ_a^R	Äquivalenzfaktor für Batterien der Antriebsform a	[BEVäqui/Fzg]
Z_a^R	Rücklaufquote an Batteriesystemen der Antriebsform a	[Fzg/Monat]
$A_a^{\text{Rec}+}$	Batterierecyclingrate der Antriebsform a	[Fzg/Monat]
$A_{\text{Rec}}^{\text{MA}}$	Marktanteil zum Zeitpunkt der Produktion des obsoleten Batteriesystems	[Dmnl]

Nachfolgende Abbildung zeigt links exemplarisch den Rücklauf von Batteriesystemen unterschiedlicher Antriebsarten unter verschiedenen Strategietypen. Rechts ist das daraus resultierendem Ergebnis des Recyclingprozesses abgebildet.

²²⁰ Für HEV wurde der Faktor 1/10 erhoben und für PHEV 1/3. Für PHEV weicht hierbei der Faktor von den Annahme aus Kwade und Bärwaldt 2012 ab, die vom Faktor 1/2 ausgehen. Der Grund hierfür liegt in der geringeren Batteriekapazität der in dieser Arbeit verwendeten Referenzbatterie für PHEV.

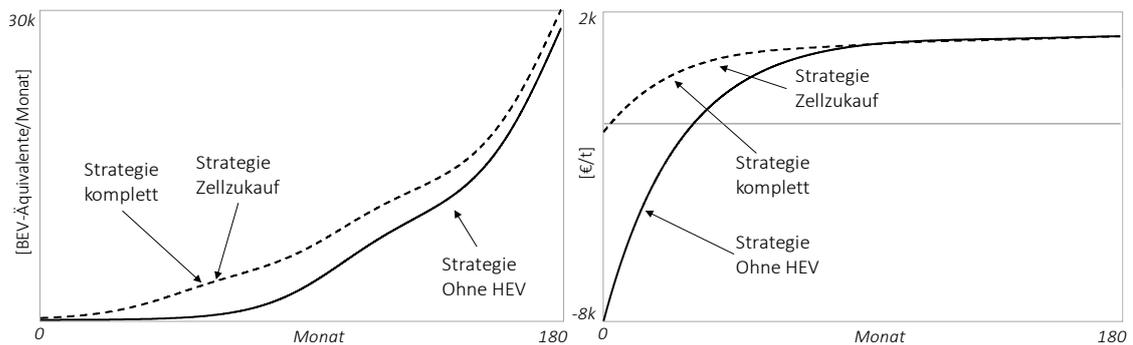


Abbildung 62: Recyclingrate von BEV-Äquivalenten und Ergebnis in €/t für verschiedene Strategietypen

Der Effekt eines Verzichts auf die HEV-Produktion zeigt sich in der linken Abbildung, bei der sich für den entsprechenden Strategietypen erst mittelfristig eine größere Recyclingrate einstellt. Entsprechend verzögert sich auch das Erreichen eines positiven Ergebnisses, das bei einem Strategietypen mit HEV-Batteriesystemen deutlich früher erreicht wird.²²¹

7.3.3 Sektor Unternehmensentwicklung

Der Sektor Unternehmensentwicklung stellt die zentrale Datenkomponente des Modells dar. In den drei Subsegmenten sind die wesentlichen Parameter und Rechenoperationen zur adäquaten Modellierung des Unternehmenswachstums abgebildet. Der Subsektor „Material- und Komponentenbedarf“ dient hierbei der Berechnung der notwendigen Materialien zur Erfüllung der Nachfrage. Dieser Materialbedarf bildet ferner die Grundlage für die Berechnung der „Material- und Komponentenkosten“ im gleichnamigen Subsegment. Das dritte Subsegment „Unternehmensentwicklung“ befasst sich mit der produktionsadäquaten Gestaltung der Betriebsgröße unter Beachtung von Skaleneffekten. Das Subsegment umfasst dabei die Gestaltung des Personalbestands, der Anlagenkapazität sowie der Werksfläche.

7.3.3.1 Sektor Unternehmensskalierung

Das Subsektor Unternehmensskalierung bestimmt auf Grundlage der eingehenden Aufträge für jeden einzelnen der in Kapitel 3.2 beschriebenen direkten oder indirekten Prozessschritte den hierzu notwendigen Arbeitsaufwand sowie die entsprechenden Produktionskapazitäten und die entsprechend benötigte Werksfläche. Der Subsektor besteht somit streng genommen aus drei weiteren Untersektoren, die jedoch eine ähnliche Modellstruktur aufweisen. Bei den jeweiligen Anpassungen werden sowohl dynamische Skaleneffekte im Sinne einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Ausbeu-

²²¹ An dieser Stelle soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass bei der Berechnung keine Kosten für die Akquise der Recyclingbatterien berücksichtigt werden.

te, als auch statische Skaleneffekte berücksichtigt. Insbesondere letztere sind von großer Bedeutung bei der Modellierung dieses Subsegments, da bei einer Erhöhung der Auftrags- und Produktionsmenge die Investitionen nur unterproportional in Abhängigkeit der Kapazitäten einzelner Anlagen zunehmen. Dieser Effekt beschränkt sich dabei jedoch nicht allein auf Anlagen sondern kann auch auf das Personal²²² und die Gebäudelfläche²²³ übertragen werden (vgl. Corsten 2007; Remmers 1991). Die Berechnung der Investition für eine Anlage mit höherer Kapazität, lässt sich dabei, unter Kenntnis der Investition und Kapazität einer bekannten Anlage, mit Hilfe des Größendegressionskoeffizienten berechnen (vgl. Chauvel 2003).

$$I(t) = I_0 \cdot \left(\frac{K(t)}{K_0} \right)^p \quad (7.28)$$

mit:

I	<i>Investition für eine Anlage mit neuer Kapazität</i>	[€]
I_0	<i>Investition für eine Anlage mit bekannter Kapazität</i>	[€]
K_0	<i>Kapazität der bekannten Anlage</i>	[Stk]
K	<i>Kapazität der neuen Anlage</i>	[Stk]
p	<i>Größendegressionskoeffizient</i>	[Dmnl]

Entsprechend dieser Formel wird für jeden einzelnen der 24 Prozessschritte zur Herstellung einer LiB, der hierzu notwendige Arbeitsaufwand in Arbeitsstunden, die Investitionen in Produktionskapazitäten sowie der Flächenbedarf in Quadratmetern in Abhängigkeit der eingehenden Produktionsaufträge bestimmt.²²⁴ Aus Gründen der Übersicht und da die Modellstrukturen sich ähneln, beschränken sich die nachfolgenden Erläuterungen auf die Anpassung der Produktionskapazitäten. Während der Fokus im gleichnamigen Subsegment auf der mengenmäßigen Anpassung lag, stehen hier die Investitionen für die Kapazitätsanpassung im Vordergrund.

²²² Für die Bedienung oder Instandhaltung einer Anlage größerer Kapazität wird bspw. ein geringeres Verhältnis an Personal benötigt.

²²³ Die Grundfläche einer Anlage sowie deren indirekter Flächenbedarf entwickeln sich unterproportional zu deren Produktionskapazität.

²²⁴ Die Ursprungsinvestitionen für eine Anlage sowie die für die Bestimmung der Kapazität zugrundeliegende Referenzmenge an zu bearbeitenden Material, wurden für die einzelnen Produktionsschritte bereits in Kapitel 3.2 genannt.

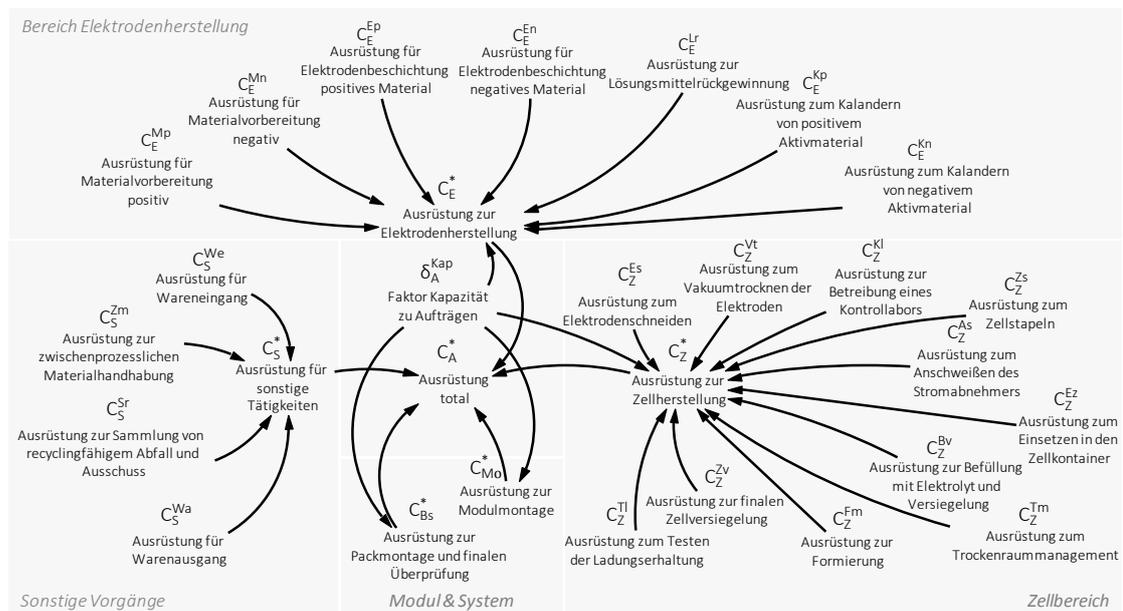


Abbildung 63: Anpassung der Produktionskapazitäten an die Nachfrage

Abbildung 63 zeigt die Grundstruktur des Subsegments mit Fokus auf die Anlageninvestitionen. Dabei lassen sich die Bereiche entsprechend der Produktionsstufen Elektrodenherstellung, Zellherstellung sowie Modul- & Systemherstellung samt der dazugehörigen Prozessschritte unterscheiden. Zusätzlich sind unterstützende Vorgänge aufgeführt sowie ein zentraler Bereich, in dem das Gesamtergebnis berechnet wird. Die Gesamtinvestitionen C_A^* in Anlagen ergeben sich entsprechend:

$$C_A^*(t) = C_E^*(t) \cdot S_{ZZ}^{Ef} + C_Z^*(t) \cdot S_{ZZ}^{Ef} + C_{Mo}^*(t) + C_{Bs}^*(t) + C_S^*(t) \quad \forall E, Z, Mo, Bs \in A \quad (7.29)$$

mit:

- C_A^* Investitionen für die gesamten Anlagen [Mio. €]
- C_E^* Investitionen für Anlagen zur Elektrodenfertigung [Mio. \$]²²⁵
- C_Z^* Investitionen für Anlagen zur Zellfertigung [Mio. \$]
- C_{Bs}^* Investitionen für Anlagen zur Batteriesystem- und Modulfertigung [Mio. \$]
- C_S^* Investitionen für unterstützende Tätigkeiten [Mio. \$]
- S_{ZZ}^{Ef} Strategieeffekt Zellzukauf [Dmnl]

²²⁵ Da die zugrundeliegenden Werte aus den Literaturangaben in US-Dollar sind und der Kurs mitunter stark schwankt, werden die spezifischen Investitionen auch entsprechend in Dollar berechnet. Bei der Ermittlung der Gesamtinvestitionen erfolgt dann eine Umrechnung in Euro mit einem entsprechenden zentralen Umrechnungsfaktor.

Die Berechnung der Investitionen für die einzelnen Prozessschritte ist überwiegend identisch, weshalb eine ausführliche Betrachtung keinen Mehrwert für diese Arbeit bringt. Stattdessen soll am Beispiel der Zellfertigung zum einen die Berechnung der Investition für einen Standardfall C_Z^{Es} und zum anderen für einen Ausnahmefall C_Z^{Zs} erläutert werden.²²⁶ Dem Faktor δ_A^{Kap} kommt dabei die Aufgabe zu, die Investitionen für die Produktionsanlage an den tatsächlich installierten Kapazitäten auszurichten.

$$C_Z^*(t) = \delta_A^{Kap}(t) \cdot \sum_{y=Es}^{Tl} C_Z^{Es}(t) + \dots C_Z^{Zs}(t) + \dots C_Z^{Tl}(t) \quad \forall Z \in B \quad (7.30)$$

$$\delta_A^{Kap}(t) = \frac{p_w^{max}(t)}{\sum_a A_a^*(t)} \quad \forall a \in A; w \in W \quad (7.31)$$

mit:

C_Z^{Es} Investition für Ausrüstung zum Elektrodenschneiden [Mio. \$]

C_Z^{Zs} Investition für Ausrüstung zum Zellstapeln [Mio. \$]

C_Z^{Tl} Investition für Ausrüstung zum Testen der Ladungserhaltung [Mio. \$]

δ_A^{Kap} Faktor zur Anpassung der Investitionen an Kapazitäten [Dmnl]

p_w^{max} Maximale Produktionskapazität der Produktionsstufe w [kWh/Monat]

A_a^* Aufträge aus Antriebsformen [kWh/Monat]

Die Investitionen für Anlagen zum Elektrodenschneiden bestimmen sich entsprechend der Formel zur Größendegression wie folgt. Als Grundlage dient hierbei die zu bearbeitende Elektrodenfläche F_{total}^E . Bei der Berechnung der gesamten Elektrodenfläche ist zudem der Mehrbedarf aufgrund des zu erwartenden Ausschusses mit einzubeziehen v_Z^M .

$$M_m^+(C_Z^{Es}(t) = C_Z^{oEs} \cdot \left(\frac{F_{total}^E(t)}{F_{total}^{oE}} \right)^{p_Z^{Es}} \quad \forall Z \in B \quad (7.32)$$

$$F_{total}^E(t) = v_Z^M(t) \cdot \left(\sum_a A_a^*(t) \cdot F_a^E \right) \quad \forall a \in A; Z \in B \quad (7.33)$$

mit:

C_Z^{oEs} Basisinvestitionen für Ausrüstung zum Elektrodenschneiden [Mio. \$]

²²⁶ Für eine ausführliche Darstellung der jeweiligen Rechenoperationen soll an dieser Stelle auf die Auflistung im Anhang verwiesen werden.

F_{total}^E	<i>Gesamtfläche an bearbeitbarem Elektrodenmaterial</i>	$[m^2/\text{Monat}]$
F_{total}^{oE}	<i>Basisfläche an bearbeitbarem Elektrodenmaterial</i>	$[m^2/\text{Monat}]$
ρ_Z^{Es}	<i>Größendegressionskoeffizient für das Elektrodenschneiden</i>	$[Dmnl]$
γ_Z^M	<i>Ausbeute Zelle</i>	$[Dmnl]$
F_a^E	<i>Elektrodenfläche von Batteriesystemen versch. Antriebsformen</i>	$[m^2/\text{Monat}]$

Im Gegensatz zum Elektrodenschneiden wird bei der Berechnung der Größendegression beim Zellstapeln zusätzlich der Effekt vom Basiswert abweichender Zellkapazitäten berücksichtigt, wodurch der zusätzliche Term entsteht.

$$C_Z^{Zs}(t) = C_Z^{oZs} \cdot \left(\frac{Z_{\text{total}}^Z(t)}{Z_{\text{total}}^{oZ}} \right)^{\rho_Z^{Zs}} \cdot \left(\frac{Z_{\text{total}}^{Ah}(t)}{Z_{\text{total}}^{oAh}} \right)^{\rho_Z^{Ah}} \quad \forall Z \in B \quad (7.34)$$

$$Z_{\text{total}}^Z(t) = \gamma_Z^M(t) \cdot \sum_a \left(\frac{A_a^*(t) \cdot Z_{BS}^Z}{Z_a^{\text{Kap}}} \right) \quad \forall a \in A \quad (7.35)$$

$$Z_{\text{total}}^{Ah}(t) = \frac{(\sum_a A_a^*(t) \cdot Z_a^{\text{Kap}})}{A_{\text{total}}(t)} \quad \forall a \in A \quad (7.36)$$

mit:

C_Z^{Zs}	<i>Basisinvestition für Ausrüstung zum Zellstapeln</i>	$[\text{Mio. } \$]$
Z_{total}^Z	<i>Gesamtanzahl an bearbeitbaren Zellen</i>	$[\text{ZellenMonat}]$
Z_{total}^{oZ}	<i>Basismenge an bearbeitbaren Zellen</i>	$[\text{Zellen}/\text{Monat}]$
ρ_Z^{Zs}	<i>Größendegressionskoeffizient für das Zellstapeln</i>	$[Dmnl]$
Z_{total}^{Ah}	<i>Durchschnittliche Batteriekapazität über alle Antriebsformen</i>	$[\text{Ah}]$
Z_{total}^{oAh}	<i>Basisbatteriekapazität über alle Antriebsformen</i>	$[\text{Ah}]$
ρ_Z^{Ah}	<i>Größendegressionskoeffizient für die Zellkapazität</i>	$[Dmnl]$
γ_Z^M	<i>Ausbeute Zelle</i>	$[Dmnl]$
A_a^*	<i>Aufträge aus Antriebsform a</i>	$[\text{kWh}/\text{Monat}]$
Z_{BS}^Z	<i>Anzahl an Batteriezellen je Batteriesystem</i>	$[\text{Zellen}/\text{Fzg}]$
Z_a^{Kap}	<i>Spezifische Kapazität eines Batteriesystems der Antriebsform a</i>	$[\text{kWh}/\text{Fzg}]$
A_{total}	<i>Gesamtanzahl an Aufträgen</i>	$[\text{kWh}/\text{Monat}]$

Die nachfolgende Abbildung 64 zeigt die Auswirkung des Strategieeffekts „Kapazitätsaufbau“ unter den Kapazitätsstrategien „Lead“, „Match“ und „Follow“ (vgl. Kapitel

4.1.3.3). Auf der linken Abbildung ist die Entwicklung der getätigten Investitionen²²⁷ für Anlagen unter einem dynamischen Nachfrageverlauf dargestellt, während rechts daneben die Entwicklung des Flächenbedarfs abgebildet ist.

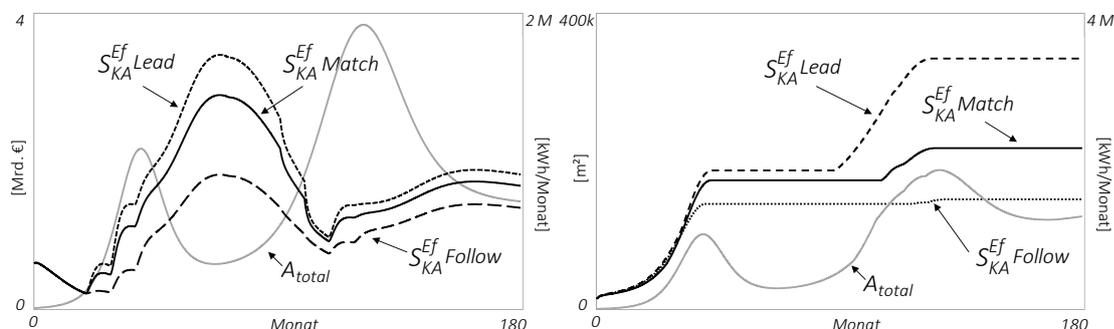


Abbildung 64: Kosten für Produktionsanlagen und die Größe der Werksfläche in Abhängigkeit der Kapazitätsstrategie

In der linken Abbildung ist zu erkennen, dass die Werte der getätigten Investitionen im Fall der Lead-Strategie, deutlich höher liegen als bei den anderen Kapazitätsstrategien. Die Investitionen gehen in der Mitte des Simulationslaufes stark zurück, als Folge des vorherigen Nachfrageeinbruchs. Obwohl die Nachfrage anschließend stärker als zuvor ansteigt, verbleiben die Investitionen auf einem geringeren Niveau. Dies ist auf zwei Ursachen zurückzuführen: Zum einen wurden bei dem ersten Nachfragepeak massiv Überkapazitäten aufgebaut und zum zweiten wurden vorwiegend Batteriesysteme für HEV und PHEV mit einer geringen Gesamtkapazität gefertigt. Wie in Kapitel 3 geschildert wurde, ist die Batteriekapazität jedoch stark von der Dicke der Elektroden-schicht abhängig, die bei HEV und PHEV deutlich geringer ist als bei BEV. Die Konsequenz ist, dass Produktionsanlagen wie der Kalender oder die Beschichtungsanlage, deren Kapazität sich anhand der Verarbeitungsfläche bestimmt, bei gleichen Kosten eine geringere Produktionskapazität für Batteriesysteme bieten. Auf der rechten Abbildung ist die benötigte Werksfläche dargestellt, die mit einer Kapazitätsstrategie einhergeht. Es ist gut ersichtlich, dass notwendige zusätzliche Flächen bei einem Anstieg der Nachfrage installiert werden und auch über den Einbruch der Nachfrage hinaus bestehen bleiben. Bei einem erneuten Anstieg über das vorherige Niveau hinaus werden weitere Flächen hinzu gebaut.

7.3.3.2 Subsektor Material- und Komponentenkosten

Während in dem Subsektor Unternehmensskalierung die Grundlage zur Berechnung der Lohnkosten, Anlageninvestitionen und Gebäudekosten bildet, befasst sich der Subsektor Material- und Komponentenkosten mit den entsprechenden Kostenarten. Ausgangspunkt für diese Berechnung ist die genaue Kenntnis über die Art und Menge der in

²²⁷ Im Folgenden wird der Einfachheit wegen der Begriff „Investitionen“ verwendet. Gemeint sind damit die Sachanlagen in beschaffte Produktionsausrüstung.

einem Batteriesystem verwendeten Materialien und Komponenten, die sich je Antriebsform unterscheiden. Der prinzipielle Aufbau einer LiB wurde in Kapitel 3.1 erläutert. Mit Hilfe des „BatPac“-Modells werden für HEV, PHEV und BEV jeweils eine Referenzbatterie konzipiert und daraus die entsprechenden Materialien und Komponentenbedarfe bestimmt. Die Bestimmung dieser Materialien und Komponentenbedarfe ist wesentlicher Bestandteil des gleichnamigen Subsegments. Auf dessen Darstellung wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da es implizit in diesem Subsegment enthalten ist. Die spezifischen Material- und Komponentenbedarfe werden hierbei um die entsprechenden Kostenfaktoren ergänzt.

Für die Modellierung des Batteriesystems wird die Struktur eines Bottom-up-Ansatzes gewählt. Es werden, ausgehend von der Elektrode über die Zelle zum Batteriemodul bis hin zum fertigen Batteriesystem die jeweiligen Komponenten ergänzt. Entsprechend ergibt sich die in Abbildung 65 dargestellte Struktur.

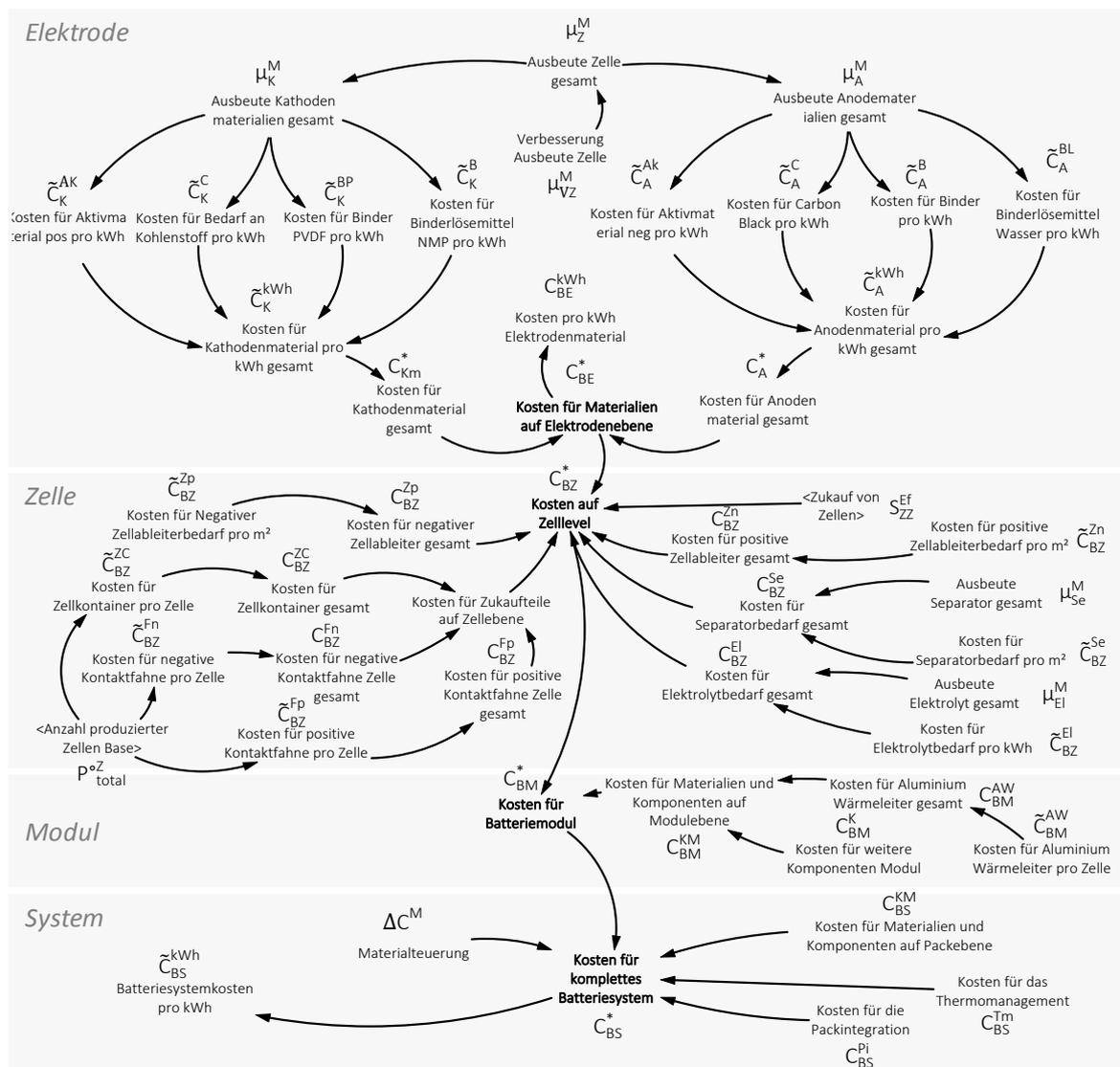


Abbildung 65: Modellstruktur Subsegments Material- und Komponentenkosten

Die Modellstruktur unterteilt sich in vier Bereiche, die den Grundelementen eines Batteriesystems entsprechen und einen unterschiedlichen Grad an Detaillierung aufweisen. Dies ist dem Umstand zu schulden, dass insbesondere auf Elektroden- und Zellebene die Material- und Komponentenmengen je nach Antriebsform stark variieren und entsprechend fallspezifisch berechnet werden müssen.²²⁸ Auf Modul- oder Batteriesystemebene kommen zunehmend einzelne Komponenten zum Einsatz, die für alle Batteriesysteme in der Menge gleich sind und daher zwecks einfacherer Handhabung zu einer Gesamtgröße zusammengefasst werden.

Aufgrund des großen Umfangs des Subsegments soll keine ausführliche Beschreibung der einzelnen Variablen erfolgen, sondern der Fokus soll auf die exemplarische Beschreibung des strukturellen Vorgehens bei der Modellierung der Batteriesystemkosten liegen.²²⁹

Die Gesamtkosten für Materialien und Komponenten eines Batteriesystems C_{BS}^* ergeben sich somit aus den jeweils vorangegangenen Teilkosten und den Kosten für Materialien und Komponenten der betrachteten Ebene. Durch den Strategieeffekt Zellzukauf S_{ZZ}^{Ef} wird zudem berücksichtigt, dass bei einer Fremdfertigung der Zelle diese nicht mit in die Berechnung einfließen. Ferner lassen sich anhand der Materialteuerungsrate ΔC^M auch entsprechende zukünftige Veränderungen mit einbeziehen.

$$C_{BS}^*(t) = \left(S_{ZZ}^{Ef} \cdot \left(\sum_e C_{BE}^e(t) + \sum_z C_{BZ}^z(t) \right) + \sum_m C_{BM}^m + \sum_s C_{BS}^s(t) \right) \cdot \Delta C^M \quad \forall e, z, m, s \in W \quad (7.37)$$

mit:

C_{BS}^*	Gesamtkosten an Materialien und Komponenten für zu produzierende Batteriesysteme	[\$/Monat]
C_{BE}^e	Teilkosten für Materialien und Komponenten auf Elektrodenebene	[\$/Monat]
C_{BZ}^z	Teilkosten für Materialien und Komponenten auf Zellebene	[\$/Monat]
C_{BM}^m	Teilkosten für Materialien und Komponenten auf Modulebene	[\$/Monat]
C_{BS}^s	Teilkosten für Materialien und Komponenten auf Systemebene	[\$/Monat]
ΔC^M	Rate für zukünftige Materialteuerung	[Dmnl]
S_{ZZ}^{Ef}	Strategieeffekt Zellzukauf	[Dmnl]

²²⁸ So unterscheiden sie sich etwa nach der Elektrodendicke, der Anzahl an Elektroden oder Zellen und somit auch nach der Anzahl komplementärer Komponenten wie z. B. den Kontaktfahnen.

²²⁹ Für eine ausführliche Darstellung der jeweiligen Variablen soll auf die Auflistung im Anhang verwiesen werden.

Die Berechnung der Teilkosten auf einer Wertschöpfungsebene erfolgt anhand der Kosten für die Basiseinheit eines Materials oder einer Komponenten \tilde{C}_{BZ}^x , multipliziert mit dem auftragsspezifischen Mengenbedarf. Auf Elektroden- und Zellebene muss zudem die produktionsabhängige Ausbeute für die Zellherstellung berücksichtigt werden und ein entsprechender Mehrbedarf mit eingeplant werden. Das Vorgehen soll im Folgenden am Beispiel einer Zellkomponente C_{BZ}^x ($\in C_{BZ}^*$) verdeutlicht werden:

$$C_{BZ}^x = \tilde{C}_{BZ}^x \cdot \left(\sum_a (A_a^*(t) - A_{VR}^a(t)) \cdot \tilde{Z}_a^x \right) \cdot \mu_Z^M(t) \cdot \mu_x^M(t) \quad \forall a \in A \quad (7.38)$$

mit:

C_{BZ}^x	Kosten an Materialien und Komponenten für ein Material oder Komponente x	[\$/Monat]
A_a^*	Aufträge aus Antriebsform a	[kWh/Monat]
A_{VR}^a	Kapazitätsbedingte Verlustrate an Aufträgen aus Antriebsform a	[kWh/Monat]
\tilde{Z}_a^x	Spezifischer Bedarf an Material oder Komponenten x für ein Batteriesystem der Antriebsform a	[Basiseinheit/Monat]
μ_Z^M	Ausbeute Zelle	[Dmnl]
μ_x^M	Spezifische Ausbeute bei der Erstellung von x	[Dmnl]

In nachfolgender Abbildung ist zum einen der absolute Anteil der jeweiligen Batterieelemente über den Simulationszeitraum exemplarisch dargestellt (links). Zum anderen wird auf der rechten Abbildung der Einfluss unterschiedlicher Strategietypen auf die Batteriesystemkosten veranschaulicht. Dabei ist zu betonen, dass es sich hierbei um die theoretischen Kosten handelt, rein auf Grundlage der Materialien und ohne Berücksichtigung etwaiger Effekte durch die Produktion. Der Strategieeffekt S_{ZZ}^{Ef} verkörpert dabei den zuvor beschriebenen externen Zukauf von Zellen, während S_{PF}^{Ef} eine Produktion ohne Berücksichtigung von Hochleistungsbatterien (HEV) darstellt.²³⁰

Zu Beginn der Simulation zeigt sich eine Differenz zwischen den Strategietypen mit und ohne Produktion von HEV-Batterien, die sich im Laufe der Simulation egalisiert. Der Strategietyp ohne HEV zeigt dabei einen deutlich größeren Kostenanteil der Zellen am Batteriesystem auf. Das liegt daran, dass in dieser frühen Phase, wenn eine Produktion von HEV nicht in Frage kommt, überwiegend PHEV gefertigt werden. Diese besitzen im Vergleich zu den BEV eine geringere Elektrodendicke, weshalb dieser Anteil im Vergleich zu dem Zellanteil geringer ausfällt. Da jedoch im Vergleich zur Komplettstrategie keine HEV-Batteriesysteme, die sich durch eine geringe Zellanzahl und viele zusätzliche Modul- und Systemkomponenten charakterisieren, produziert werden, macht die Zelle den

²³⁰ vgl. Kapitel 7.3.1

überwiegenden Teil der Wertschöpfung aus. Insgesamt wächst aufgrund der zunehmend größeren durchschnittlichen Elektrodendicken der Anteil der Elektroden über die Dauer hinweg an.

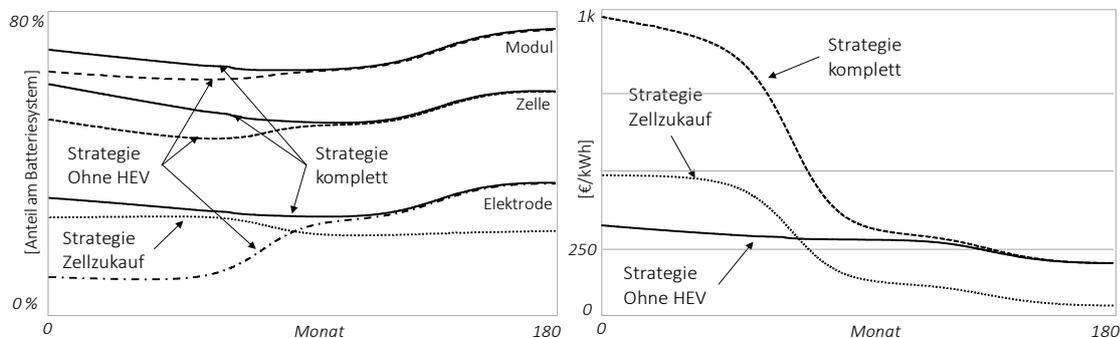


Abbildung 66: Anteil von Batterieelementen an den Systemkosten und produktionsneutraler Kostenverlauf

Im rechten Teil der Abbildung 66 sind die Kosten pro kWh exemplarisch für die unterschiedlichen Strategietypen aufgezeigt.²³¹ Bei dieser Betrachtung wird insbesondere der Effekt des Zellzukaufs deutlich, bei dem die Materialkosten schnell auf ein sehr geringes Niveau fallen. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass zu diesen Kosten noch die für den Zukauf der Zellen hinzukommen, die in der Abbildung nicht mit berücksichtigt sind. Die Kostenentwicklung für den Strategietyp ohne HEV verläuft relativ flach. Dies resultiert aus dem Effekt des Verzichts auf HEV-Batteriezellen, die eine geringe Batteriekapazität bei hohen Materialkosten aufweisen.

7.3.4 Sektor Bewertung

Der Sektor Bewertung ist von essentieller Bedeutung für die Entscheidungsfindung. Er gliedert sich in die zwei Subsektoren multikriterielle Bewertung und den diesem vorgelegten Subsektor Selbstkosten. Während letztgenannter eine rein wirtschaftliche Bewertung der verfolgten Produktionsstrategien erlaubt, lässt sich auf Grundlage der Ergebnisse der multikriteriellen Bewertung eine Gesamtaussage treffen. Zwecks dieser Bewertung fließen alle bisherigen Ergebnisse der Simulation entsprechend dem Schema in Abbildung 49 in diesen Sektor ein.

7.3.4.1 Subsektor Selbstkosten

Der Subsektor Selbstkosten gliedert sich in drei Bereiche (vgl. Abbildung 67). Im oberen Bereich werden die Selbstkosten einer produzierten Einheit Batteriekapazität berechnet. Im zweiten Bereich Selbstkosten unter Strategieeffekten, finden produktionsstrategie-spezifische Effekte bei der Bestimmung der Selbstkosten Berücksichtigung.

²³¹ Sie sind als theoretische Kosten rein auf Grundlage der Materialien ohne Berücksichtigung etwaiger Effekte durch die Produktion dargestellt.

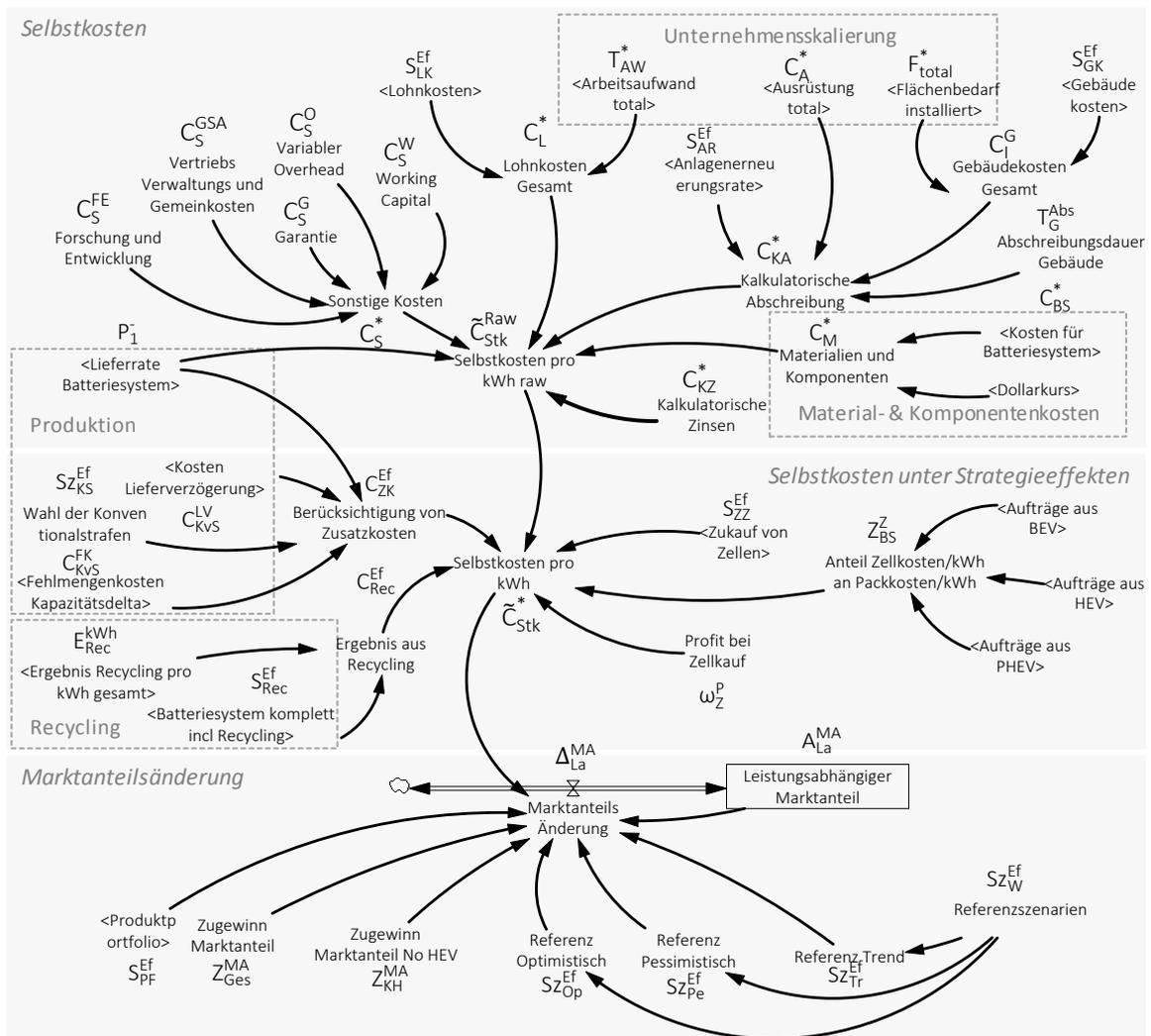


Abbildung 67: Subsektor Selbstkosten

Im dritten Bereich, Marktanteilsänderung, werden die Selbstkosten mit den aktuellen Marktpreisen verglichen und je nach Wettbewerbsfähigkeit der Produktionskosten eine Anpassung der Marktanteile vorgenommen.

Zur Bewertung der monetären Vorteilhaftigkeit unterschiedlicher Produktionsstrategien, werden als zentrale Zielgröße die Selbstkosten einer produzierten Einheit an Batteriekapazität herangezogen. Die Vorkalkulation der Selbstkosten erfolgt dabei auf Basis der Vollkosten. Da es sich bei dem Kostenträger LiB um die kontinuierliche Massenfertigung eines Produkts handelt und von einem konstanten Lagerbestand ausgegangen wird, erfolgt die Berechnung mittels einstufiger Divisionskalkulation (vgl. Wöhe und Döring 2008). Die Selbstkosten \tilde{C}_{Stk}^{Raw} lassen sich somit entsprechend folgender Formel bestimmen:

$$\tilde{C}_{\text{Stk}}^{\text{Raw}}(t) = \frac{C_{\text{total}}^*(t)}{P_1^-(t)} \quad (7.39)$$

mit:

$$\tilde{C}_{\text{Stk}}^{\text{Raw}} \quad \text{Selbstkosten für eine produzierte Einheit Batteriekapazität} \quad [\text{€/kWh}]$$

$$C_{\text{total}}^* \quad \text{Gesamtkosten} \quad [\text{€/Monat}]$$

$$P_1^- \quad \text{Lieferrate an Batteriekapazitäten} \quad [\text{kWh/Monat}]$$

Die Lieferrate P_1^- ergibt sich aus dem Subsektor Produktion, unter Einbezug möglicher Restriktionen aus den übrigen Subsektoren des Sektors Wertschöpfung. Die Gesamtkosten C_{total}^* setzen sich zusammen aus den Kosten für Materialien und Komponenten C_M^* , aus dem gleichnamigen Subsektor, den kalkulatorischen Abschreibungen C_{KA}^* . Zudem fließen die Lohnkosten C_L^* , basierend auf den im Subsektor Unternehmensskalierung ermittelten Größen, die kalkulatorischen Zinsen C_{KZ}^* sowie die sonstigen Kosten C_S^* ²³² mit in die Berechnung ein.

$$C_{\text{total}}^*(t) = C_M^*(t) + C_{KA}^*(t) + C_{KZ}^*(t) + C_L^*(t) + C_S^*(t) \quad (7.40)$$

mit:

$$C_{\text{total}}^* \quad \text{Gesamtkosten} \quad [\text{€/Monat}]$$

$$C_M^* \quad \text{Material- und Komponentenkosten} \quad [\text{€/Monat}]$$

$$C_{KA}^* \quad \text{Kalkulatorische Abschreibungen} \quad [\text{€/Monat}]$$

$$C_{KZ}^* \quad \text{Kalkulatorische Zinsen} \quad [\text{€/Monat}]$$

$$C_L^* \quad \text{Personalkosten} \quad [\text{€/Monat}]$$

$$C_S^* \quad \text{Sonstige Kosten} \quad [\text{€/Monat}]$$

Die jeweiligen kalkulatorischen Abschreibungen ergeben sich dabei aus den Anlageninvestitionen C_A^* , die über eine bestimmte Abschreibungsdauer S_{AR}^{Ef} ²³³ linear abgeschrieben werden. Die Abschreibungsdauer stellt dabei einen Strategieeffekt dar und kann somit variieren. Die Gebäudeinvestitionen berechnen sich aus dem Produkt des Flächenbedarfs F_{total}^* , mit dem standortabhängigen Strategieeffekt S_{GK}^{Ef} , der die spezifischen Konstruktionskosten abbildet, dividiert durch die Abschreibungsdauer für Gebäude T_G^{Abs} .

²³² Während die zuvor genannten Größen im Rahmen der Simulation direkt ermittelt werden, werden die sonstigen Kosten als prozentualer Anteil einzelner oder mehrerer dieser Größen berechnet.

²³³ Die Anlagenerneuerungsrate ist zudem ausschlaggebend für die Ersatzinvestitionen im Subsektor Produktionskapazitäten.

$$C_{KA}^*(t) = \frac{C_A^*(t)}{S_{AR}^{Ef}} + \frac{F_{total}^*(t) \cdot S_{GK}^{Ef}}{T_G^{Abs}} \quad (7.41)$$

mit:

C_A^*	Anlageninvestitionen	[€/Monat]
F_{total}^*	Konstruktions- und Bodenkosten	[m ²]
T_G^{Abs}	Abschreibungsdauer für Gebäude	[Monat]
S_{AR}^{Ef}	Strategieeffekt Anlagenerneuerungsrate	[Monat]
S_{GK}^{Ef}	Strategieeffekt Gebäudekosten	[€/m ²]

Die Personalkosten C_L^* stellen das Produkt aus dem zur Produktion notwendigen Arbeitsaufwand und dem standortabhängigen Lohnkosten-Strategieeffekt S_{LK}^{Ef} dar.

$$C_L^*(t) = T_{AW}^*(t) \cdot S_{LK}^{Ef} \quad (7.42)$$

mit:

T_{AW}^*	Arbeitsaufwand zur Herstellung der Batteriekapazitäten	[h/Monat]
S_{LK}^{Ef}	Strategieeffekt zur Abbildung der landesspezifischen Lohnkosten	[€/h]

Die kalkulatorischen Zinsen ergeben sich aus dem durchschnittlichen abnutzbaren Anlagenvermögen sowie dem Umlaufvermögen, vereinfachend angenommen in Form der Materialien und Komponenten C_M^* (vgl. Wöhe und Döring 2008).

$$C_{KZ}^*(t) = \theta_Z \cdot \left(C_M^*(t) + \frac{1}{2} (C_A^*(t) + C_I^G(t)) \right) \quad (7.43)$$

mit:

C_A^*	Anlageninvestitionen	[€/Monat]
C_I^G	Gebäudeinvestitionen	[€/Monat]
C_M^*	Kosten für Material und Komponenten	[€/Monat]
θ_Z	Marktzins	[Dmnl]

Die sonstigen Kosten schließen eine Vielzahl unterschiedlicher Kosten ein. Neben denen für Forschung und Entwicklung C_S^{FE} werden Garantiekosten C_S^G für etwaige Ansprüche von Kundenseite aus berücksichtigt, das betriebsnotwendige „Working Capital“ C_S^W – ein variabler Overhead C_S^O für indirekte Materialien, Arbeit und Betriebsmittel sowie zur Instandhaltung. Zudem werden die Vertriebs- und Verwaltungsgemeinkosten C_S^{GSA} berücksichtigt, unter denen Ausgaben für Verwaltung, Vertrieb, Steuern auf Einkommen und Eigentum sowie für Versicherung zusammengefasst sind.

$$C_S^*(t) = C_S^{FE}(t) + C_S^{GSA}(t) + C_S^G(t) + C_S^O(t) + C_S^W(t) \quad (7.44)$$

mit:

C_S^{FE}	Kosten für Forschung und Entwicklung	[€/Monat]
C_S^{GSA}	Vertriebs- und Verwaltungsgemeinkosten	[€/Monat]
C_S^G	Zurückstellungen für etwaige Garantieansprüche	[€/Monat]
C_S^O	Variabler Overhead	[€/Monat]
C_S^W	Working Capital	[€/Monat]

Der zweite Bereich Selbstkosten unter Strategieeffekten ergänzt die zuvor berechneten Selbstkosten \tilde{C}_{Stk}^{Raw} um spezifische strategie- oder szenarioabhängige Effekte zur Größe \tilde{C}_{Stk}^* .

$$\tilde{C}_{Stk}^*(t) = \begin{cases} \tilde{C}_{Stk}^{Raw}(t) - (C_{Rec}^{Ef}(t) \cdot S_{Rec}^{Ef}) + \frac{C_{ZK}^{Ef}(t)}{P_1(t)}, & S_{ZZ}^{Ef}=0 \\ \tilde{C}_{Stk}^{Raw}(t) + \frac{C_{ZK}^{Ef}(t)}{P_1(t)} + C_{ZZ}^{Ef}(t) - (C_{Rec}^{Ef}(t) \cdot S_{Rec}^{Ef}), & S_{ZZ}^{Ef}=1 \end{cases} \quad (7.45)$$

mit:

\tilde{C}_{Stk}^*	Selbstkosten unter Berücksichtigung von Strategieeffekten	[€/kWh]
P_1	Lieferrate an Batteriekapazitäten	[€/Monat]
S_{ZZ}^{Ef}	Strategieeffekt Zellzukauf (0 = Eigenproduktion; 1= Zellzukauf)	[Dmnl]
C_{ZK}^{Ef}	Zusatzkosten aufgrund von Fehlmengen oder Lieferverzögerung	[€/Monat]
C_{Rec}^{Ef}	Ergebnis aus dem Recycling von LiB bezogen auf kWh	[€/kWh]
C_{ZZ}^{Ef}	Kosten für den Zukauf von Zellen bezogen auf kWh	[€/kWh]
S_{Rec}^{Ef}	Strategieeffekt Recycling (0 = kein Recycling; 1= Recycling)	[Dmnl]

Die Größe C_{ZK}^{Ef} stellt Zusatzkosten aufgrund der im Subsektor Produktion berechneten Fehlmengen C_{KVS}^{FK} oder Lieferverzögerungen C_{KVS}^{LV} ²³⁴ dar. Welche Zusatzkosten berücksichtigt werden, hängt vom Szenarioeffekt S_{KS}^{Ef} ab.

²³⁴ Die Höhe der Zahlungen wegen Lieferverzug ergibt sich aus der Multiplikation dieses szenariospezifischen Faktors mit dem aktuellen Marktpreis für Batteriesysteme S_{Tr}^{Ef} , der nachfolgend noch eingehender erläutert wird.

$$C_{ZK}^{Ef} = \begin{cases} C_{KVS}^{FK} + 1/3 C_{KVS}^{LV}, & Sz_{KS}^{Ef} = 0 \\ C_{KVS}^{FK} + 2/3 C_{KVS}^{LV}, & Sz_{KS}^{Ef} = 1 \\ C_{KVS}^{FK} + C_{KVS}^{LV}, & Sz_{KS}^{Ef} = 2 \end{cases} \quad (7.46)$$

mit:

C_{KVS}^{FK} Zusatzkosten aufgrund von Fehlmengen [€/kWh]

C_{KVS}^{LV} Zusatzkosten aufgrund von stark überzogener Lieferverzögerung [€/kWh]

Sz_{KS}^{Ef} Szenarioeffekt Wahl der Konventionalstrafe [Dmnl]

Ebenso wird im Falle einer Vorwärtsintegration das Ergebnis des Recyclings je kWh C_{Rec}^{Ef} mitberücksichtigt und in Abhängigkeit des Strategiefaktors S_{Rec}^{Ef} von den Selbstkosten subtrahiert.

Werden die Batteriezellen extern zugekauft S_{ZZ}^{Ef} und somit auf eine Produktion der Zellen verzichtet, muss dies ebenso bei der Kalkulation berücksichtigt werden. Hierzu werden für die jeweiligen Antriebsformen der Anteil der Zellkosten Z_{BS}^Z an den Batteriesystemkosten ermittelt. Daraus ergibt sich entsprechend der aktuellen Diffusion der unterschiedlichen Antriebsformen, ein übergreifender Kostenanteil von Zellen am gesamten Batteriesystem. Dieser wird mit den aktuellen Marktpreisen (zzgl. eines Profits ω_Z^P) für Batteriesysteme, basierend auf einer Erfahrungskurve Sz_{Tr}^{Ef} , multipliziert.

$$C_{ZZ}^{Ef} = Sz_{Tr}^{Ef} \cdot (Z_{BS}^Z(t) \cdot \omega_Z^P) \quad (7.47)$$

mit:

Sz_{Tr}^{Ef} Erfahrungskurve für die LiB-Herstellkosten im Szenario Trend [€/kWh]

Z_{BS}^Z Anteil der Zellkosten an den Gesamtkosten [Dmnl]

ω_Z^P Profit auf Zellen [Dmnl]

Die Erfahrungskurve Sz_{Tr}^{Ef} stellt dabei eine Kostenentwicklung auf Batteriesystemebene dar, entsprechend eines Trendverlaufs der Preise von LiB. Die Parametrisierung der Erfahrungskurve wurde dabei so gewählt, dass der Kostenverlauf für Batteriekapazitäten je kWh in etwa dem Mittelwert aus verfügbaren Literaturangaben (vgl. Abbildung 9) entspricht. Diese Angaben werden jedoch zumeist auf Grundlage von BEV-Batteriesystemen entwickelt, weshalb diese Werte nicht direkt mit denen aus der Simulation, die sowohl BEV, als auch PHEV und HEV berücksichtigen, vergleichbar sind. Aus diesem Grund wurden sowohl für BEV als auch in adäquater Weise für PHEV- und HEV-Erfahrungskurven gebildet und miteinander kombiniert. Neben der Trend-Erfahrungskurve, wurden zudem zwei weitere definiert, die sich einmal an der oberen Grenze der Literaturwerte orientieren und einmal an den unteren und somit einmal eine pessimistischen Entwicklung Sz_{Pe}^{Ef} und einen optimistische Entwicklung Sz_{Op}^{Ef} der Batteriekapazitätskosten unterstellen.

Die Erfahrungskurven sind zudem im dritten Bereich Marktanteilsänderung von Bedeutung, da sie als Referenzwert für die Wettbewerbsfähigkeit der produzierten Batteriekapazitäten fungieren. Die monetäre Vorteilhaftigkeit der eigenen Selbstkosten, verglichen mit der des Wettbewerbs, ist dabei ausschlaggebend für den Zugewinn etwaiger Marktanteile Δ_{La}^{MA} .

$$A_{La}^{MA}(t) = A_{La}^{MA}(t_0) + \int_{t_0}^{t_e} \Delta_{La}^{MA}(t) dt \quad (7.48)$$

mit:

$$A_{La}^{MA} \quad \text{Bestand der leistungsabhängigen Marktanteile} \quad [Dmn!]$$

$$\Delta_{La}^{MA} \quad \text{Veränderungsrate der leistungsabhängigen Marktanteile} \quad [Dmn!]$$

Die potentielle Veränderungsrate ist dabei nicht nur von den Selbstkosten im Vergleich zum Wettbewerb abhängig, sondern zudem davon, ob Batteriekapazitäten für HEV gefertigt werden und zu welchem Zeitpunkt der Simulation die Betrachtung stattfindet. Im ersten Fall wird davon ausgegangen, dass durch die Produktion von HEV (Z_{Ges}^{MA}) bereits frühzeitig Marktanteile generiert werden können, während bei einem Verzicht auf deren Produktion der Markt auf Batteriekapazitäten für PHEV und BEV beschränkt ist (Z_{KH}^{MA}). Neben diesem portfoliobedingten Effekt auf die potentielle Marktanteilsveränderungsrate, reduziert sich im Laufe der Simulation der potentielle Marktanteil, der hinzugewonnen werden kann. Dies wird aufgrund von Tabelle 4 postuliert, in der für die frühen Lebenszyklusphasen eines Marktes ein höherer Zugewinn von Marktanteilen unterstellt wird. Mit zunehmender Simulationsdauer nimmt die Stabilität der Marktanteile stetig zu. Die Marktanteilsänderung Δ_{La}^{MA} ergibt sich somit wie folgt:

$$\Delta_{La}^{MA}(t) = \begin{cases} -Z_{Ges}^{MA}(t), & \tilde{C}_{Stk}^*(t) > Sz_{Pe}^{Ef}(t), \wedge A_{La}^{MA}(t) > 0, \wedge S_{PF}^{Ef} = 1 \\ -Z_{KH}^{MA}(t), & \tilde{C}_{Stk}^*(t) > Sz_{Pe}^{Ef}(t), \wedge A_{La}^{MA}(t) > 0, \wedge S_{PF}^{Ef} = 0 \\ Z_{Ges}^{MA}(t), & \tilde{C}_{Stk}^*(t) < Sz_{Pe}^{Ef}(t) \wedge \tilde{C}_{Stk}^*(t) > Sz_{Tr}^{Ef}(t), \wedge A_{La}^{MA}(t) > 0, \wedge S_{PF}^{Ef} = 1 \\ Z_{KH}^{MA}(t), & \tilde{C}_{Stk}^*(t) < Sz_{Pe}^{Ef}(t) \wedge \tilde{C}_{Stk}^*(t) > Sz_{Tr}^{Ef}(t), \wedge A_{La}^{MA}(t) > 0, \wedge S_{PF}^{Ef} = 0 \\ 1,25 \cdot Z_{Ges}^{MA}(t), & \tilde{C}_{Stk}^*(t) < Sz_{Tr}^{Ef}(t) \wedge \tilde{C}_{Stk}^*(t) > Sz_{Op}^{Ef}(t), \wedge A_{La}^{MA}(t) > 0, \wedge S_{PF}^{Ef} = 1 \\ 1,25 \cdot Z_{KH}^{MA}(t), & \tilde{C}_{Stk}^*(t) < Sz_{Tr}^{Ef}(t) \wedge \tilde{C}_{Stk}^*(t) > Sz_{Op}^{Ef}(t), \wedge A_{La}^{MA}(t) > 0, \wedge S_{PF}^{Ef} = 0 \\ 1,33 \cdot Z_{Ges}^{MA}(t), & \tilde{C}_{Stk}^*(t) > Sz_{Op}^{Ef}(t), \wedge A_{La}^{MA}(t) > 0, \wedge S_{PF}^{Ef} = 1 \\ 1,33 \cdot Z_{KH}^{MA}(t), & \tilde{C}_{Stk}^*(t) > Sz_{Op}^{Ef}(t), \wedge A_{La}^{MA}(t) > 0, \wedge S_{PF}^{Ef} = 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (7.49)$$

mit:

$$\Delta_{La}^{MA} \quad \text{Marktanteilsänderungsrate} \quad [Dmn!]$$

$$Z_{Ges}^{MA} \quad \text{Potentielle Marktanteilsveränderung} \quad [Dmn!]$$

Z_{KH}^{MA}	Potentielle Marktanteilsveränderung ohne HEV-Batteriekapazitäten	[Dmnl]
\tilde{C}_{Stk}^*	Selbstkosten unter Strategieeffekten	[Dmnl]
Sz_{Pe}^{Ef}	Erfahrungskurve mit pessimistischem Verlauf	[€/kWh]
Sz_{Tr}^{Ef}	Erfahrungskurve mit pessimistischem Trend	[€/kWh]
Sz_{Op}^{Ef}	Erfahrungskurve mit pessimistischem Optimistisch	[€/kWh]
S_{pF}^{Ef}	Strategieeffekt Produktportfolio (0= ohne HEV, 1 = mit HEV)	[Dmnl]

Die potentielle Marktanteilsveränderung unterscheidet sich somit je nachdem wie die Selbstkosten im Vergleich zu den Werten der Erfahrungskurven liegen. Sie reichen von einem Verlust an Marktanteilen, wenn die Selbstkosten höher sind als die Werte der pessimistischen Erfahrungskurve, bis hin zu einem um zusätzlich 33 % erhöhten Zugewinn, falls sie niedriger sind als im optimistischen Szenario. Die potentiellen Zugewinne sind insgesamt so dimensioniert, dass bei einer Fertigung inkl. HEV-Batteriekapazitäten der leistungsabhängige Marktanteil insgesamt um 25 % erhöht werden kann bzw. um 20 %, falls auf die Produktion der HEV-Batteriekapazitäten verzichtet wird.²³⁵ Der leistungsabhängige Marktanteil bestimmt wiederum im Sektor Nachfrage die Menge an Aufträgen, die an das Unternehmen gerichtet werden.

Die Auswirkungen einzelner Strategietypen auf die Selbstkosten (links), sowie der Effekt der Marktanteilsänderung (rechts) werden nachfolgend näher beschrieben.

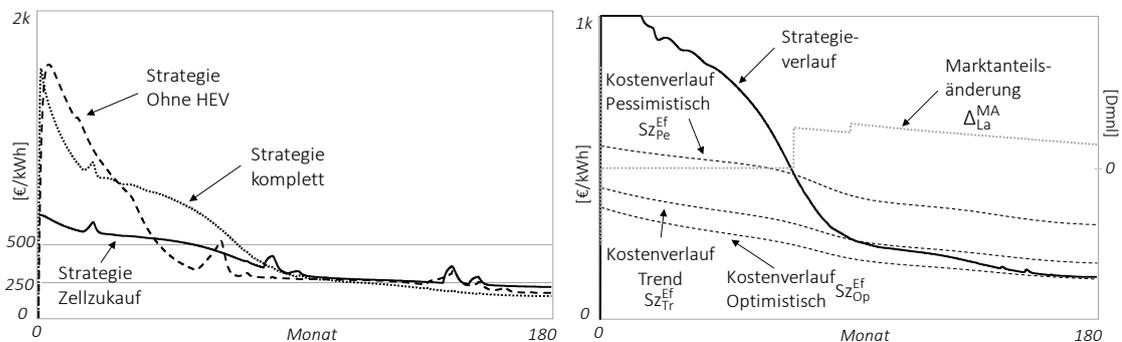


Abbildung 68: Einfluss verschiedener Strategietypen auf Stückkosten und Marktanteil

Die Selbstkosten bei einem Zellzukauf sind zu Beginn geringer, da keine entsprechenden Investitionen getätigt werden müssen. Für den Strategietyp ohne HEV fallen die Kosten relativ schnell ab, da Investitionen erst bei Batteriesystemen mit höheren Batteriekapazitäten notwendig werden.

²³⁵ Die Werte sind dabei in einer Tabellenfunktion hinterlegt, die bei System Dynamics dazu verwendet wird, nichtlineare Funktionen zu modellieren. Die Beziehung zwischen einer unabhängigen und abhängigen Variablen wird dabei mittels einer Wertetabelle festgelegt (vgl. Ventana 2002).

Auf dem rechten Teil der Abbildung 68 wird der Effekt der Marktanteilsänderung visualisiert. Dieser ist wie zuvor beschrieben abhängig von den Kosten der Wettbewerber. Das Wettbewerbsfeld wird dabei durch die drei erfahrungskurvenbasierten Kostenverläufe repräsentiert. Liegen die Selbstkosten darüber, gehen leistungsabhängige Marktanteile verloren. Zwischen dem Trendverlauf und dem pessimistischen Verlauf kann ein geringer Zugewinn an Marktanteilen realisiert werden. Dies ist im Rahmen des Simulationslaufs an dem sprunghaften Anstieg der Marktanteilsänderung Δ_{La}^{MA} zu beobachten, wenn die Selbstkosten in diesen Bereich eintreten. Bei Unterschreitung der Trendkurve ist ein weiterer Anstieg der Marktanteilsänderung zu sehen.

7.3.4.2 Subsektor multikriterielle Bewertung

Der Subsektor multikriterielle Bewertung stellt den zentralen Sektor für die Entscheidungsfindung bei der Wahl einer Produktionsstrategie dar. Die beiden Zielgrößen Selbstkosten bzw. Stückkosten aus dem gleichnamigen Subsektor sowie Lieferzeit aus dem Subsektor Produktion werden dabei durch weitere modellexogene Zielgrößen ergänzt. Der Subsektor unterteilt sich in vier Bereiche. Jeweils ein Bereich dient der Berechnung der jeweiligen Zielgröße, wobei die externen Zielgrößen in einem eigenen Bereich zusammengefasst werden. Der vierte Bereich dient schließlich der Aggregation der jeweiligen Ergebnisse zu einer Gesamtaussage. Der Subsektor stellt mit knapp 500 Variablen den deutlich umfangreichsten Sektor des Modells dar. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle keine Erläuterung der einzelnen Bereiche erfolgen, sondern der Fokus verstärkt auf die Ermittlung der Nettoflüsse von den einzelnen Produktionsstrategien gelegt werden. Die Adaption der PROMETHEE-Methode für eine Anwendung in System Dynamics orientiert sich dabei an dem in Kapitel 6.1.2 geschilderten Ablauf unter Beachtung der in Kapitel 6.3.2 geschilderten spezifischen Anpassungen im Rahmen dieser Arbeit. Der große Umfang an notwendigen Rechenoperationen und entsprechenden Variablen führt jedoch zu der Notwendigkeit, von dem geschilderten Vorgehen teilweise abzuweichen, um Erleichterungen bei der Modellierung zu erreichen.

Aus mathematischer Sicht sind die Schritte äquivalent. Die Bereiche der Kriterien Selbst- bzw. Stückkosten ϵ_{StK} und Lieferzeit ϵ_{LZ} sind von ihrer Struktur her identisch. Abweichend hierzu integriert das Kriterium standortabhängige externe Kriterien und ϵ_{SK}^* mehrere Teilkriterien in sich $\epsilon_{eK}^* = \sum_{l=1}^5 \epsilon_{eK}^l$. Diese gesteigerte Anzahl an Kriterien und der damit verbundene Aufwand wird jedoch dadurch kompensiert, dass für die standortabhängigen Kriterien lediglich zwei Alternativen betrachtet werden, die jeweils einen Bestandteil verschiedener Produktionsstrategien bilden. Sowohl die Teilkriterien als auch die Ausprägungen der Alternativen bleiben im Gegensatz zu den Kriterien Selbst- bzw. Stückkosten und Lieferzeit entweder konstant oder entwickeln sich linear. Aufgrund der geringen Anzahl potentieller Alternativen sind die paarweisen Vergleiche in diesem Fall relativ leicht zu implementieren. Zur Erläuterung der Modellstruktur und des Vorgehens zur Ermittlung der Präferenzen wird daher der Bereich Selbst- bzw.

Stückkosten herangezogen, der aufgrund der größeren Anzahl an Alternativen in Form von Produktionsstrategien,²³⁶ eine höhere Komplexität aufweist. Der relevante Bereich ist in Abbildung 69 zum einen als Gesamtausschnitt (rechts) und zum anderen als partielle Vergrößerung, zur exemplarischen Erläuterung (links) abgebildet.

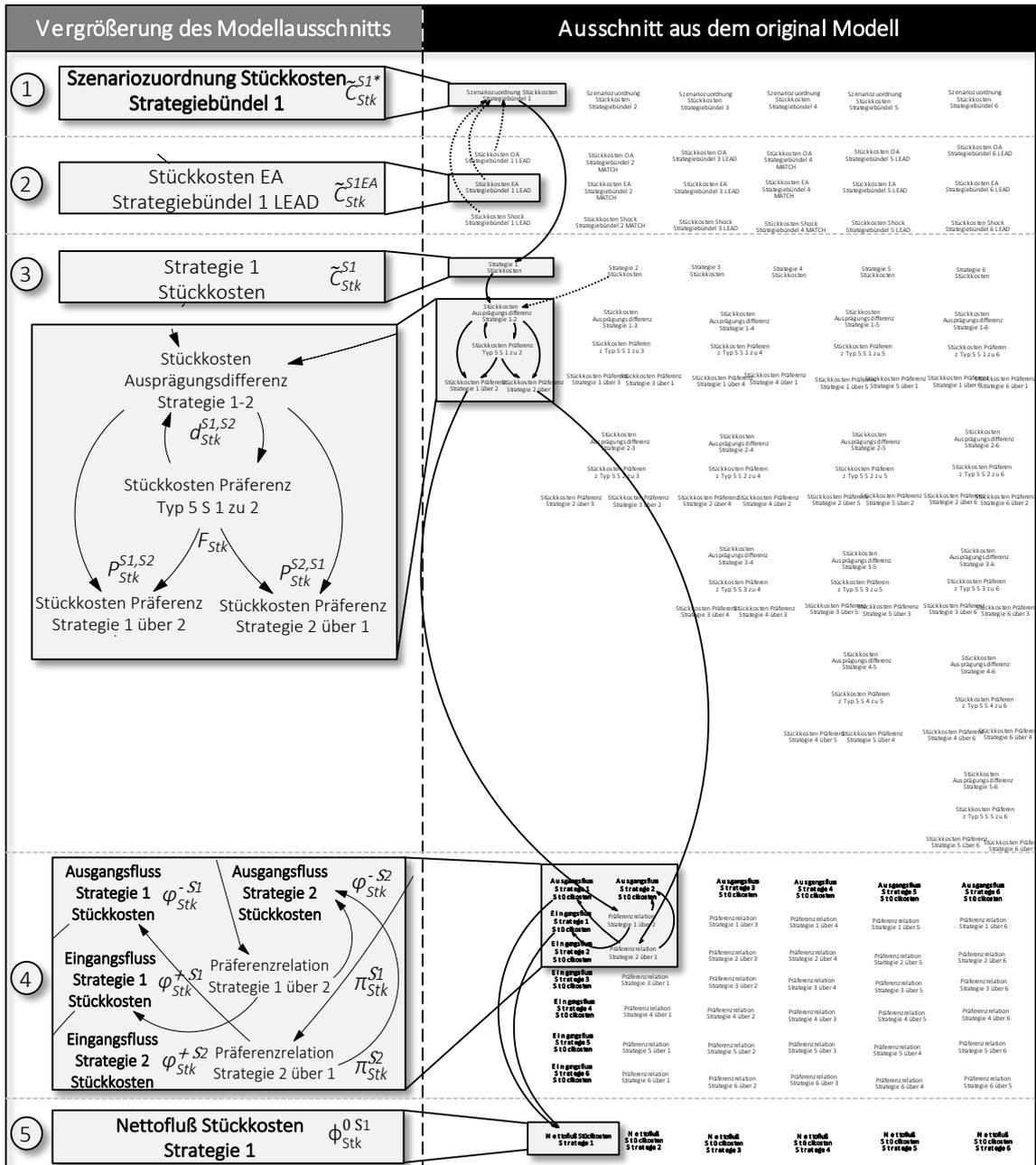


Abbildung 69: Modellstruktur des Bereichs Stück- bzw. Selbstkosten

²³⁶ A_i mit $i=\{1,..6\}$

Die Modellstruktur ist so aufgebaut, dass unter Punkt 1 eine Auswahl der entsprechenden Zielgröße²³⁷ $C_j^{A_i^*}$ in Abhängigkeit des betrachteten Szenarios stattfindet. Da bei einem Simulationslauf jeweils nur eine Strategie unter einem Szenario simuliert werden kann, ist es erforderlich, auf vorangegangene Simulationsläufe mit anderen Strategien und Szenarien zurückzugreifen um diese miteinander zu vergleichen. Diese Aufgabe erfüllt Punkt 2, in dem die Simulationsläufe der jeweiligen Zielgröße $C_j^{A_i^{Sz}}$ hinterlegt sind.²³⁸ Punkt 1 wählt somit die passende Zielgröße und deren Simulationslauf unter dem relevante Szenario aus und leitet diese weiter an Punkt 3, wo sie die Eingangswerte $C_j^{A_i}$ für die multikriterielle Bewertung bilden. Während in PROMETHEE diese Größen in der Regel über alle Alternativen und Kriterien hinweg in Form einer Ergebnismatrix abgebildet werden, erfolgt hier lediglich die Betrachtung eines Kriteriums, so dass es sich genaugenommen nicht um eine Ergebnismatrix sondern eher um eine Zeilenmatrix oder einen Ergebnisvektor handelt. Basierend auf diesen Eingangswerten der verschiedenen Alternativen, im Fall dieser Arbeit handelt es sich dabei um die Produktionsstrategien, wird die Differenz der Kriterienausprägungen $d_j^{A_i, A_s}$ zwischen allen Strategien ermittelt. Mit Hilfe der Präferenzfunktion F_j und einem Faktor v , der angibt, ob die Zielgröße maximiert oder minimiert werden soll, lassen sich anschließend die jeweiligen Präferenzen $P_j^{A_i, A_s}$ einer Strategie A_i über A_s bestimmen.²³⁹ Als Präferenzfunktion wurde sowohl für die Selbstkosten als auch für die Lieferzeit der Typ 5 gewählt, die als Tabellenfunktion²⁴⁰ in dem Modell implementiert wird. Die Verwendung der Ausprägungsdifferenz $d_j^{A_i, A_s}$ ohne zusätzlichen Schritt $d_j^{A_s, A_i}$ ist möglich, da die Präferenzfunktionen symmetrisch zur y-Achse gestaltet sind.

$$P_j^{A_i, A_s}(t) = \begin{cases} F_j(v \cdot d_j^{A_i, A_s}(t)), & d_j^{A_i, A_s} > 0 \\ 0, & d_j^{A_i, A_s} < 0 \end{cases} \quad \forall j \in C; i, s \in A \quad (7.50)$$

$$P_j^{A_s, A_i}(t) = \begin{cases} F_j(v \cdot d_j^{A_i, A_s}(t)), & d_j^{A_i, A_s} < 0 \\ 0, & d_j^{A_i, A_s} > 0 \end{cases} \quad \forall j \in C; i, s \in A \quad (7.51)$$

mit:

$P_j^{A_i, A_s}$ Präferenz einer Alternative i über s bezüglich des Kriteriums j [Dmnl]

F_j Präferenzfunktion bezüglich eines Kriteriums j [Dmnl]

²³⁷ Bei der exemplarisch abgebildeten Zielgröße in Abbildung 69 handelt es sich um die Selbstkosten \tilde{C}_{Stk}^* .

²³⁸ In Vensim erfolgt der Zugriff auf die Zeitreihe einer Variablen eines gespeicherten Simulationslauf mit Hilfe der Funktion „GET VDF DATA“.

²³⁹ Bzw. die Präferenz $P_j^{A_s, A_i}$ einer Strategie A_s über A_i .

²⁴⁰ Die genauen Werte der Tabellenfunktion können anhand der entsprechende Gleichungen im Anhang eingesehen werden.

ν Faktor der angibt ob C_j minimiert (-1) oder maximiert (+1) wird [Dmnl]

$d_j^{A_i, A_s}$ Differenz der Ausprägungen von Alternativen A_i und A_s bzgl. C_j [Dmnl]

Im Weiteren lassen sich, wie in Abbildung 69 in Punkt 4 dargestellt, die einzelnen Präferenzen $P_j^{A_i, A_s}$ unter Berücksichtigung der spezifischen Gewichtungen $w_j(t)$ ²⁴¹ zu einzelnen Präferenzindizes $\pi_j^{A_i, A_s}$ zusammenfassen. Diese gibt Auskunft über die relative Vorziehungswürdigkeit einer Alternative i über s .

$$\pi_j^{A_i, A_s}(t) = w_j(t) \cdot P_j^{A_i, A_s}(t) \quad \forall j \in C; i, s \in A \quad (7.52)$$

$$\pi_j^{A_s, A_i}(t) = w_j(t) \cdot P_j^{A_s, A_i}(t) \quad \forall j \in C; i, s \in A \quad (7.53)$$

mit:

$\pi_j^{A_i, A_s}$ Präferenzindex einer Alternative i über s bezüglich des Kriteriums j [Dmnl]

$\pi_j^{A_s, A_i}$ Präferenzindex einer Alternative s über i bezüglich des Kriteriums j [Dmnl]

w_j Gewichtung eines Kriteriums j [Dmnl]

Die Eingangs- und Ausgangsflüsse einer Alternative A_i bzw. Strategie $\phi_j^{+A_i}$ bzw. $\phi_j^{-A_i}$ ergeben sich dann aus der normierten Summe der einzelnen Präferenzindizes.

$$\phi_j^{+A_i}(t) = \frac{1}{(a-1)} \sum_a \pi_j^{A_i, A_s}(t) \quad \forall j \in C; i, s, a \in A \quad (7.54)$$

$$\phi_j^{-A_i}(t) = \frac{1}{(a-1)} \sum_a \pi_j^{A_s, A_i}(t) \quad \forall j \in C; i, s, a \in A \quad (7.55)$$

mit:

$\phi_j^{+A_i}$ Eingangsflüsse einer Strategie A_i bezüglich des Kriteriums j [Dmnl]

$\phi_j^{-A_i}$ Ausgangsflüsse einer Strategie A_i bezüglich des Kriteriums j [Dmnl]

a Anzahl der Alternativen [Dmnl]

Die Berechnung der Nettoflüsse der Strategien $\phi_j^{0A_i}$, bezogen auf ein Kriterium j , erfolgt unter Punkt 5 anhand der spezifischen Summen aus Eingangs- und Ausgangsflüssen.

²⁴¹ Die Gewichtung der einzelnen Kriterien ist dabei teilweise nicht konstant und ändert sich im Laufe der Simulation (vgl. Kapitel 6.1.2).

$$\phi_j^{0 A_i}(t) = \phi_j^{+ A_i}(t) + \phi_j^{- A_i}(t) \quad \forall j \in C; i \in A \quad (7.56)$$

mit:

$$\phi_j^{0 A_i} \quad \text{Nettofluss einer Strategie } A_i \text{ bezüglich des Kriteriums } j \quad [Dmnl]$$

Um anschließend zu einer übergeordneten Gesamtbewertung der Strategien anhand der Nettoflüsse zu gelangen, werden die kriterienspezifischen Nettoflüsse zu einer Gesamtaussage aggregiert.

$$\phi_{\text{total}}^{0 A_i}(t) = \sum_c \phi_j^{0 A_i}(t) \quad \forall j, c \in C; i \in A \quad (7.57)$$

mit:

$$\phi_{\text{total}}^{0 A_i} \quad \text{Nettofluss einer Strategie } A_i \text{ bezüglich aller Kriterien } c \quad [Dmnl]$$

Während sich auf diese Weise die einzelnen Nettoflüsse kriterienübergreifend im Detail abbilden lassen, fällt es jedoch aufgrund der großen Dynamik einzelner Flüsse schwer, eine aggregierte Gesamtaussage zur Vorteilhaftigkeit einer Strategie zu treffen. Aus diesem Grund wird entsprechend dem in Kapitel 6.3.2 geschilderten Vorgehen das Integral über den Nettoflüssen der einzelnen Strategien und dem mit der schlechtesten Ausprägung gebildet.

$$I_{\phi_{\text{total}}^{0 A_i}} = \int_t (\phi_{\text{total}}^{0 A_i}(t) - f^{\min}(\phi_{\text{total}}^{0 A_a}(t))) dt \quad \forall i \in A \quad (7.58)$$

mit:

$$I_{\phi_{\text{total}}^{0 A_i}} \quad \text{Integral des Nettoflusses einer Strategie } A_i \text{ über dem Minimum aller Strategien } a \quad [Dmnl]$$

$$f^{\min}(\phi_{\text{total}}^{0 A_a}) \quad \text{Minimum der Nettoflüsse aller Strategien } a \quad [Dmnl]$$

Die Gesamtbetrachtung erfolgt dabei zum einen über den gesamten Simulationszeitlauf und zum anderen aber auch über einzelne Zeiträume hinweg. Die Intention hinter diesem Vorgehen ist es die Vorteilhaftigkeit von Strategien zu unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus zu erfassen, um so dem Entscheider ebenfalls Auskunft über einen möglichen Strategiewechsel zu liefern.

$$\begin{aligned}
I_{\phi_{\text{total}}^{0 A_i}}(t) = & \int_{t_0}^{t_w} (\phi_{\text{total}}^{0 A_i}(t) - f^{\text{min}}(\phi_{\text{total}}^{0 A_a}(t))) dt + \int_{t_w}^{t_r} (\phi_{\text{total}}^{0 A_i}(t) - f^{\text{min}}(\phi_{\text{total}}^{0 A_a}(t))) dt \\
& + \int_{t_r}^{t_a} (\phi_{\text{total}}^{0 A_i}(t) - f^{\text{min}}(\phi_{\text{total}}^{0 A_a}(t))) dt \quad \forall i, a \in A \quad (7.59)
\end{aligned}$$

mit:

$I_{\phi_{\text{total}}^{0 A_i}}$	Integral des Nettoflusses einer Strategie A_i über dem Minimum aller Strategien a	[Dmnl]
$f^{\text{min}}(\phi_{\text{total}}^{0 A_a})$	Minimum der Nettoflüsse aller Strategien a	[Dmnl]
t_w	Zeitpunkt zum Ende der Wachstumsphase	[Dmnl]
t_r	Zeitpunkt zum Ende der Reifephase	[Dmnl]
t_a	Zeitpunkt zum Ende der Phase des Alters	[Dmnl]

Auf eine exemplarische Erläuterung des Modellverhaltens dieses Subsystems, soll an dieser Stelle verzichtet werden, da ebendiese im nachfolgenden Kapitel 8 elementarer Gegenstand der Betrachtung sein wird.

7.4 Validierung

Der Zweck der Planungsmethodik ist es, Unternehmen bei dem Treffen einer strategischen Entscheidung zu unterstützen, die unter Umständen ein erhebliches wirtschaftliches Risiko in sich birgt. Es ist daher unumgänglich, die Güte eines Modells hinsichtlich dessen Einsetzbarkeit auf die definierte Aufgabenstellung sicherzustellen (vgl. Milling 1987). Der Prozess der Transformation vom realen System zum Modell sowie die hohe Systemkomplexität, die Vielzahl an Rückkopplungen, Wirkbeziehungen und -verzögerungen, stellen potentielle Fehlerquellen dar. Aus diesem Grund kommt dem Prozess der Validierung eine entscheidende Rolle zu. Als Maßstab dient hierbei jedoch nicht die Deckungsgleichheit zwischen realem System und Modell, sondern der Nachweis dessen Funktionalität und Nützlichkeit. Letztlich dient die Validierung ebenfalls der Vertrauensbildung in das Modell (vgl. Sterman 2000). Während dies für ex post Betrachtungen relativ einfach anhand der Reproduzierbarkeit historischer Daten erfolgen kann, ist dies für ex ante Analysen von Systemen, die noch nicht existent sind oder für die noch keine vergleichbaren Daten vorliegen, nicht möglich. In solchen Fällen muss die Validierung anhand des Modells erfolgen (vgl. Liehr 2004). Hierzu wurde eine Vielzahl möglicher Tests definiert, die in drei Kategorien unterteilt werden können (vgl. Barlas 1996; Forrester und Senge 1996):

- Strukturvalidierung,

- Parametervalidierung,
- Verhaltensvalidierung.

Aufgrund dessen, dass Modelle für einen spezifischen Zweck erstellt werden, können sie auch nur für diesen valide sein. Entsprechend ist auch für jedes Modell ein individuelles Vorgehen zur Validierung festzulegen, das auf die Bedarfe bzw. Anforderungen an das Modell zugeschnitten ist (vgl. Größler 2008). Der Fokus der Entscheidungsunterstützung in diesem Modell liegt auf der gesamtheitlichen Erfassung aller für eine Produktionsstrategie relevanter Ursachen- und Wirkungsbeziehungen. Es soll ermöglicht werden, die Effekte und Konsequenzen von Handlungsalternativen im System transparent und nachvollziehbar abzubilden. Entsprechend kommt der Struktur und den Modellbeziehungen eine große Rolle zu. Zudem soll ein hoher Grad an Realitätsnähe gewahrt bleiben, um dem Entscheider eine möglichst plastische Vorstellung von simuliertem Produkt und Produktionssystem zu ermöglichen. Die hierzu verwendeten Eingangsparameter sollten daher realitätskonform sein. Letztlich sollen dem Entscheider anhand des Modells die Konsequenzen unterschiedlicher Entscheidungsalternativen verdeutlicht werden, das realitätskonforme Verhalten des Modells stellt hierzu ein unabdingbares Erfordernis dar.

Entsprechend dieser Einteilung werden zur Validierung des in dieser Arbeit entwickelten Modells die in Tabelle 17 aufgeführten Einzeltests als zielführend und notwendig erachtet.²⁴²

Tabelle 17: Auswahl relevanter Validierungsschritte

Nr.	Art des Einzeltests:	Klassifizierung:
1	Strukturexistenz	Strukturvalidierung
2	Adäquanz der Problemgrenze	Strukturvalidierung
3	Einheitenkonsistenz	Strukturvalidierung
4	Realitätsnähe der Parameter	Parametervalidierung
5	Realitätskonformität unter Extremwerten	Parametervalidierung
6	Verhalten unter Extremstrategien	Verhaltensvalidierung
7	Verhaltensreproduktion	Verhaltensvalidierung
8	Verhaltensvorsagetests	Verhaltensvalidierung
9	Verhaltenssensitivitäten	Verhaltensvalidierung

Die Strukturexistenz²⁴³ (Test 1) dient der Prüfung, ob die Modellstruktur die Realität auch tatsächlich abbildet. Die Adäquanz der Problemgrenze (Test 2) berücksichtigt

²⁴² Die Einzeltest sind in dieser oder ähnlicher Weise zu finden in (vgl. Größler 2008; Forrester und Senge 1996; Sterman 2000).

darüber hinaus, ob das Modell ein passendes Aggregationsniveau besitzt und die zur Abbildung essentiellen Realweltstrukturen (im Sinne von Rückkopplungen, Verzögerungen usw.) und Systemgrößen aufweist. Als Ausgangspunkt und Gestaltungsrahmen für die Modellstrukturen und zur Definition des Aggregationsniveaus diente im Rahmen dieser Arbeit stets die gesichtete, einschlägige Literatur. Auf deren Grundlage wurde ein passendes Modellkonzept entwickelt. Die Motivation und Definition der verwendeten Modellstruktur und Modellgrenzen wurden ausführlich in Kapitel 7.2 erläutert. Die kritischen Systemgrößen ergeben sich aus dem in Kapitel 7.2.1 geschilderten dynamischen Problemverhalten, welches sich aus den grundlegenden Erkenntnissen aus den Kapiteln 2, 3 und 4 ableitet. Die Modellstruktur wurde zudem im Rahmen von Konferenzen mit Experten aus dem Bereich der systemdynamischen Modellierung diskutiert und verfeinert.²⁴⁴ Flankierend hierzu wurde der Dialog mit Experten aus dem Bereich der Batterie- und Automobilproduktion sowie Herstellern von Produktionsanlagen für die Batterieherstellung gesucht, um die inhaltliche Adäquanz und Konsistenz des Modells sicherzustellen.²⁴⁵ Dieser Dialog ermöglicht es zudem, die aus der Literatur erhobenen Daten bzw. Parameter²⁴⁶ in kritischen Fällen auf ihre Realitätsnähe bzw. Plausibilität hin zu diskutieren (Test 4). Insgesamt wurde bei der Wahl der Parameter auf deren Realitätsnähe geachtet und zudem versucht, möglichst einheitliche Quellen zu verwenden um die Konsistenz der Parameter zueinander sicherzustellen (vgl. hierzu Kapitel 8.2). Die Modellstruktur, die Adäquanz der Problemgrenze sowie die Realitätsnähe der Parameter, können somit aufgrund obiger Ausführungen als gegeben erachtet werden.

Zur automatisierten Überprüfung der Einheitenkonsistenz (Test 3) sowie des Modellsyntax bietet die Software Vensim eine integrierte Prüffunktion. Diese wurde auf das Modell angewendet und als positiv befunden. Ein entsprechender Screenshot mit dem Ergebnis ist im Anhang 1 angefügt.

Von zentraler Bedeutung für die Verhaltensvalidierung ist die die Frage, in wie weit das Modell das reale Verhalten des Systems plausibel reproduzieren oder auch vorhersagen kann. Während die vorherigen Tests iterativ zum Modellierungsprozess durchgeführt wurden, können die nachfolgenden Tests erst am fertigen Modell sinnvoll vorgenommen werden. Zwecks einer anschaulicheren Beschreibung und zur Verbesserung des Verständnisses für die Funktion und den Inhalt eines Segments oder Subsegments, wurde bereits in Kapitel 7.3 exemplarisch das Modellverhalten aufgezeigt. Diese Dar-

²⁴³ Diese und die nachfolgenden Erläuterungen zu den Einzeltest basieren auf Größler 2008.

²⁴⁴ Vgl. bspw. Hettesheimer 2013, 2014; Hettesheimer und Lerch 2014

²⁴⁵ Plattform für solche Gespräche bildeten das Expertenpanel im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts „Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität“, als auch einschlägige Konferenzen oder auch Messeveranstaltungen.

²⁴⁶ Im nachfolgenden Kapitel wird nochmals detaillierter auf die Parametrisierung des Modells und die hierzu verwendeten Quellen eingegangen.

stellungen und Beschreibungen des Modellverhaltens stellen daher Bestandteil der Verhaltensvalidierung dar.

Die Robustheit des Modells unter Extremwerten der Bestandgrößen (Test 5) oder bei dem verfolgen extremer Strategien (Test 6) wurde anhand unterschiedlicher Extremkonfigurationen der Bestandsvariablen bzw. der Strategieeffekte untersucht. Dabei stellte sich stets das zu erwartende Verhalten ein, ohne dass realitätsfremde Effekte zu beobachten sind. Neben den Tests bezüglich des Modellverhaltens unter Extremkonfigurationen ist die Überprüfung des generellen plausiblen realitätskonformen Verhaltens Bestandteil der Verhaltensvalidierung. Dies umfasst etwa die Fähigkeit des Modells das Verhalten des Realsystems zu reproduzieren (Test 7). Da es nicht Zweck des Modells, ist und aufgrund des Neuheitsgrades des Marktes auch keine entsprechenden Referenzwerte vorliegen, steht jedoch nicht die Reproduktion des genauen empirischen Verhaltens im Fokus (z. B. durch einen Vergleich mit historischen Daten). Vielmehr soll das Modell in der Lage sein, ein mit dem des Realsystems konformes Verhaltensmuster abzubilden und bei Variation der Parameter unterschiedliche Verhaltensmodi zu erzeugen. Dass das Modell hierzu in der Lage ist, kann anhand der beispielhaften Verhaltensbeschreibungen der Modellsektoren in Kapitel 7.3 als gegeben angesehen werden. Neben der Verhaltensreproduktion stellt zudem die Verhaltensvorhersage Gegenstand der Validierung dar. Da es sich dabei allerdings um eine zukunftsgerichtete Überprüfung handelt, kann erst nach Ablauf des Simulationszeitraums eine Aussage zur Validität getroffen werden. Zudem soll nochmals betont werden, dass es nicht Zweck des Modells ist, eine detaillierte Prognose zu tätigen, sondern eine Aussage darüber zu treffen, wie sich das Systemverhalten qualitativ auf Grundlage vorheriger Entwicklungen verhalten wird. Dieses Verhalten kann ebenfalls anhand der Verhaltensbeispiele in Kapitel 7.3 überprüft werden (z. B. das bei einem Einbruch der Nachfrage Überkapazitäten entstehen und abbeschriebene Anlagen nicht ersetzt werden, wodurch die Produktionskapazitäten sinken). In Vorgriff auf Kapitel 8.3 können die Ergebnisse des Modells mit Annahmen zur Entwicklung der Herstellkosten für Batteriesysteme vereinfachend verglichen werden (vgl. Abbildung 9). Die Simulationsergebnisse gehen mit diesen weitestgehend konform und entsprechen in ihrem Wert den dortigen Angaben.²⁴⁷ Ein Vergleich der Dimensionierung des Produktionssystems und der damit einhergehenden Investitionen ist aufgrund fehlender Referenzanlagen kaum möglich. Lediglich das Unternehmen Tesla Motors plant derzeit eine Produktionsanlage in diesem Maßstab. Als Rahmenwerte für diese „Gigafactory“ nennt Tesla Kapazitäten für die Produktion von 500.000 Fahrzeugbatterien. Bei einer Batteriekapazität von 70 kWh für einen „Tesla Model S“ entspräche dies einer Gesamtproduktionskapazität von 35 Mio kWh/Jahr. Die Gesamtfläche des Werkes soll in etwa 1,2 Mio. m² betragen und die Investitionen in Produktionsanlage bis zum Jahr 2030 bei ca. 3,9 Mrd. \$ liegen (vgl. Tesla Motors 2014a;

²⁴⁷ *Zum einfachen Vergleich der simulierten Selbstkosten mit denen aus anderen Quellen, werden bei den entsprechenden Ergebnissen in Kapitel 8.3 ebenfalls die Werte aus den Quellen in Abbildung 9 abgebildet.*

Hidalgo 2014). Ein Vergleich dieser Rahmenwerte mit denen aus dem Simulationslauf, wie sie z. B. in Abbildung 64 abgebildet sind,²⁴⁸ zeigt dabei eine große Ähnlichkeit bezüglich der Investitionen auf.²⁴⁹ Zu beachten ist bei der Interpretation der Ergebnisse, dass die linke Abbildung die Sachanlagen in Produktionsanlagen (in €) zeigt. Betrachtet man die Gesamtinvestitionen bis 2030 in Anlagen und in Gebäude, belaufen sich diese auf ca. 5,1 Mrd. € und liegen somit geringfügig höher²⁵⁰ als der von Tesla proklamierte Wert von 5 Mrd. US\$.

Letztlich wird das Modell noch auf seine Verhaltenssensitivität hin getestet. Aufgrund des hohen Stellenwertes der Validierung zur Vertrauensbildung in das Modell, soll dem Entscheider nicht nur das Ausmaß der Unsicherheiten von Systemgrößen unter Sensitivitäten verdeutlicht werden, sondern zusätzlich auch die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit anstelle einer klassischen Sensitivitätsanalyse eine Risikoanalyse durchgeführt. Mit Hilfe von Risikoanalysen kann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Entwicklung der Systemgrößen durch die Variation eines oder mehrerer Inputparameter bestimmt werden (vgl. Götze 2008; Klein und Scholl 2011). Dieses Vorgehen erscheint in Anbetracht der bestehenden Unsicherheiten bezüglich der Daten sowie deren zukünftiger Entwicklung als notwendig. Zudem ist es vor dem Hintergrund des Ziels, robuste Produktionsstrategien zu identifizieren, unerlässlich, dem Entscheider auch einen Überblick über die mögliche Breite und Empfindlichkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Die Software Venism bietet in diesem Kontext die Möglichkeit zur Durchführung von simulationsbasierten Risikoanalysen. Es besteht die Möglichkeit des Latin-Hypercube-Sampling sowie der univariaten oder multivariaten Sensitivitätsanalyse (vgl. Ventana 2002). Bei der Risikoanalyse im Rahmen dieser Arbeit werden dabei sowohl univariate als auch multivariate Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Zu diesem Zweck werden folgende Parameter variiert, die als potentiell sensitiv und mit großem Einfluss auf die Zielgrößen eingeschätzt werden. Die aufgeführten Parameter werden zumeist um 20 % ihres Ausgangswertes verändert.

Die Risikoanalyse erfolgt im Normalfall im Anschluss an die Simulation (in diesem Fall der exemplarischen Anwendung in Kapitel 8). Aufgrund des iterativen Charakters des Modellierungsprozess für systemdynamische Simulationsmodelle (vgl. Abbildung 40)

²⁴⁸ Die der Abbildung zugrundeliegende Produktionskapazität ist mit ca. 24 Mio. kWh/Jahr geringer, wobei hier berücksichtigt werden muss, dass ebenfalls auch PHEV-Batterien mit einer geringeren Batteriekapazität gefertigt werden. Bei reiner BEV-Produktion wäre die Produktionskapazität entsprechend um 7,3 Mio. kWh/Jahr größer.

²⁴⁹ Ein direkter Vergleich ist hierbei jedoch nur bedingt möglich, da es sich um 18650er Zellen mit einer kleineren Zellkapazität handelt. Entsprechend sind im Vergleich zu großformatigen Zellen mehr Einzelschritte in der Fertigung notwendig. Auf der anderen Seite sind die Prozesse zur Fertigung der 18650er Zellformate bereits bestens aus dem Consumer-Bereich bekannt.

²⁵⁰ In Abhängigkeit des Dollarkurses.

und dem thematischen Kontext, soll die Risikoanalyse ebenfalls im Rahmen dieses Kapitels an dieser Stelle betrachtet werden.²⁵¹ Die Anzahl der Simulationsläufe,²⁵² die der Risikoanalyse zugrunde liegen, beträgt 200. Die Ergebnisse der fünf Analysen in Bezug auf die Zielgrößen Selbstkosten und Lieferzeit können im Anhang 2 eingesehen werden.

Tabelle 18: Im Rahmen der Risikoanalyse variierte Inputparameter

Varierte Inputparameter	Einheit	Ausgangswert	Min	Max
1 Kosten für Aktivmaterial neg pro kg	[\$/kg]	19	15,2	22,8
Kosten für Aktivmaterial pos pro kg	[\$/kg]	26	20,8	31,2
Kosten für Elektrolytbedarf pro kWh	[\$/l]	21,6	17,28	25,92
2 Dollarkurs*	[\$/€]	0,735	0,5	0,9
3 Fixer Marktanteil*	[Dmnl]	0,05	0,01	0,1
4 Abschreibungsdauer Gebäude	[Monat]	240	144	300
Abschreibungsdauer Anlagen	[Monat]	72	48	108
Batteriekapazität je BEV	[kWh/Fzg]	21,6	17,3	25,9
5 Batteriekapazität je HEV	[kWh/Fzg]	1,4	1,1	1,6
Batteriekapazität je PHEV	[kWh/Fzg]	7,1	5,7	8,5

*Wird um mehr bzw. weniger als 20 % variiert

Es zeigt sich, dass die Unsicherheit bzgl. der wichtigsten Materialkosten im langfristigen Verlauf wenig Einfluss auf das Ergebnis der Selbstkosten oder der Lieferzeit ausüben. Die Wirkung eines veränderten Dollarkurses wirkt sich dagegen deutlich stärker aus. Da dieser als Umrechnungsfaktor zur Bestimmung der Selbstkosten dient, ist dies jedoch erstens wenig verwunderlich und zweitens ein Effekt, der sich auf den gesamten Markt auswirkt und daher nicht direkt die Qualität der Entscheidung beeinflusst.²⁵³ Wird der anfängliche Marktanteil stark variiert, zeigt sich insbesondere zu Beginn ein erheblicher Einfluss auf die Selbstkosten, der sich jedoch mittel- bis langfristig egalisiert. Mit Blick auf die Lieferzeit können mittelfristig jedoch mitunter beträchtliche Lieferverzögerungen entstehen, die sich langfristig wieder relativieren. Bei einer Variation der Abschreibungsdauer von Produktionsanlagen und Gebäuden macht sich dies bei den Selbstkosten anfänglich moderat bemerkbar und verliert schnell an Einfluss auf die Zielgröße. Auch mit Blick auf die Lieferzeit wirkt sich die veränderte Abschreibungsdauer lediglich

²⁵¹ Entsprechend stützt sich die Risikoanalyse auf Simulationsergebnisse und die Parametrisierung des nachfolgenden Kapitels 8.

²⁵² Die Simulation wurde auf Basis des diffusionsstarken Szenarios EA durchgeführt, um eine möglichst starke Ausprägung zu erzielen. Als zugrundeliegende Produktionsstrategie wurde eine Kompletthanbieterstrategie gewählt, um zu vermeiden, dass evtl. Aspekte aufgrund der Strategie ausgegrenzt werden.

²⁵³ Etwaige Wechselkurseffekte bei der Vermarktung sind hiervon jedoch ausgeschlossen.

langfristig und in geringem Maße aus. Im Gegensatz hierzu ist die Unsicherheit bei den Selbstkosten durch eine veränderte Batteriekapazität deutlich länger zu beobachten und ist auch mittel- und langfristig noch deutlich zu erkennen. Die Unsicherheit bezüglich der Lieferzeit ist ebenfalls insbesondere im mittleren Simulationsverlauf recht hoch und kann über drei Monate hinaus gehen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Modell bezüglich der Tests zur Validierung ein robustes und realitätskonformes Verhalten aufzeigt. Die verwendeten Parameter sind realitätsnah und plausibel. Die verwendeten Einheiten konsistent. Die Modellstruktur und -grenzen können für die vorliegende Fragestellung als adäquat und konform zum Realsystem angesehen werden. Die durchgeführten Risikoanalysen offenbaren mit Ausnahme von Unsicherheiten resultierend aus der Variation der anfänglichen Marktanteilen und der Batteriekapazitäten eine überwiegende Robustheit der Zielgrößen auf unsichere Inputparameter. Der Validierungsprozess des Entscheidungsunterstützungssystems kann somit als positiv gewertet werden. Das validierte Modell kann daher im nachfolgenden Kapitel exemplarisch angewendet werden.

8 Exemplarische Anwendung des strategischen Entscheidungsunterstützungssystem

Das validierte Simulationsmodell kann nun im Kontext der Planungsmethodik, entsprechend des in Abbildung 38 definierten Vorgehen, zur Entscheidungsunterstützung bei der Wahl einer Produktionsstrategie exemplarisch angewandt werden. Hierzu werden vorab in Kapitel 8.1 die wesentlichen Rahmenbedingungen und das Vorgehen erläutert sowie das Zielsystem für das *SEPP* definiert. In Kapitel 8.2 erfolgt die entsprechende Parametrisierung der Handlungsalternativen, der Umweltszenarien sowie der Modellsektoren des Entscheidungsunterstützungssystems. Der Einsatz des *SEPP* im Rahmen von Simulationsstudien ist Gegenstand des Kapitels 8.3, wobei alternative Produktionsstrategien unter verschiedenen Umweltszenarien simuliert werden und bezüglich ihrer Zielerreichung multikriteriell bewertet werden. Zur Identifikation einer robusten Produktionsstrategie erfolgt anschließend eine szenarioübergreifende Bewertung der Produktionsstrategien nach unterschiedlichen Produktlebenszyklusphasen (FF4) sowie unter Berücksichtigung verschiedener Wettbewerbsstrategien (FF5).

8.1 Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden die Rahmenbedingungen für die spätere exemplarische Anwendung erläutert. Hierzu wird in Kapitel 8.1.1 die Motivation und Ausgangslage für die Anwendung des *SEPP* beschrieben, bevor in Kapitel 8.1.2 die Ziele näher konkretisiert werden, die es mit Hilfe der Produktionsstrategien zu erreichen gilt.

8.1.1 Ausgangssituation

Die Entscheidung über den Eintritt und die Art der Partizipation in einem jungen Markt, stellt eine Entscheidung von hoher strategischer Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit und die Zukunft eines Unternehmens dar. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit auch kein konkretes Fallbeispiel anhand eines Unternehmens behandelt. Stattdessen wird die Eignung der Planungsmethodik und des *SEPP* anhand einer exemplarischen Anwendung demonstriert. Damit dies jedoch nicht auf einer rein hypothetischen Ebene geschieht und die Realitätsnähe und Praxistauglichkeit gewahrt bleiben, wird anstatt auf einen Planer oder Unternehmen, das sich mit einem Markteintritt beschäftigt, auf solche zurückgegriffen, die diesen bereits getätigt haben. So wurde in Zusammenarbeit mit zwei Akteuren der Wertschöpfungskette das Zielsystem mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens ausgearbeitet (vgl. Kapitel 8.1.2).²⁵⁴ Bei der Auswahl dieser Akteure wurde zwecks eines tiefgehenden Verständnisses und übergreifenden

²⁵⁴ *Da die Bitte bestand, eine realistische Einschätzung bezüglich der Ausprägungen und Relevanz der Kriterien wiederzugeben und diese von teils sensiblem Charakter sind, wurde in diesem Zuge den Akteuren Anonymität zugesichert.*

Blick auf die Thematik darauf geachtet, dass sie über Erfahrungen in allen für die Fragestellung relevanten Wertschöpfungsstufen der Li-Traktionsbatterieproduktion (mit Ausnahme des Recyclings) verfügen. Da im Rahmen der multikriteriellen Bewertung zudem externe standortabhängige Kriterien mit betrachtet werden, ist eine objektive Einschätzung der Akteure bezüglich der Kriterienausprägung in den jeweiligen Ländern notwendig, weshalb deren Produktionsstätten auch in den betrachteten Ländern liegen mussten. Auf Basis deren Einschätzung werden die Ziele, Präferenzen sowie landesspezifischen Ausprägungen der Zielgrößen ermittelt. Diese dienen als Eingangsgrößen für die multikriterielle Bewertung. Der daran anschließende weitere Verlauf des Anwendungsbeispiels ist identisch mit dem Vorgehen bei einer ex ante Bewertung. Wobei je nach subjektiver Präferenz, der Entscheidungsraum weiter eingeengt oder ausgeweitet werden kann (z. B. falls nur ein konkreter Produktionsstandort oder nur eine konkrete Wettbewerbsstrategie in Frage kommen würde).

Als Rahmenbedingungen für das Anwendungsbeispiel wird davon ausgegangen, dass das Produkt LiB mit NMC-Materialien in einem prismatischen Gehäuse gefertigt wird. Diese Annahmen stellen derzeit entsprechend Kapitel 3.1 weitestgehend den State-of-the-Art dar, dem zudem eine zeitweilige Zukunftsfähigkeit zugesprochen wird. Ferner gelten die bereits in Kapitel 7.2.1.3 definierten zeitlichen und räumlichen Modellgrenzen. Als potentielle Standorte werden die USA und China als Optionen betrachtet. Die Auswahl beruht zum einen auf den teils stark unterschiedlich ausgeprägten harten und weichen Standortfaktoren sowie aus deren Stellung in der Standortdiskussion. Während die USA derzeit das Land mit dem größten Kapazitätsbedarf ist, wird China das größte Potential bezüglich einer kostenminimalen Produktion zugesprochen (vgl. Thielmann et al. 2014).

8.1.2 Definition des Zielsystems

Wesentlicher Bestandteil der Entscheidungsfindung stellt die Definition eines Zielsystems dar. Entsprechend Kapitel 5.2.2 besteht ein Zielsystem aus den Zielgrößen sowie den Präferenzrelationen des Entscheiders. Im Rahmen der Planungsmethodik wurde der standardisierte Fragebogen²⁵⁵ als geeignete Methode zu deren Erhebung identifiziert. Für die exemplarische Anwendung wurden beide Akteure gebeten, die Zielkriterien entsprechend ihrer derzeitigen und zukünftigen Relevanz sowie ihrer derzeitigen und zukünftigen Ausprägung in dem jeweiligen Land zu beurteilen. Die Ergebnisse dieser Befragung sind nachfolgend dargestellt.

²⁵⁵ Der verwendete Fragebogen ist im Anhang 3 abgebildet.

Tabelle 19: Einschätzung zur Relevanz und Ausprägung von Kriterien

Kriterium	Relevanz				Ausprägung			
	Cn		USA		Cn		USA	
	Ist	Trend	Ist	Trend	Ist	Trend	Ist	Trend
Produktionskosten	5	⇨	4	⇨	4	⇩	3	⇩
Lieferzeit	4	⇨	4	⇨	3	⇨	3	⇩
Verf. von qual. Personal	4	⇨	4	⇨	3	⇩	3	⇨
Nähe zum Kunden	4	⇩	4	⇩	3	⇩	4	⇨
Schutz geistigen Eigentums	3	⇩	5	⇩	3	⇩	4	⇨
Landesspez. Förderungen	5	⇨	3	⇩	3	⇨	3	⇩
Soz. Produktionsbedingungen	3	⇨	3	⇨	4	⇨	3	⇩

Allen Kriterien wird eine recht hohe Relevanz eingeräumt. Dies liegt stark in dem Prozess zu deren Auswahl begründet. Die Kriterien wurden zuerst auf Basis der Literatur identifiziert und anschließend in Expertengesprächen auf die relevantesten konsolidiert. Nichtsdestotrotz können dennoch deutliche Tendenzen zu einzelnen Kriterien festgestellt werden. Weiterhin werden die Kriterien von beiden Akteuren zumeist übereinstimmend bewertet, was für eine gewisse Validität der Bewertung spricht. Auf Grundlage von Tabelle 19 lassen sich somit als relevante Kriterien, die direkt im Rahmen der Modellierung betrachtet werden, folgende auswählen: Die Gesamtproduktionskosten sowie die Lieferzuverlässigkeit und Lieferzeit, die zu einem Kriterium zusammengefasst werden. Die Kriterien zeigen sich somit ebenfalls identisch mit den in Tabelle 8 genannten Zielen der Produktion, wobei die Qualität im Fall der Batterieproduktion als Kriterium ungeeignet ist, da diese per se als gegeben vorausgesetzt wird. Neben diesen klassischen Zielen, die im Rahmen der Befragung nochmals als solche bestätigt wurden, werden zudem einer Reihe weiterer Kriterien eine hohe Relevanz zugesprochen. Da es sich bei diesen überwiegend um qualitative Ziele handelt, die zumeist standortabhängige Faktoren widerspiegeln, werden diese Kriterien zu einer weiteren Zielgröße „Externe standortabhängige Faktoren“ aggregiert. Die Handlungsalternativen werden nachfolgend entsprechend den in Tabelle 19 dargestellten Zielkriterien bewertet.

8.2 Parametrisierung

Die Verwendung des Modells zur Entscheidungsunterstützung bei der Wahl einer Produktionsstrategie bedingt die vorherige Parametrisierung des Modells.²⁵⁶ Ebenfalls muss die Definition der zu untersuchenden Handlungsalternativen in Form von Produktionsstrategien sowie von potentiellen Szenarien erfolgen. Hierbei kann eine Unterscheidung der Parameter in drei Klassen vorgenommen werden: In Parameter, die

²⁵⁶ Die Parametrisierung der Produktionsstrategien, Szenarien und standortabhängigen externen Kriterien wird dagegen Gegenstand von 8.2.2.2 sein.

gänzlich unabhängig von der Wahl der Alternative oder Umweltzuständen der grundsätzlichen Parametrisierung des Simulationsmodells dienen (vgl. Kapitel 8.2.1). Solche, die vom Entscheider im Rahmen der Produktionsstrategie variiert werden können (vgl. Kapitel 8.2.2) und solche, auf die der Entscheider keinen Einfluss hat und die der Abbildung unterschiedlicher Umweltzustände bei der Entscheidungsfindung dienen (vgl. Kapitel 8.2.3).

8.2.1 Parametrisierung der Modellsektoren

Gegenstand der Parametrisierung der Modellsektoren stellen solche Größen dar, die für die Funktion des Modells essentiell sind und im Zuge der Simulationsstudien nicht variiert werden. Schwerpunktmäßig betrifft dies die Sektoren der Unternehmensentwicklung, die als zentrale Datenkomponente des *SEPP* fungieren sowie die (Sub-)Sektoren Nachfrage und Recycling.

Die Parametrisierung des Sektors „Nachfrage“ umfasst die Definition der potentiellen Kunden und der sich entwickelnden Nachfrage. Beide stellen szenarioabhängige Variablen dar, die in Kapitel 8.2.3 erläutert werden. Die Zeit bis eine Fahrzeugbatterie obsolet wird, basiert auf den Richtwerten der Nationalen Plattform Elektromobilität (vgl. NPE 2010b) für das Jahr 2017. Ähnliche Annahmen finden sich zudem in Kwade und Bärwaldt (2012). Die modellierten Batteriesysteme der jeweiligen Elektrofahrzeuge sind bzgl. der Batteriekapazität, Zellanzahl und Leistung angelehnt an Batteriesysteme von Fahrzeugen aus der Flotte der BMW AG.²⁵⁷

Diese grundlegenden Batteriesystemeigenschaften bildeten die Eingangsparameter für die Modellierung der jeweiligen Batteriesystems im BatPac-Modell²⁵⁸, wodurch wiederum genauere Informationen über Material- und Komponentenbedarfe im gleichnamigen Subsektor generiert werden. Aufgrund dessen, dass die fahrzeugspezifischen Batteriesysteme unterschiedliche Leistungen aufweisen, unterscheiden sie sich auch entsprechend ihrer Material- und Komponentenzusammensetzung und müssen daher für jedes Batteriesystem separat erhoben werden. Die Ergebnisse hierzu, die zugleich der Parametrisierung des Subsektors dienen, sind in Tabelle 20 zusammengefasst.

Die Angaben im BatPaC-Modell erfolgen material- bzw. komponentenspezifisch z. B. in Gramm, Liter, Quadratmeter oder Stück je Zelle und müssen demzufolge auf die Einheit kWh umgerechnet werden.

²⁵⁷ Als Referenz für das HEV-Batteriesystem diente der BMW ActiveHybrid 5, für den PHEV der BMW i8 und für den BEV fugierte das Batteriesystem des BMW i3 als Vorlage (vgl. Scott 2013, Griebel et al. 2011; BMW AG 2014).

²⁵⁸ Die Materialkosten im BatPaC-Modell geben die Kosten zum Zeitpunkt der Veröffentlichung wider. Die Annahmen basieren auf Aussagen von Experten sowie wissenschaftlichen Veröffentlichungen (vgl. ANL 2012).

Tabelle 20: Material- und Komponentenbedarf in kWh nach Batterietypen

Material / Komponente	Einheit	Batterietyp		
		HEV	PHEV	BEV
Aktivmaterial pos.	[kg/kWh]	1,5	1,6	1,6
Kohlenstoff	[kg/kWh]	0,1	0,1	0,1
Bindemittel PVDF	[kg/kWh]	0,1	0,1	0,1
Binderlösemittel NMP	[kg/kWh]	2,1	2,1	2,1
Aktivmaterial neg.	[kg/kWh]	1,1	1,1	1,1
Carbon Black	[kg/kWh]	0,0	0,0	0,0
Bindemittel	[kg/kWh]	0,1	0,1	0,1
Zellableiterbedarf pos.	[m ² /kWh]	38,3	6,8	4,0
Zellableiterbedarf neg.	[m ² /kWh]	40,8	7,4	4,4
Separator	[m ² /kWh]	77,6	13,7	8,1
Elektrolyt	[l/kWh]	1,3	0,7	0,6
Kontaktfahne pos.	[kg/kWh]	71,3	13,5	4,4
Kontaktfahne neg.	[kg/kWh]	71,3	13,5	4,4
Zellcontainer	[Stk/kWh]	71,3	13,5	4,4
Wärmeableiter (Al)	[Stk/kWh]	71,3	13,5	4,4

Durch die Einheitentransformation können die Materialien mit der eingehenden Auftragsmenge multipliziert werden. Der Subsektor „Material- und Komponentenkosten“ komplementiert die Bedarfe mit den spezifischen Kosten, die ebenfalls aus dem BatPaC-Modell extrahiert werden. Die Kosten für die jeweiligen Materialien sind, mit Ausnahme solcher, die als Einzelstück bzw. -komponente vorliegen, über die Batterietypen hinweg gleich.

Die Komponenten, die stückweise verwendet werden, können ohne Transformation direkt den Kosten je kWh zugeordnet werden.

Letzter Bestandteil des Sektors Unternehmensentwicklung ist der Subsektor Unternehmensskalierung. Wie in Kapitel 7.3.3.1 beschrieben, setzt er sich aus den Bereichen Personal, Anlageninvestitionen und Flächenbedarf zusammen und hat die Funktion, das Unternehmen so zu dimensionieren, dass die sich aus den Produktionsaufträgen ergebende Menge an Materialien und Komponenten, verarbeitet werden kann. Hierzu ist der Subsektor mit entsprechenden Basisparametern für die jeweiligen Bereiche zu versehen, die als Grundlage für die Berechnung der Größendegression dienen. Diese Basisparameter sowie der entsprechende Größendegressionskoeffizient p , sind nachfolgend in Tabelle 22 für alle Bereiche und alle Prozessschritte aufgelistet.

Tabelle 21: Material- und Komponentenkosten je Einheit nach Batterietypen

Material / Komponente	Einheit	Batterietyp		
		HEV	PHEV	BEV
Aktivmaterial pos.	[\$/kg]	28,5	28,5	28,5
Kohlenstoff	[\$/kg]	6,8	6,8	6,8
Bindemittel PVDF	[\$/kg]	10,0	10,0	10,0
Binderlösemittel NMP	[\$/kg]	3,2	3,2	3,2
Aktivmaterial neg.	[\$/kg]	19,0	19,0	19,0
Carbon Black	[\$/kg]	6,8	6,8	6,8
Bindemittel	[\$/kg]	10,0	10,0	10,0
Zellableiterbedarf pos.	[\$/m ²]	0,8	0,8	0,8
Zellableiterbedarf neg.	[\$/m ²]	1,8	1,8	1,8
Separator	[\$/m ²]	2,0	2,0	2,0
Elektrolyt	[\$/l]	21,6	21,6	21,6
Kontaktfahne pos.	[\$/kWh]	18,7	3,6	1,3
Kontaktfahne neg.	[\$/kWh]	22,0	4,7	1,9
Zellkontainer	[\$/kWh]	16,4	3,6	1,6
Komponenten-Modul	[\$/kWh]	125,1	25,8	10,8
Komponenten-Batteriepack	[\$/kWh]	98,1	16,7	12,3
Batteriemanagement	[\$/kWh]	174,1	61,3	22,0
Thermomanagement	[\$/kWh]	103,7	28,2	10,2

Eine weitere große Datenkomponente stellt der Subsektor Recycling dar. Die verwendeten Parameter stammen dabei überwiegend aus Kwade und Bärwaldt (2012).

Die Parametrisierung umfasst dabei für jeden Recyclingschritt den Deckungsbeitrag, die kalkulatorischen Kosten, Transportkosten und spezifische Degressionsfaktoren. Zusätzlich werden für die einzelnen Fahrzeugtypen entsprechende Batteriemassen und BEV-Äquivalente definiert sowie die Stundenlöhne für das Personal.

Die Parametrisierung der übrigen Sektoren und Subsektoren konnte mit weniger Aufwand vorgenommen werden. Im Subsektor „Produktionskapazitäten“ wurden die Anfangskapazität der Anlagen auf 72.500 kWh dimensioniert, was entsprechend Kapitel 3.2.1 und Tabelle 22 dem Aufbau einer einzelnen Produktionslinie entspricht. Ebenso wurde das Personal im betreffenden Subsektor dimensioniert. Die Dauer der Kapazitätsanpassung für Produktionsanlagen wurde auf 9 Monate geschätzt (inkl. Bestellung, Installation und Hochlauf). Die Planungsperioden für die Entscheidung über Kapazitätsneubeschaffungen betragen entsprechend ebenfalls neun Monate, sodass erst nach dem Hochlauf der bestellten Anlagen über die Beschaffung weiterer entschieden wird. Als Akquisedauer für das Personal wurde von einem Zeitraum von drei Monaten ausgegangen, während der Zeitbedarf zur Beschaffung von Materialien im gleichnamigen

Sektor aufgrund der globalen Verteilung der Produktionsstätten mit vier Monaten angenommen wird.

Tabelle 22: Grundparametrisierung der Prozessschritte (vgl. ANL 2012)

Prozessschritt	Jährliche Basisrate		Direkte Arbeit			Anlageninvest		Werksfläche	
	Einheit		Arbeiter/ Schicht	Std./ Jahr	Faktor, p	Mio. \$	Faktor, p	Fäche, m^2	Faktor, p
Wareneingang	869.416	kWh	3	14.400	0,4	3,60	0,6	900	0,5
Materialvorbereitung									
Positive Elektrode	1.712.524	kg	2	14.400	0,5	2,00	0,7	600	0,6
Negative Elektrode	1.060.374	kg	2	14.400	0,5	2,00	0,7	600	0,6
Elektrodenbeschichtung									
Positives Material	8.209.039	m^2	4	28.800	0,5	8,00	0,8	750	0,8
Negatives Material	8.209.039	m^2	4	28.800	0,5	8,00	0,8	750	0,8
Lösungsmittelrückgew.	2.309.021	kg	2	14.400	0,4	3,00	0,6	225	0,6
Kalandern									
Positive Elektrode	8.209.039	m^2	2	14.400	0,5	1,00	0,7	225	0,6
Negative Elektrode	8.209.039	m^2	1	7.200	0,5	1,00	0,7	225	0,6
Material Handling	8.209.039	m^2	4	28.800	0,7	1,50	0,7	900	0,6
Elektrodenschneiden	8.209.039	m^2	4	28.800	0,5	2,00	0,7	300	0,6
Vakuumtrocknen	8.209.039	m^2	2	14.400	0,5	1,60	0,7	300	0,6
Betreiben eines Kontrolllabors	869.416	kWh	4	28.800	0,5	1,50	0,7	300	0,6
Zellstapeln	6.315.789	Zellen	5	36.000	0,7	4,00	0,8	600	0,8
Anschweißen des Stromabnehmers	6.315.789	Zellen	5	36.000	0,7	4,00	0,8	600	0,8
Einsetzen in den Zellcontainer	6.315.789	Zellen	3	21.600	0,5	3,00	0,7	600	0,6
Befüllung mit Elektrolyt und Versiegeln	6.315.789	Zellen	5	36.000	0,5	5,00	0,7	900	0,6
Trockenraummanag.	2.000	m^2	2	14.400	0,4	20,00	0,6	100	0,4
Formierung	6.315.789	Zellen	8	57.600	0,7	30,00	0,8	2.200	0,8
Zellversiegelung	6.315.789	Zellen	2	14.400	0,5	2,00	0,7	450	0,6
Testen der Ladungserhaltung	6.315.789	Zellen	3	21.600	0,4	4,75	0,7	900	0,6
Modulmontage	6.000.000	Zellen	6	43.200	0,5	6,00	0,7	600	0,6
Batteriepack-Montage und finale Überprüfung	100.000	Systeme	6	43.200	0,5	6,00	0,7	900	0,6
Ausschussaufbereitung	6.315.789	Zellen	5	36.000	0,7	2,50	0,7	600	0,6
Warenausgang	869.416	kWh	6	28.800	0,5	5,00	0,7	900	0,6

Die geplante Lagerreichweite liegt bei einem Monat. Die Akzeptanzgrenze für die Lieferzeit im Subsektor „Produktion“ wurde ebenfalls bei einem Monat festgelegt. Während die Zahlungen für eine darüber hinaus verspätete Lieferung linear bis zu einem Faktor eins bei vier Monaten Verzögerung ansteigen. Abschließend ist noch zu erwähnen, dass das Modell mit einem anfänglichen Marktanteil von 4 % initialisiert wird. Dieser Wert ist notwendig, um eine kritische Menge an Aufträgen zu erhalten, die zu einer wahrnehmbaren Kostendegression in relevantem Maße führen kann. Ferner ist dieser Grundanteil

auch notwendig, um in Gesprächen mit Lieferanten von diesen auch als relevanter Kunde wahrgenommen zu werden und entsprechend beliefert zu werden.

Tabelle 23: Parametrisierung des Subsektors Recycling

Parameter	Wert	Einheit
Batteriemasse BEV	0,33	[t/Fzg]
Batteriemasse HEV	0,03	[t/Fzg]
Batteriemasse PHEV	0,17	[t/Fzg]
BEVäqui BEV	1,0	[BEVäqui/Fzg]
BEVäqui HEV	0,1	[BEVäqui/Fzg]
BEVäqui PHEV	0,3	[BEVäqui/Fzg]
Deckungsbeitrag Stofffluss Demontage	439	[€/t]
Deckungsbeitrag Stofffluss Mech Aufbereitungsrate	340	[€/t]
Deckungsbeitrag Stofffluss NMC Hydro Aufbereitungsrate	623	[€/t]
Degressionsfaktor Demontage	0,67	[Dmnl]
Degressionsfaktor Hydro Aufbereitung	0,50	[Dmnl]
Degressionsfaktor Mech Aufbereitung	0,38	[Dmnl]
Degressionsfaktor Umschlag	0,62	[Dmnl]
Demontage Base Kapa	500	[BEVäqui/Monat]
Hydro Aufbereitung Base Kapa	5208	[BEVäqui/Monat]
Kalkulatorische Kosten Demontage Base	3915	[€/Monat]
Kalkulatorische Kosten Hydro Aufbereitung Base	83333	[€/Monat]
Kalkulatorische Kosten Mech Aufbereitung Base	16773	[€/Monat]
Kalkulatorische Kosten Umschlag Base	2109	[€/Monat]
Lohnkosten Recycling Base	20	[€/Std]
Mech Aufbereitung Base Kapa	500	[BEVäqui/Monat]
Pagatorische Kosten Demontage Base	18893	[€/Monat]
Pagatorische Kosten Hydro Aufbereitung Base	112500	[€/Monat]
Pagatorische Kosten Mech Aufbereitung Base	9968	[€/Monat]
Pagatorische Kosten Umschlag Base	3591	[€/Monat]
Transport Demontage	5	[€/t]
Transport Hydro Aufbereitungsrate	6	[€/t]
Transport Mech Aufbereitungsrate	6	[€/t]
Umschlag Kapazität Base	833	[BEVäqui/Monat]

Während die hier genannten Parameter unabhängig von der verfolgten Strategie oder dem Umweltszenario sind, werden ebendiese in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

8.2.2 Formulierung und Parametrisierung der Strategiealternativen

8.2.2.1 Formulierung der Produktionsstrategien

Die Definition und Parametrisierung der Strategiealternativen erfolgt auf Basis der Ergebnisse aus dem Teil A dieser Arbeit. Während in Kapitel 4.2 bereits der Rahmen möglicher Produktionsstrategien eingeengt wurde, erfolgt hier die konkrete Ausgestaltung dieser Teilstrategien. Als geeignetes Hilfsmittel wurde in Kapitel 5.3.2 der morphologische Kasten bestimmt. Dieser ist speziell für die Anforderungen der exemplarischen Anwendung in Abbildung 70 dargestellt.

Teilstrategie	<i>Optionen der Teilstrategie</i>			
Standortstrategie	<i>USA</i>		<i>China</i>	
Kapazitätsstrategie	<i>Follow</i>	<i>Match</i>	<i>Lead</i>	
Strategie der Fertigungstiefe	<i>Zukauf Batteriezelle</i>	<i>Zukauf Batteriemodul</i>	<i>Komplettes Batteriesystem</i>	<i>Recycling der Batterie</i>
Produkt Technologiestrategie Prozess	<i>Hochleistungs- & Hochenergiebat.</i>		<i>Hochenergiebatterie</i>	
	<i>Standard Austauschrate</i>		<i>Verkürzte Austauschrate</i>	

Abbildung 70: Morphologischer Kasten zur Ableitung der Produktionsstrategien

Auf der Grundlage des Morphologischen Kastens lassen sich systematisch unterschiedliche Kombinationen von Strategiealternativen bestimmen. Für die exemplarische Anwendung wurden insgesamt sechs alternative Produktionsstrategien formuliert und in Tabelle 24 aufgelistet.

Bei deren Auswahl wurde insbesondere darauf geachtet, dass deren Analyse einen möglichst großen Erkenntnisgewinn verspricht.²⁵⁹ Sie sollen zum einen möglichst stark unterschiedliche Ausprägungen besitzen und zum anderen dennoch miteinander vergleichbar sein. So zielen die Strategien „Komplettanbieter“ (S1/S3) und „High-Tech-Integrator“ (S2/S4) darauf ab, die Vorteilhaftigkeit eines Zellzukaufs, der Einbindung von

²⁵⁹ Weitere Strategien können ebenfalls mit in die Betrachtung einbezogen werden, wobei insbesondere bei der Darstellung der Nettoflüsse die Übersicht und somit die Nachvollziehbarkeit stark vermindert werden kann. Für die exemplarische Anwendung stellt daher aus Sicht des Autors eine Anzahl von sechs Strategien das Optimum bezüglich Anzahl und Transparenz dar.

Recyclingaktivitäten sowie verschiedener Analgen austauschraten zu untersuchen. Ein Vergleich dieser Strategien auf Standortebene (S1/S2/S5) mit (S3/S4/S6), ermöglicht es weiterhin, Rückschlüsse über deren spezifische Eignung zu ziehen. Die Strategien „Spezialist“ verkörpern dagegen etwas passivere Produktionsstrategien, bei denen die Kapazitäten entsprechend der Match-Strategie²⁶⁰ aufgebaut werden und der Fokus von Anfang an auf die Produktion von Hochenergiebatterien für PHEV und BEV gelegt wird.

Tabelle 24: Tabellarische Ansicht der auf Basis des morphologischen Kastens definierten Produktionsstrategien

	Komplett-anbieter USA (S1)	High-Tech-Integrator USA (S2)	Komplett-anbieter CN (S3)	High-Tech-Integrator CN (S4)	Spezialist USA (S5)	Spezialist CN (S6)
USA	✓	✓			✓	
China			✓	✓		✓
Match					✓	✓
Lead	✓	✓	✓	✓		
Hochleistungsbat.	✓	✓	✓	✓		
Hochenergiebat.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Schneller Ersatz		✓		✓		
Normaler Ersatz	✓		✓		✓	✓
Zelle	✓		✓		✓	✓
Batteriesystem	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Recycling	✓		✓			

Für die Kennzeichnung der Strategien in den nachfolgenden Abbildungen und Diagrammen werden folgende Abkürzungen verwendet.

Tabelle 25: Zuordnung verwendeter Abkürzungen zu Strategiealternativen

Strategie	Komplett-anbieter USA (S1)	High-Tech-Integrator USA (S2)	Komplett-anbieter CN (S3)	High-Tech-Integrator CN (S4)	Spezialist USA (S5)	Spezialist CN (S6)
Abkürzung	S1_KA_USA	S2_HTI_USA	S3_KA_CN	S4_HTI_CN	S5_SP_USA	S6_SP_CN

²⁶⁰ Die Follow-Strategie wurden von der Betrachtung ausgegrenzt, da sie in den Voruntersuchungen durchweg schlechter abgeschnitten hat und für die exemplarische Anwendung daher keinen explikativen Mehrwert bietet.

8.2.2.2 Parametrisierung der Produktionsstrategien

Die Produktionsstrategien stellen endogene Entscheidungsregeln für die Simulation dar, auf deren Grundlage Variablen oder Konstanten ein bestimmter Wert zugewiesen wird. Die Parametrisierung ist somit abhängig von der jeweiligen Produktionsstrategie. In Abbildung 71 sind die jeweiligen Modellgrößen dargestellt, die direkt oder indirekt durch die Produktionsstrategien parametrisiert werden. Als geeignetes Mittel hierzu bieten sich Tabellenfunktionen an.²⁶¹ Hierbei wird jeder Eingangsgröße (Strategie), ein entsprechender Parameter zugewiesen, welcher wiederum die Eingangsgröße für die darauf aufbauenden Größen darstellt. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, dass durch die Änderung der Variablen „Strategiewahl“ das Simulationsmodell automatisch entsprechend der gewählten Strategie parametrisiert wird.

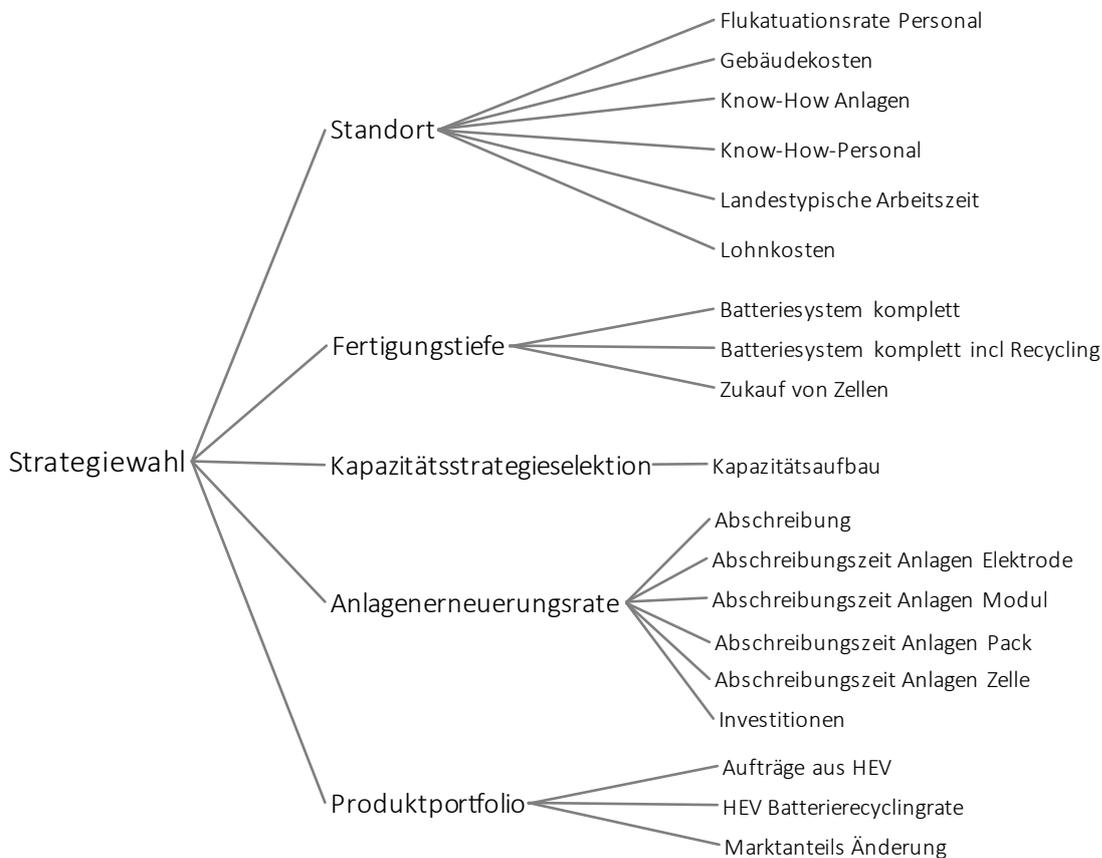


Abbildung 71: Direkt von der Produktionsstrategie beeinflusste Modellgrößen

Entsprechend der Wahl des Standortes werden die in Tabelle 26 dargestellten Parameter variiert:

²⁶¹ vgl. hierzu Fußnote 207

Tabelle 26: Parametervariation in Abhängigkeit des Standortes

	Einheit	USA	CN	Quelle
Fluktuationsrate Personal	[%]	21 %	30 %	(vgl. Hay Group 2013)
Gebäudekosten	[€/m ²]	2200	1120	(vgl. ANL 2012; Brodd und Helou 2013)
Know-how-Anlagen	[Dmnl]	1	0,85	Eigene Annahme
Know-how-Personal	[Dmnl]	1	0,85	Eigene Annahme
Landestypische Arbeitszeit	[Std/Monat]	166	200	(vgl. WorkingDays 2014)
Lohnkosten	[€/Std]	13	3,5	(Vgl. ANL 2012; Brodd & Helou 2013)

Die Gebäudekosten verstehen sich dabei inklusive Land und Erschließung. Die Differenz bezüglich der Know-how-Rate beruht auf unterschiedlichen Fluktuationsraten der Länder. Um der derzeitigen Dynamik in China gerecht zu werden, wird für die Lohnkosten über den Simulationszeitraum von einer jährlichen Steigerung von 1 % ausgegangen und für die Gebäudekosten von 0,5 %.

Die Fertigungstiefe wirkt nicht direkt auf die Parametrisierung einzelner Größen ein, sondern fungiert vielmehr als „Schalter“, der bestimmte Subsegmente oder deren Bereiche in die Modellierung einschließt oder eben davon ausschließt (vgl. Kapitel 7.3). In ähnlicher Weise funktioniert auch der Strategieeffekt Produktportfolio, mit dem Unterschied, dass zusätzlich durch den Verzicht auf die Produktion von Hochleistungsbatterien die Parametrisierung möglicher Marktanteile geändert wird.

Die Kapazitätsstrategie legt die unterschiedlichen Strategien zum Kapazitätsaufbau fest. Die Match-Strategie geht dabei von einer notwendigen Dauer zur Beschaffung und Inbetriebnahme der Anlagen von neun Monaten aus. Die Leadstrategie bezieht die Hälfte der Zeit des neuen Planungszeitraums in die Planung mit ein und beträgt daher 13,5 Monate, während die Follow-Strategie einen Planungshorizont von 4,5 Monaten verwendet.

Die Anlagenerneuerungsrate bestimmt, über welchen Zeitraum Anlagen linear abgeschrieben werden und geht von einem Standardwert von sechs Jahren aus (vgl. ANL 2012). Aufgrund der sich stetig verbessernden Anlagentechnik, könnte es jedoch auch vorteilhaft sein, die Anlagen zu einem früheren Zeitpunkt auszutauschen. Aus diesem Grund wird auch eine Strategie mit einer um 1,5 Jahre verkürzten Abschreibungsdauer betrachtet, bei der zusätzlich der Restwert der beschafften Anlagen mit ca. 21 % berücksichtigt wird.

8.2.3 Parametrisierung der Umweltszenarien

8.2.3.1 Definition der Umweltszenarien

Das Ziel der Entscheidungsunterstützung, robuste Produktionsstrategien zu identifizieren, bedingt entsprechend Kapitel 5.3.3 die Berücksichtigung von Unsicherheiten bzgl. der Parameter. Hierzu werden die Produktionsstrategien unter verschiedenen potenti-

ellen Umweltzuständen anhand eines pessimistischen, eines optimistischen und eines von Diskontinuitäten gezeichneten Szenarios untersucht. Auch wenn der Sektor Nachfrage eine entsprechende Schnittstelle besitzt, um (Nachfrage-)Szenarien extern in das Modell zu integrieren, besteht weiterhin der Anspruch an das Modell nach größtmöglicher Transparenz, was auch die Szenarien mit einschließt. Um diesem Punkt gerecht zu werden, werden die Szenarien endogen abgebildet. Im Fokus der Betrachtung steht dabei der Diffusionsverlauf selbst. Wie bereits erwähnt, ist es nicht Zweck des Modells, die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen zu simulieren, weshalb auch das genaue Zustandekommen der Diffusion wenig relevant ist. Vielmehr besteht das Ziel darin, zu verdeutlichen, wie sich das Produktionssystem unter einer bestimmten Strategie und bei einer bestimmten Nachfrageentwicklung verhält.

Für die Szenariogestaltung sind daher die Parameter Kundenpotential, der Imitations- und Innovationskoeffizient sowie die Geschwindigkeit und Ausprägung der Diffusion relevant. Zudem werden durch die Szenarioeffekte weitere Modellgrößen beeinflusst. Diese sind in Tabelle 27 zusammen mit der szenariospezifischen Änderungsrichtung aufgelistet.

Tabelle 27: Durch Szenarien beeinflusste Modellgrößen sowie deren Ausprägungsänderung

	Kundenpotential	Diffusionsgeschw.	Entwicklungsgeschw. Kriterien	Konventionalstrafe	Recyclingrate
Öl-Zeitalter (OA)	↓	↓	↓	↓	↓
Schock	⇨	↑	↑	↑	⇨
Elektr.-Zeitalter (EA)	↑	⇨	⇨	⇨	↑

Im Szenario „Öl-Zeitalter“ (Oil Age / OA) wird von einem lediglich geringen Kundenpotential und einer geringen Diffusionsgeschwindigkeit ausgegangen. Lediglich HEV konnten sich in der Breite durchsetzen. Vom Kunden wird zudem eine längere Lieferzeit akzeptiert. Diese Toleranz wird auch an den Batterielieferanten weitergegeben, wodurch der Druck auf diesen eher gering ist. Konventionalstrafen auf Basis der Lieferzeit werden daher kaum oder nur in geringem Maße vereinbart. Aufgrund der geringen EV-Durchdringung wird auch die Regulierung des LiB-Recycling nur wenig forciert. Da die Elektromobilität überwiegend einen Nischenmarkt darstellt, entwickeln sich letztlich auch die standortabhängigen externen Kriterien nur langsam.

Im „Elektrisches-Zeitalter“-Szenario (Electrical Age / EA) besteht ein großes Potential an Kunden für elektrische Fahrzeuge, und der Markt wächst stetig. Aufgrund des Anstiegs der Nachfrage wird von den Kunden der Batteriehersteller gefordert, die bestellte Menge fristgerecht und in ausreichender Menge zu liefern. Für den Fall einer verspäteten Lieferung sind moderate Strafzahlungen vorgesehen. Das stetige Wachstum bietet ausreichend Zeit, aber auch Motivation, um Standorte für die Batterieproduzenten

attraktiv zu gestalten. Aufgrund des hohen zu erwartenden Aufkommens an zu recycelnden Fahrzeugen werden entsprechende Maßnahmen tiefgreifend und in breiter Fläche umgesetzt.

Das „Schock-Szenario“ geht im Gegensatz zu den anderen beiden Szenarien nicht von einer stetigen Steigerung der Nachfrage an elektrischen Fahrzeugen aus, sondern von einem deutlich dynamischeren Verlauf. Einem massiven Anstieg der Nachfrage folgt deren Einbruch, z. B. aufgrund des Aufkommens einer Konkurrenztechnologie oder ähnlichem. Das Kundenpotential ist größer als im OA-Szenario jedoch geringer als im EA-Szenario. Die Diffusion von Fahrzeugen mit HEV- und PHEV-Batterien geht jedoch früher und in deutlich stärkerem Maße vonstatten. Dieser schelle und massive Anstieg der Nachfrage führt dazu, dass die Batteriehersteller durch strenge Konventionalstrafen dazu angehalten werden, die zur Befriedigung des Bedarfs benötigte Menge an Batteriesystemen in entsprechender Stückzahl just-in-time dem Kunden zur Verfügung zu stellen. Ebenso wird versucht, die Standorte für diesen expansiven Markt attraktiv zu gestalten und Kriterien schnellstmöglich anzupassen. Die Recyclingrate verhält sich moderat, da durch den auf den Hype folgende Nachfrageeinbruch, stringenter regulatorische Maßnahmen nicht mehr ergriffen werden.

8.2.3.2 Parametrisierung der Szenarien

Entsprechend der obigen Szenario-Annahmen werden die Parameter aus Tabelle 27, wie in Tabelle 28 aufgelistet, variiert.

Tabelle 28: Parametrisierung der Simulationsszenarien

Szenario	Kundenpotential [in Mio.]			Diffusion (Imitationskoeff. | Innovationskoeff.)			Recyclingrate	Konventionalstrafe
	HEV	PHEV	BEV	HEV	PHEV	BEV		
Öl-Zeitalter (OA)	157	37	10	0,08|0,055	0,075|0,03	0,08|0,055	0,44	1/3
Schock	164	64	57	0,04|0,055	0,190|0,03	0,11|0,055	1	1
Elektr.-Zeitalter (EA)	160	91	110	0,08|0,055	0,080|0,03	0,08|0,055	1,13	2/3

Nachfolgend ist der Verlauf der Nachfrageentwicklung des Gesamtmarktes für die drei Szenarien qualitativ abgebildet. Die Parametrisierung des Kundenpotentials basiert auf Informationen, die dem „Glomo-Modell“ entnommen wurden (vgl. Kühn et al. 2014a). Der Verlauf der Diffusionskurve entspricht dabei den gängigen Erwartungen zur Diffusion.²⁶²

²⁶² vgl. z. B. McKinsey & Company Inc 2011

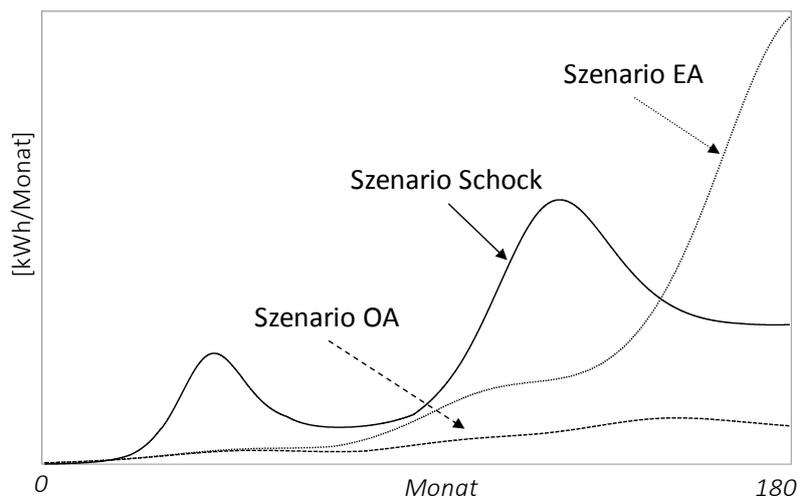


Abbildung 72: Nachfrageentwicklung in den verschiedenen Szenarien

Die Parameter der Recyclingraten wurde für Fahrzeuge im OA-Szenario wie folgt dimensioniert: Rücklaufquote von obsoleten Fahrzeugbatterien von 33 % für die USA und 25 % für China. Im Schock-Szenario entspricht dies einer Quote von 75 % bzw. 55 %, und im EA-Szenario stehen 85 % bzw. 75 % der Batterien obsoleter Fahrzeuge für das Recycling bereit. Die Konventionalstrafe für Fehlmengen ist über alle Szenarien hinweg gleich, während die Zahlungen für eine verspätete Lieferung von einem Faktor 1/3 (OA) über 2/3 (EA) bis 1 (Schock) reichen.

Die Parametrisierung der standortabhängigen Kriterien erfolgte bereits auf Basis des Fragebogens in Kapitel 8.1.2. Da ein Teil dieser Kriterien sich jedoch über die Zeit in ihrer Relevanz oder Ausprägung verändern, wird dieser Entwicklung ebenfalls szenariospezifisch Rechnung getragen. Hierbei wird berücksichtigt, dass manche Kriterien relativ schnell zu verändern sind, z. B. das Auflegen landesinterner Förderungen per Gesetz, während andere einen eher evolutionären Charakter besitzen und mehr Zeit in Anspruch nehmen, wie z. B. flächendeckend qualifiziertes Personal auszubilden.

Tabelle 29: Zeitbedarf zur Änderung von standortabhängigen Kriterien

Standortabhängiges Kriterium	Zeitbed. zur Umsetzung	Öl-Zeitalter	Schock	Elektrisches-Zeitalter
Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal?	↓	120	63	84
Gute soziale Produktionsbedingungen	↑	63	30	42
Nähe zum Kunden?	↓	120	63	84
Schutz des geistigen Eigentums	↔	80	48	63
Landesinterne Förderungen?	↑	63	30	42

Auf Grundlage dieser Einschätzung des Zeitbedarfs zur Änderung solcher Kriterien gibt Tabelle 29 Auskunft darüber, nach welchem Zeitraum sich ein Kriterium entsprechend dem in Tabelle 19 dargestellten Trend verändert.

8.3 Simulationsstudien

In den vorangegangenen Unterkapiteln wurden für die exemplarische Anwendung in Kapitel 8.1.2 das Zielsystem definiert sowie in Kapitel 8.2.2 potentielle Produktionsstrategien zu deren Erreichung formuliert. In diesem Kapitel werden auf dieser Grundlage Simulationsstudien durchgeführt, um vorteilhafte Strategien zu identifizieren. Dies ist der Fall, wenn eine Produktionsstrategie den Zielgrößen unter verschiedensten Umweltentwicklungen gerecht wird und so zu einer wettbewerbsfähigen und nachhaltigen Gestaltung des Produktionssystems führt.

Für die Simulationsstudien werden für die in Kapitel 8.2.3 beschriebenen Umweltszenarien jeweils zuerst die Ergebnisse der Produktionsstrategien bezüglich der Zielgrößen Selbstkosten und Lieferzeit vergleichend aufgezeigt.²⁶³ Zur Relativierung der Ergebnisse sind ebenfalls die verwendeten Erfahrungskurven (vgl. Kapitel 7.3.4.1) sowie die gesammelten Herstellkosten aus der Literatur dargestellt (vgl. Abbildung 9). Abschließend erfolgt die Bewertung der Ergebnisse mittels des dynamisch-kontinuierlichen PROMETHEE aus dem Subsektor „Multikriterielle Bewertung“.

8.3.1 Szenario „Öl-Zeitalter“ (OA)

Das OA-Szenario ist geprägt von einem geringen Marktwachstum sowie einer geringen Marktdurchdringung von PHEV und BEV. Die Selbstkosten für die Spezialisten- und die Komplettanbieter-Strategien sind daher zu Beginn relativ hoch. Die High-Tech-Integrator-Strategien verzichten dagegen auf die Produktion von Hochleistungszellen, weshalb die Selbstkosten aufgrund des Wegfalls damit einhergehender Investitionen deutlich geringer sind. Mittelfristig erreichen alle Strategien ein vergleichbares Kostenniveau, und es erfolgt nur noch eine schwache Kostendegression. Langfristig ist in dem vergrößerten Ausschnitt in Abbildung 73 zu erkennen, dass die Selbstkosten zumindest für die Spezialisten- und Komplettanbieter-Strategien auf einem ähnlichen Niveau rangieren. Die Wahl des Standortes, ob USA oder China, scheint langfristig keinen größeren Effekt auf die Selbstkosten auszuüben. Gegen Ende des Simulationslaufs geht die Nachfrage in dem Szenario wieder zurück, weshalb die Selbstkosten wiederum leicht ansteigen (vgl. Abbildung 72).

²⁶³ Die Ausprägung der standortabhängigen Kriterien sowie deren zeitlicher Verlauf wurden bereits in Kapitel 8.1.2 bzw. Kapitel 8.2.3.2 beschrieben und sollen daher an dieser Stelle nicht nochmals erläutert werden.

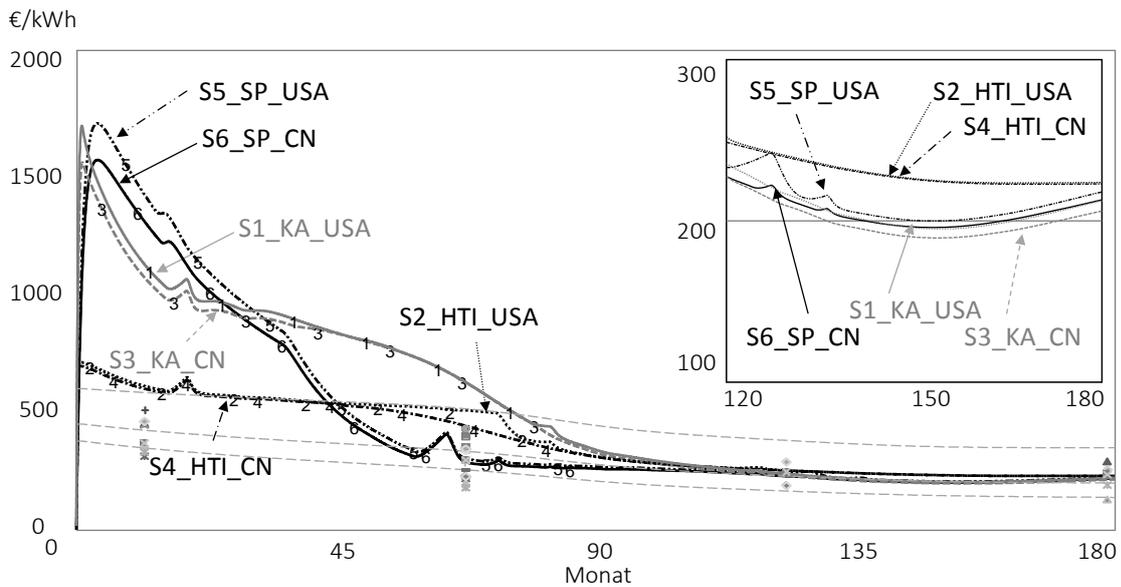


Abbildung 73: Ergebnis zu Selbstkosten der Produktionsstrategien im Szenario OA

Die Lieferzeiten bei unterschiedlichen Produktionsstrategien liegen zumeist innerhalb des Zielkorridors von einem Monat. Lediglich Strategie S2 (und kurzfristig auch S6) wird diesem Zielwert nicht gerecht und verweilt auch gegen Ende des Betrachtungszeitraums hin auf einem Niveau von über einem Monat.

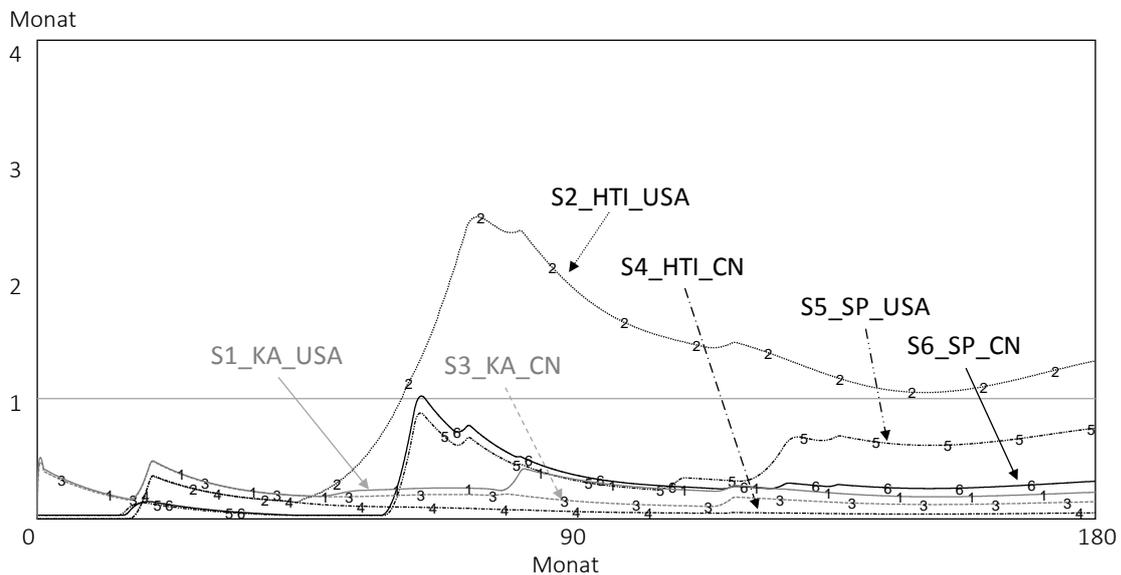


Abbildung 74: Ergebnis zu Lieferzeiten der Produktionsstrategien im Szenario OA

Die kontinuierliche Bewertung der einzelnen Produktionsstrategien über den Simulationszeitraum hinweg ist in Abbildung 75 dargestellt. Dabei weisen die einzelnen Produktionsstrategien einen sehr heterogenen Verlauf über die Simulationsdauer auf, wobei es erst langfristig zu einer Konsolidierung kommt. Anfangs sind insbesondere die High-Tech-Integrator-Strategie und die Spezialisten-Strategie, jeweils in den USA, vorteilhaft.

Im Verlauf der Simulation verlieren diese jedoch an Stellenwert, wobei sich insbesondere die Komplettanbieter-Strategien und die High-Tech-Integrator-Strategie sowie mit Abstrichen noch die Spezialisten-Strategie mit Standort China, als vorteilhaft herausstellen. Die Strategie S4_HTI_CN zeigt dabei gegen Ende des Untersuchungszeitraums eine kontinuierliche Verbesserung des Nettoflusses. Als langfristig ungeeignet stellt sich die zu Beginn stark vorteilhafte Strategie S2_USA heraus.

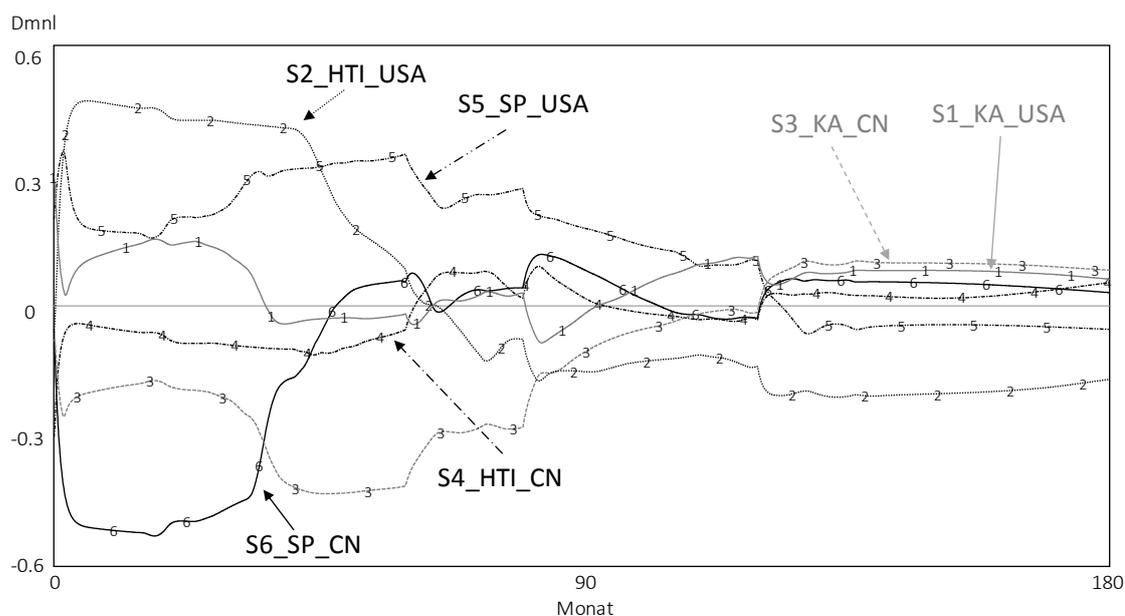


Abbildung 75: Ergebnis des PROMETHEE von Produktionsstrategien im Szenario OA

8.3.2 Szenario „Schock“

Das Schock-Szenario liegt, bezogen auf das Absatzvolumen, in etwa zwischen dem OA- und dem EA-Szenario. Es ist dadurch geprägt, dass nach einer starken Diffusion der HEV- und PHEV-Antriebe die BEV-Nachfrage nicht unmittelbar daran anknüpft, wodurch es zu einem starken Einbruch der Nachfrage kommt. Dieser Effekt ist auch im Verlauf der Selbstkosten in Abbildung 76 wiederzufinden. Zu Beginn sind hohe Investitionen zu tätigen, um die Nachfrage zu bedienen. Im Fall des High-Tech-Integrators fallen diese durch den Zukauf von Zellen nicht an, weshalb die Selbstkosten hier zu Beginn geringer sind. Durch den starken Anstieg der Produktionsmenge fallen die Kosten sehr schnell auf ein niedriges Niveau. Der Einbruch der Nachfrage schlägt sich dann mittelfristig in einem Anstieg der Selbstkosten nieder. Durch den daran anschließenden Anstieg der Nachfrage nach BEV können die Komplettanbieter- und Spezialisten-Strategien ihre Produktionskapazitäten wieder auslasten und die Nachfrage bedienen. Die Kosten für die Integrator-Strategien verbleiben aufgrund des externen Zellzukaufs auf einem deutlich höheren Stand.

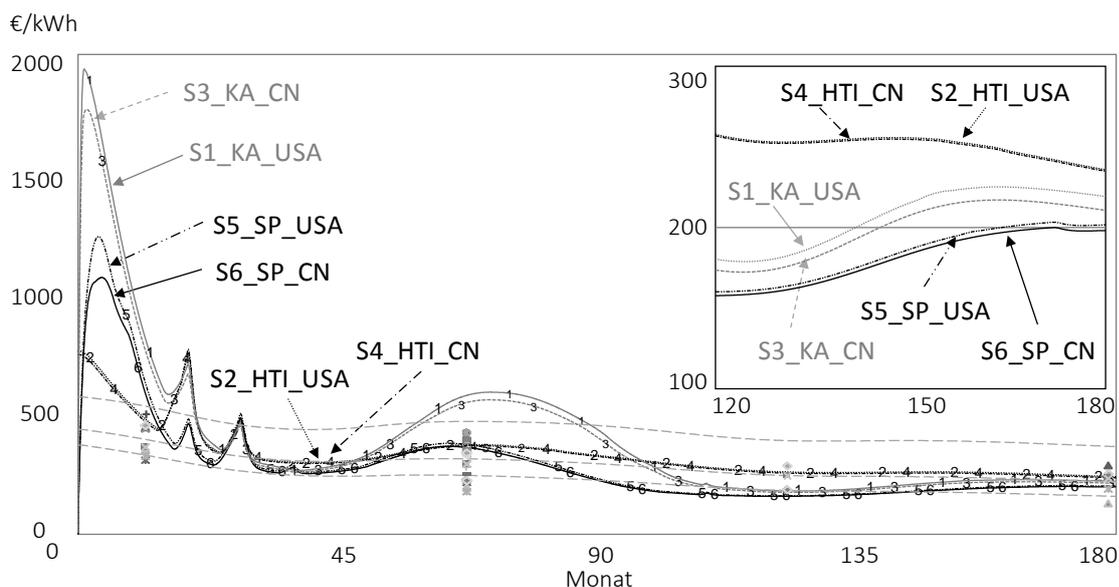


Abbildung 76: Ergebnis zu Selbstkosten der Produktionsstrategien im Szenario Schock

Am Ende des Betrachtungszeitraums zeigen die Spezialisten-Strategien die geringsten Selbstkosten auf. Im Gegensatz zu dem Komplettanbieter wurde zu Beginn auf die Produktion von Hochleistungsbatterien für HEV verzichtet. Entsprechend entfiel auch der Aufbau der hierzu benötigten Anlagen und Gebäude sowie die daraus resultierenden hohen Fixkosten.²⁶⁴ Zudem können durch die bereits zu Beginn recht geringen Selbstkosten (im Vergleich zu denen des Komplettanbieters) bereits früh Marktanteile hinzugewonnen werden (vgl. hierzu den Effekt in Abbildung 68).

Die Lieferzeit für die einzelnen Produktionsstrategien liegt lediglich im Fall des Komplettanbieters gänzlich unter der Toleranzmarke von einem Monat. Die Integratoren können die Nachfrage zu Beginn mit den bestehenden Kapazitäten bedienen. Im Gegensatz hierzu müssen die Komplettanbieter aufgrund der großen Elektrodenfläche der Hochleistungszellen bereits frühzeitig ihre Kapazitäten erhöhen. Aufgrund des schnellen und starken Anstiegs sind diese jedoch rasch nicht mehr ausreichend, und es kommt kurzfristig zu einem Anstieg der Lieferzeit. Deutlich stärker und länger fällt der Lieferverzug im Fall der Spezialisten-Strategien aus. Nachdem gänzlich auf die Produktion der Batteriezellen für HEV verzichtet wurde, führt der starke Anstieg der Nachfrage nach PHEV sowie die beginnende Nachfrage nach BEV-Batteriezellen zu einem Mehrbedarf an Produktionskapazitäten. Langfristig kommt es zu einer Konsolidierung der Nachfrage und die Lieferzeiten liegen allesamt im Toleranzbereich.

²⁶⁴ Dieser Effekt, der zur Überkapazitäten führt, wurde qualitativ in Abbildung 56 (Anlagen) und Abbildung 64 (Werksfläche) beschrieben.

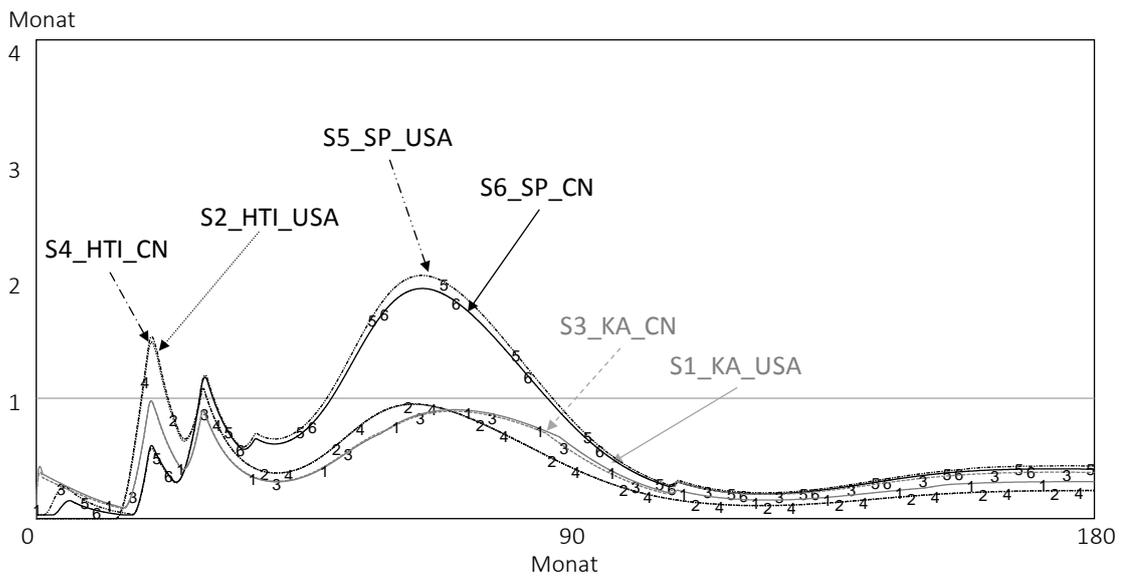


Abbildung 77: Ergebnis zu Lieferzeiten der Produktionsstrategien im Szenario Schock

Die multikriterielle Bewertung der Produktionsstrategien ist ebenso wie der Verlauf der Nachfrage sehr dynamisch. Zu Beginn zeigen sich wiederum die High-Tech-Integrator-Strategie und die Spezialisten-Strategie mit Standort USA als recht vorteilhaft und werden mittelfristig von der Komplettanbieterstrategie und der High-Tech-Integrator-Strategie mit Standort China abgelöst. Dieser Strategietyp erweist sich jedoch, unabhängig vom gewählten Standort, langfristig als am wenigsten geeignet, während alle weiteren Strategien relativ gleichauf sind. Einzige Ausnahme bildet die Strategie S6, Spezialist China, die sich bereits mittelfristig recht deutlich als vorteilhafteste Alternative herauskristallisiert.

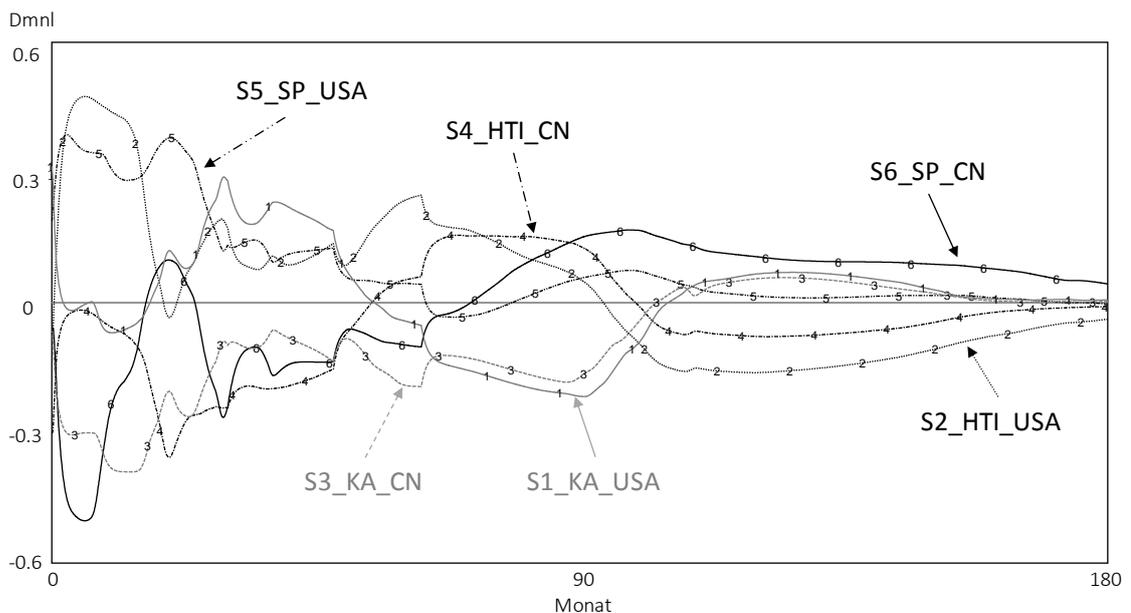


Abbildung 78: Ergebnis des PROMETHEE von Produktionsstrategien im Szenario Schock

8.3.3 Szenario „Elektrisches-Zeitalter“ (EA)

Das Szenario „Elektrisches Zeitalter“ (EA), geht von einer starken und flächendeckenden Durchdringung der Elektromobilität aus. Entsprechend schnell lassen sich Skaleneffekte realisieren, und es kommt rasch zu einer stark ausgeprägten Kostendegression. Diese geht insbesondere im Fall der Komplettanbieter anfangs recht schnell vonstatten, wird dann jedoch etwas durch die Investitionen für den Aufbau von Produktionskapazitäten für die Hochleistungsbatterieproduktion verzögert. Die Integrator-Strategien, erreichen schnell das Preisniveau des Wettbewerbs, wobei sie im Vergleich zu den Spezialisten-Strategien eine deutlich längere Zeit benötigen, um die Selbstkosten weiter zu senken. Mittelfristig erreichen alle Strategien ein ähnliches Niveau, während langfristig die Komplettanbieter deutlich die geringsten Selbstkosten realisieren können. Insgesamt liegen die Selbstkosten bei den betrachteten Strategien im Vergleich mit Werten aus der Literatur eher im Bereich optimistischer Schätzungen.

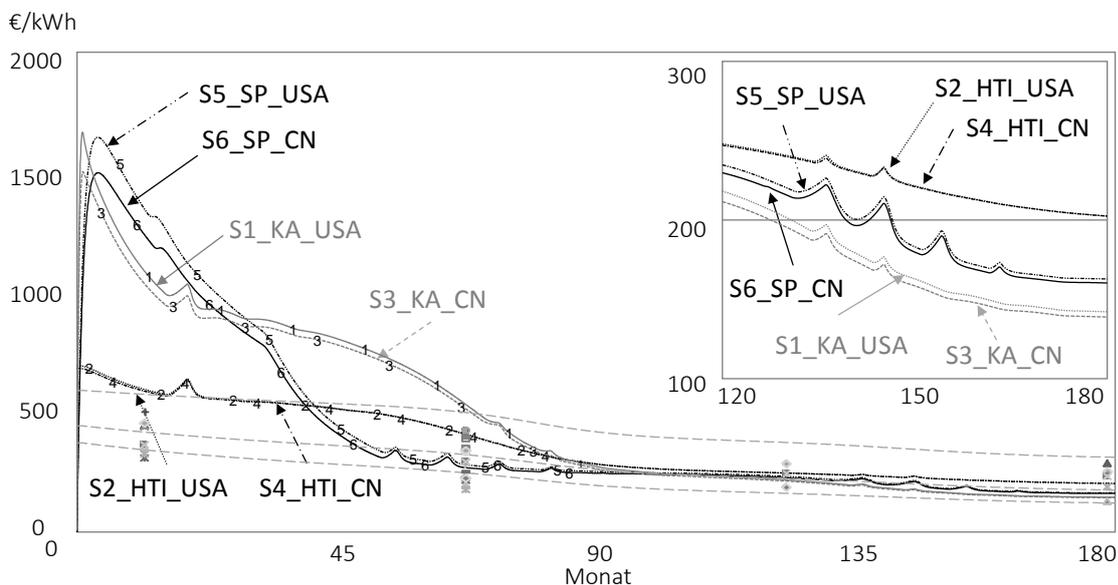


Abbildung 79: Ergebnis zu Selbstkosten der Produktionsstrategien im Szenario EA

Der Vergleich der Lieferzeiten unterschiedlicher Strategieoptionen zeigt, dass alle im Toleranzbereich von einem Monat liegen. Die längste Lieferzeit liegt bei ungefähr 2,5 Wochen im Fall der Spezialisten-Strategien gegen Ende des Betrachtungshorizonts.

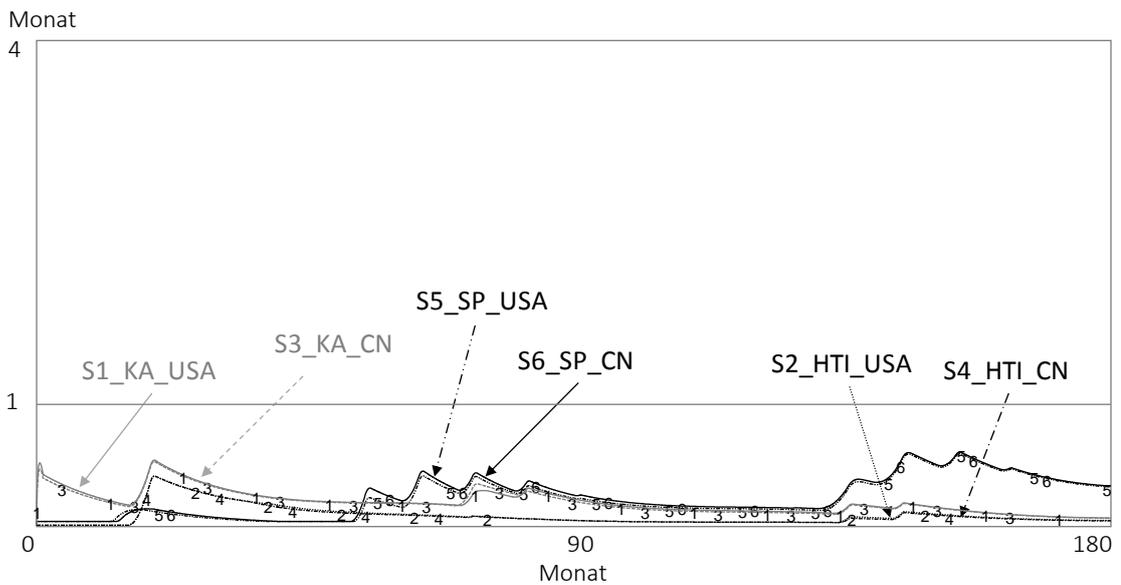


Abbildung 80: Ergebnis zu Lieferzeiten der Produktionsstrategien im Szenario EA

Die Nettoflüsse der mittels PROMETHEE bewerteten Produktionsstrategien weisen im Vergleich zum Szenario Schock einen deutlich weniger dynamischen Verlauf auf.

Zu Beginn ist die High-Tech-Integrator-Strategie USA am vorteilhaftesten und wird nach etwa einem Viertel des Simulationszeitraums von Strategie 5, Spezialist USA, abgelöst. In der zweiten Hälfte der Simulation kristallisieren sich die Komplettanbieterstrategien als geeignetste Produktionsstrategien heraus, wobei jene mit Standort USA leicht vorteilhafter ist. Alle übrigen Strategien weisen dagegen negative Nettoflüsse auf.

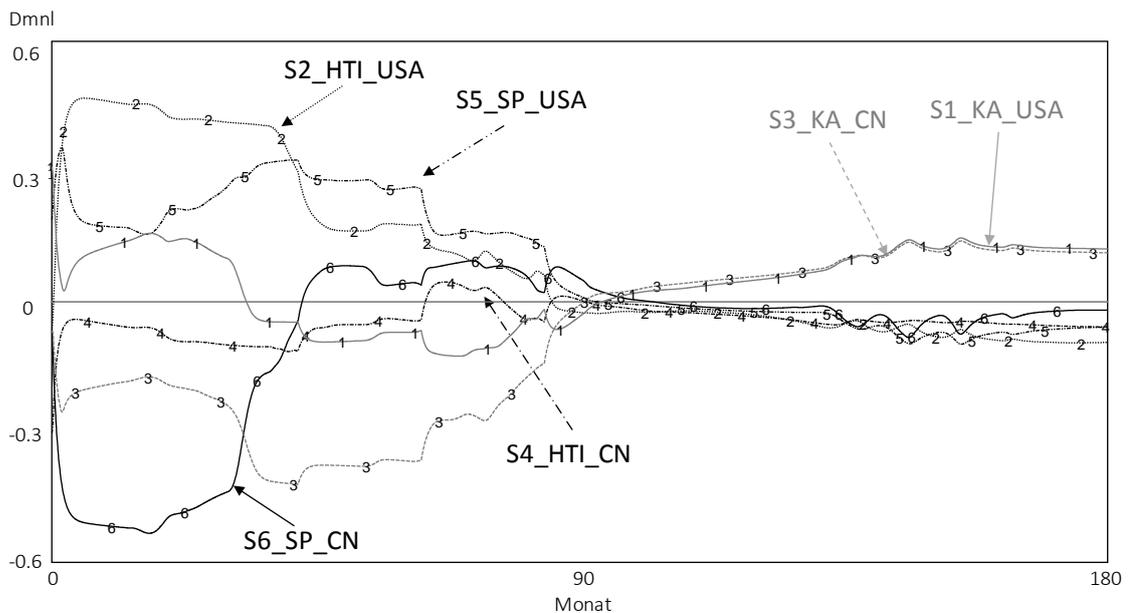


Abbildung 81: Ergebnis des PROMETHEE von Produktionsstrategien im Szenario EA

8.4 Szenarioübergreifende Bewertung

In Kapitel 8.3 wurden die Ausprägungen der Zielgrößen unter den betrachteten Produktionsstrategien erläutert sowie mittels des im Modell integrierten PROMETHEE eine alle Kriterien einbeziehende Bewertung unter den jeweiligen Szenarien vorgenommen. Die Bewertung ermöglicht es, entsprechend der Anforderung aus Kapitel 6.3.2 zu jedem konkreten Zeitpunkt transparent die Vorteilhaftigkeit einer Produktionsstrategie unter einem bestimmten Szenario zu erkennen.

Bei der Wahl einer Produktionsstrategie handelt es sich jedoch wie bereits beschrieben um eine Entscheidung unter Unsicherheit bzw. Risiko, weshalb die Entscheidung für eine Strategie nicht allein auf Basis eines einzigen Szenarios gefällt werden darf, sondern vielmehr jene Strategie zu wählen ist, die sich über alle Szenarien hinweg als vorteilhaft erwiesen hat und somit eine gewisse Robustheit gegenüber Umweltänderungen aufweist. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der jeweiligen Szenarien an dieser Stelle zusammengefasst, um eine solche Produktionsstrategie zu identifizieren. In Abbildung 82 ist die Streuung der Phi-Nettoflüsse von den untersuchten Produktionsstrategien, in Abhängigkeit der Szenarien, in Form eines Box-Plot-Diagramms abgebildet.

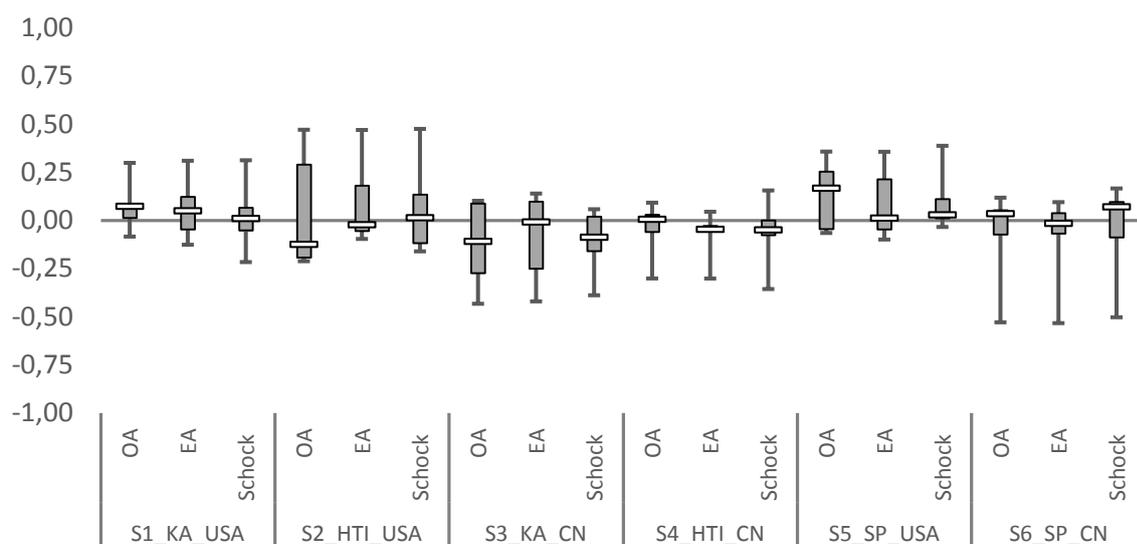


Abbildung 82: Streuung der Strategie-Nettoflüsse über die Szenarien

Strategie 1 zeigt eine recht geringe Streuung auf, während der Median in den Szenarien stets im positiven Bereich liegt. Wesentlich größer ist die Streuung der Phi-Nettoflüsse im Fall von Strategie 2 und Strategie 3, die zudem einen negativen Wert für den Median aufweisen. Strategie 4 zeigt die geringste Streuung der betrachteten Alternativen auf, der Median liegt ebenfalls im negativen Bereich. Die Spezialisten-Strategie S5 weist für das Szenario OA einen stark positiven Median auf, während dieser für die beiden weiteren Szenarien eher auf einem neutralen Niveau rangiert. Strategie 6 offenbart einen recht geringen Minimalwert bei allen drei Szenarien. Der Median ist, je nach Szenario, leicht positiv oder leicht negativ.

Auf Basis der Ergebnisse aus Abbildung 82 lässt sich aufgrund der teils recht großen Streuung über die Szenarien sowie teils nur geringfügigen Unterschiede zwischen den einzelnen Strategien eine Entscheidung für eine robuste Produktionsstrategie nicht treffen. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle eine integrale Betrachtung der Vorteilhaftigkeit von Produktionsstrategien nach Lebenszyklusphasen, entsprechend dem in Kapitel 6.3.2 beschriebenen Vorgehen. Abbildung 83 zeigt nochmals exemplarisch am Beispiel von Abbildung 73 wie das Integral zwischen den Strategien berechnet wird und welche Zeitkorridore für die jeweiligen Lebenszyklusphasen festgelegt werden.

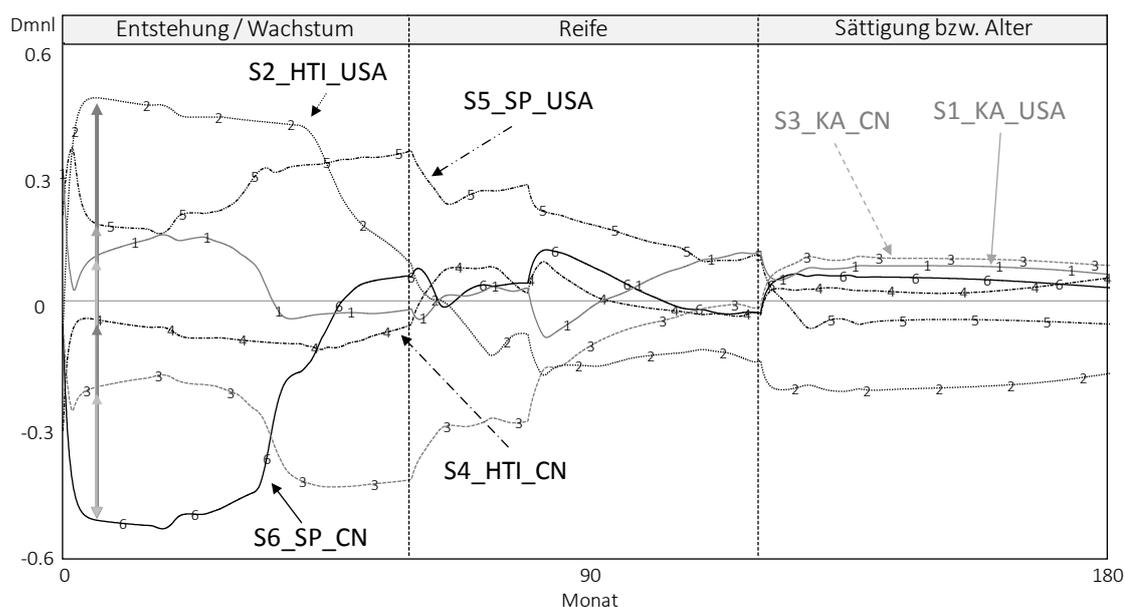


Abbildung 83: Einordnung der Lebenszyklusphasen in die Simulation

Mit Hilfe obiger Einteilung des Simulationslaufs der Phi-Nettoblüsse in Lebenszyklusphasen sowie durch die Berechnung des Integrals zwischen einzelnen Produktionsstrategien und der mit dem geringsten Phi-Nettobluss, lässt sich eine entsprechende Bewertung der Strategien vornehmen. Die Bewertung erfolgt dabei auf einem Aggregationsgrad, der es ermöglicht, eine quantitative Aussage über die Vorteilhaftigkeit und Robustheit einer Strategie zu treffen, die zudem deren dynamischen Verlauf berücksichtigt.

Auf dieser Grundlage werden nachfolgend die Ergebnisse der integralen Bewertung dargestellt und erläutert. Hierbei werden neben einer Betrachtung der Ergebnisse bei einer Gleichgewichtung der Zielgrößen auch alternative Wettbewerbsstrategien berücksichtigt, die wie im Fall der Kostenführerschaft eher die Selbstkosten in den Fokus rücken oder im Fall der Differenzierung die Lieferfähigkeit und -zeit stärker betonen.

Die szenarioübergreifende Betrachtung nach Lebenszyklusphasen bei Gleichgewichtung stellt dabei die Lösung der zu Beginn formulierten Forschungsfrage 4 dar, während die szenarioübergreifende Bewertung nach Wettbewerbsstrategien die Lösung der Forschungsfrage 5 bildet.

8.4.1 Szenarioübergreifende Bewertung bei Gleichgewichtung

Bei einer Gleichgewichtung der Zielgrößen ergibt sich auf Basis der integralen Berechnung folgende Verteilung:

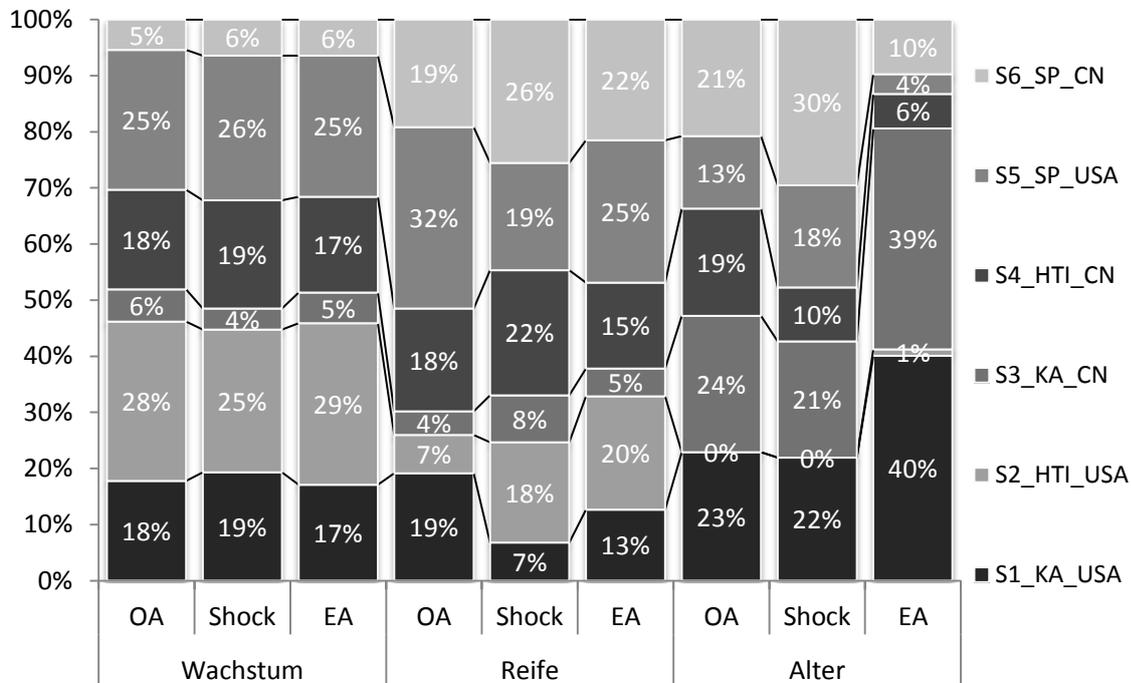


Abbildung 84: Ergebnis der integralen Betrachtung

Für die Phase des Wachstums zeigt sich über die Szenarien hinweg ein relativ konstantes Ergebnis. Als vorteilhaft erscheint hierbei insbesondere die Produktionsstrategie eines High-Tech-Integrators in den USA sowie die eines Spezialisten in den USA. Eine mittlere Ausprägung zeigen die Strategien des Komplettanbieters in den USA sowie die des High-Tech-Integrators mit Standort China. Als ungenügend können die Spezialisten und Komplettanbieterstrategien mit Standort China aufgefasst werden, deren Werte lediglich zwischen 4 % und 6 % betragen. In der Phase der Reife zeichnet sich bereits ein deutlich heterogeneres Bild, wobei Strategie 3 auch weiterhin keine vorteilhafte Option darstellt. Insgesamt erscheinen die Spezialisten-Strategien in dieser Phase als vorteilhaft, wobei insbesondere die Spezialisten-Strategie mit Standort China, sich sehr stark verbessert hat. Die Strategien S1 und S4, die zuvor eine mittlere Ausprägung zeigten, verharren auf diesem Niveau, wobei S1 insbesondere im Schock-Szenario den schlechtesten Wert aller Strategien aufweist. Die High-Tech-Integrator-Strategie USA verschlechtert sich in dieser Phase und zeigt im OA-Szenario letztlich eine schlechte Ausprägung auf. In der Phase des Alters dominieren die Komplettanbieter-Strategien. Die Differenzen zwischen Standort USA und China sind dabei marginal. Die Strategie 2 verschlechtert sich auch in dieser Phase weiter und stellt fast durchgängig die schlechteste Alternative dar. Eine dem Verlauf von Strategie 2 entgegengesetzte Entwicklung zeigt die Spezialisten-Strategie China. Gehörte sie in der Phase des Wachstums mitunter

zu den am wenigsten vorteilhaften Strategien, verbessert sie sich in der Phase der Reife und stellt auch im Alter eine vorteilhafte Alternative dar. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn wie im Schock-Szenario sich der Markt nicht gleichmäßig entwickelt.

Auf Basis der Ergebnisse und unter Vernachlässigung von Lock-in-Effekten kann als Handlungsempfehlung für die Phase des Wachstums zu einer Produktionsstrategie mit Standort USA als High-Tech-Integrator oder Spezialist ausgesprochen werden. Erreicht der Markt die Phase der Reife, kann die Spezialisten-Strategie in den USA weiterverfolgt werden oder ein Wechsel nach China erfolgen. Letztere bietet auch in der Phase des Alters eine höhere Vorteilhaftigkeit. Bei sehr starkem Marktwachstum ist dagegen die Komplettanbieter-Strategie deutlich im Vorteil.²⁶⁵ Unter Einbezug von Lock-in-Effekten kristallisiert sich keine Strategie als optimal aus. Erfolgt die Entscheidung lediglich für eine Produktionsstrategie, die dann bis zum Ende des Betrachtungszeitraums weiterverfolgt wird, so scheint die Strategie des Komplettanbieters USA am vielversprechendsten zu sein. Diese weist durchweg eine akzeptable Vorteilhaftigkeit auf, mit Ausnahme im Szenario Schock in der Phase der Reife. Ist der Planer dagegen bereit, zu Beginn auch eine weniger vorteilhafte Strategie zu verfolgen, so stellt die Spezialisten-Strategie mit Standort China eine Alternative dar. Die Strategie erzielt über alle Szenarien der Phase der Reife und des Alters hinweg ein gutes Ergebnis und kann somit auch als recht robust angenommen werden.

Strategiewechsel zwischen den einzelnen Phasen stellen eine weitere Option dar, wobei die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Ergebnis der anschließend weiterverfolgten Strategie durch zuvor getätigte Maßnahmen oder durch deren Unterlassung in diesem Rahmen nur qualitativ berücksichtigt werden können. Unter Beachtung der großen Bindewirkung der Standortstrategie, erscheint ein Strategiewechsel nur innerhalb eines Standortes realisierbar. Weiterhin ist der Wechsel von einer Integrator-Strategie hin zu einer anderen an die Bedingung geknüpft, dass die entsprechenden Produktionsanlagen für die Fertigung zuvor zugekaufter Zellen erstellt werden müssen. Die dadurch entstehenden Kosten müssten bei der neuen Strategie berücksichtigt werden, wodurch diese wiederum an Vorteilhaftigkeit einbüßen würde. Dieser Effekt ist jedoch nur schwer zu quantifizieren. Ein solcher Wechsel wäre daher, wenn überhaupt, lediglich in der Phase des Wachstums, in der die Produktionsstrukturen noch nicht in großem Maßstab erstellt wurden, machbar. Unter Beachtung dieser Einschränkungen erscheinen daher zwei Strategiepfade als vorteilhaft: Ausgehend von einer Spezialisten-Strategie in den USA, die auch über die Phase der Reife hinweg beibehalten wird, erfolgt in der Phase des Alters ein Wechsel der Strategie hin zum Komplettanbieter, der insbe-

²⁶⁵ Eine Empfehlung für eine Komplettanbieterstrategie in der Phase des Alters mag evtl. als irrational erscheinen, da das Produkt LiB und dessen Nachfrage zu diesem Zeitpunkt den Zenit bereits überschritten haben. Die bestehenden Produktionsanlagen können jedoch auch weitestgehend nachdem das Produkt LiB obsolet ist, weiterhin zur Produktion einer neuen Nachfolgetechnik verwendet werden.

sondere bei großem Marktvolumen vorteilhaft ist. Zu beachten ist hierbei, dass gewisse positive Effekte durch das Recycling von LiB, aufgrund fehlender obsoleter Fahrzeuge die in den vorherigen Phasen produziert wurden, hier nicht eintreten. Für Strategien mit Standort China wäre unter Beachtung der zuvor geschilderten Einschränkung denkbar, von einer Integrator-Strategie aus zu einer Spezialisten-Strategie zu wechseln und diese bis zum Alter beizubehalten. Alternativ könnte zur Phase des Alters auch ein erneuter Wechsel hin zu einem Komplettanbieter erfolgen. Abschließend soll nochmals angemerkt werden, dass aufgrund der vielen Unsicherheiten die mit dem Wechsel ein Strategie verbunden sind, obige Pfade keineswegs als robust angenommen werden dürfen, sondern lediglich als zusätzliche Option, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vertieft werden sollen.

8.4.2 Alternative Wettbewerbsstrategie Kostenführerschaft

Ergänzend zu der Betrachtung einer generischen Wettbewerbsstrategie, mit der Annahme einer Gleichgewichtung der Zielgrößen, wird in diesem Unterkapitel zudem untersucht, wie sich die Strategieempfehlungen für ein Unternehmen gestalten würde, das die Strategie einer Kostenführerschaft²⁶⁶ verfolgt. Zu diesem Zweck wurde entsprechend der Zielgröße Selbstkosten mit 60 % ein wesentlich höheres Gewicht bei der Bewertung eingeräumt als den übrigen Größen, die jeweils nur mit 20 % gewertet werden.

Die Ergebnisse der integrierten Betrachtung für eine Wettbewerbsstrategie der Kostenführerschaft weisen im Vergleich zu der Gleichgewichtung in der Phase des Wachstums vergleichbare Ergebnisse auf. Lediglich die Ergebnisse der Komplettanbieterstrategie USA und des High-Tech-Integrators China haben sich leicht verschlechtert. Letztere können in der Phase der Reife ihr Ergebnis vergleichsweise jedoch verbessern, während die Komplettanbieterstrategie USA auch weiterhin deutlich unvorteilhafter ist. Im Alter zeigen dagegen beide Komplettanbieterstrategien wiederum sehr gute Ergebnisse, wobei sie an Vorteilhaftigkeit im Szenario EA eingebüßt haben. Dafür konnten jedoch unter einer dynamischen Marktentwicklung wie im Szenario Schock nochmals deutlich verbesserte Ergebnisse erzielt werden. Leicht In der Phase des Wachstums konnten sich dagegen die Spezialisten-Strategien leicht verbessern, was insbesondere auf jene mit Standort China zutrifft. Letztere zeigt auch in der Phase der Reife die deutlichste Verbesserung. Bemerkenswert ist hierbei, dass beide Spezialisten-Strategien über alle Szenarien hinweg am vorteilhaftesten sind und zudem recht konstante Ergebnisse aufweisen. Die Spezialisten-Strategie mit Standort USA kann diesen Grad der Vorteilhaftigkeit jedoch nicht bis in die Phase des Alters hinein behaupten, während die Strategie mit Standort China durchaus auch dort ein gutes Ergebnis erzielt. Sie kann daher hinter den in dieser Phase dominanten Komplettanbieterstrategien durchaus als gute Alterna-

²⁶⁶ vgl. Kapitel 4.1.2

tive angesehen werden oder bei einer sehr positiven Marktentwicklung sogar als beste Alternative.

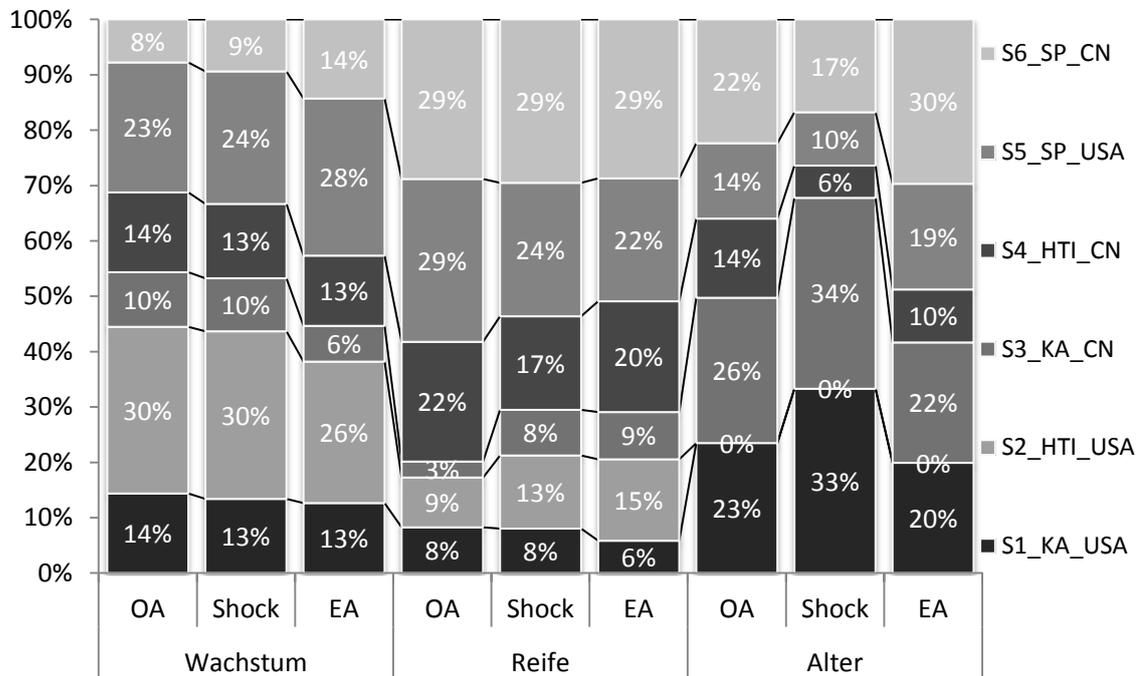


Abbildung 85: Ergebnis der integralen Betrachtung für die Wettbewerbsstrategie Kostenführer

Eine Strategie-Empfehlung unter Ausschluss etwaiger Lock-in-Effekte kann, aufgrund der großen Ähnlichkeit zu den Ergebnissen bei Gleichgewichtung in der Phase des Wachstums wiederum für eine Integrator-Strategie oder Spezialisten-Strategie mit Standort USA ausgesprochen werden. Für die Reife darf auf Basis der Höhe und Konstanz der Ergebnisse zu einer Spezialisten-Strategie, mit leichtem Vorteil für Standort China, geraten werden. In der Phase des Alters sind dagegen wieder die Komplettanbieterstrategie am vorteilhaftesten.

Die Empfehlung für eine durchgängige Produktionsstrategie gestaltet sich im Fall der Kostenführerschaft recht schwierig, da es keine Strategie gibt, die durchweg eine gute Performance aufweist. Insgesamt zeigen jedoch die Spezialisten-Strategien ein recht konstantes und akzeptables Ergebnis auf. Trotz anfänglicher Schwächen, erscheint die Strategie mit Standort China aufgrund derer mittel- und langfristigen Vorteilhaftigkeit als empfehlenswert und robust. Für die Komplettanbieter-Strategien, die in der Phase des Alters sehr gute Ergebnisse erzielen, kann aufgrund derer schlechten Performance in den vorherigen Phasen keine Empfehlung ausgesprochen werden. Als potentieller Strategiepfad würde es sich anbieten, in den Phasen des Wachstums und der Reife auf eine Spezialisten-Strategie USA zu setzen und im Alter eine Transformation hin zum Komplettanbieter vorzunehmen.

8.4.3 Alternative Wettbewerbsstrategie Differenzierung

Als weitere generische Wettbewerbsstrategie wird komplementär zur Kostenführerstrategie nachfolgend noch eine Strategie der Differenzierung²⁶⁷ näher untersucht. Entsprechend dem Fokus der Strategie auf Service- und Lieferqualität stellt die Lieferzeit mit einer Gewichtung von 60 % auch die dominante Zielgröße dar. Die beiden anderen Zielgrößen werden mit jeweils 20 % gewichtet.

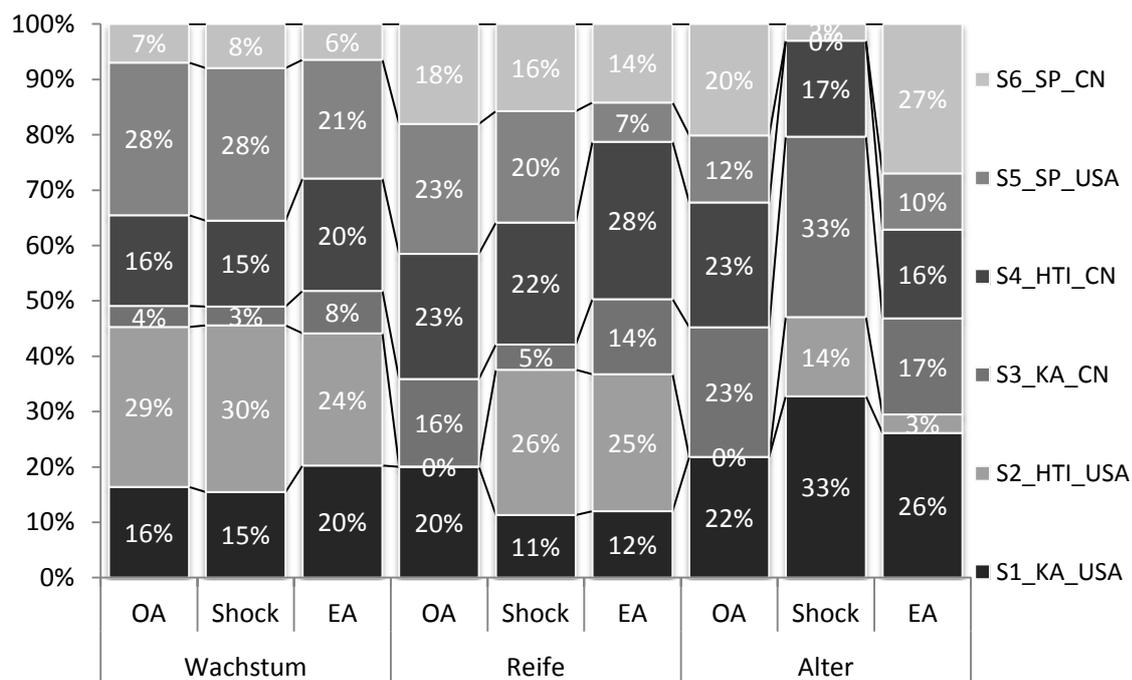


Abbildung 86: Ergebnis der integralen Betrachtung für die Wettbewerbsstrategie Differenzierung

Die Ergebnisse bei einer Strategie der Differenzierung unterscheidet sich in der Phase des Wachstums nur geringfügig von denen einer Gleichgewichtung. Dieses Bild ändert sich jedoch drastisch bei einer Betrachtung in der Phase der Reife, in der lediglich noch die Strategien des Komplettanbieters USA (S1) und die des Integrators China Ähnlichkeiten aufweisen. Alle anderen Strategien zeigen dabei teils gravierende Unterschiede auf. Insbesondere die Spezialisten-Strategien S5 und S6. Bemerkenswert ist die Entwicklung der Integrator-Strategie S2, die sowohl im Schock- als auch im EA-Szenario bessere Ergebnisse erreichen konnte, jedoch im OA-Szenario ein verheerendes Ergebnis von 0 % erreicht. In der Phase des Alters sind die Komplettanbieterstrategien wiederum im Vorteil, wobei die erreichten Werte eher denen der Kostenführerschaft, mit einem hohen Ergebnis im Szenario Schock, ähneln. Die Spezialisten-Strategien, insbesondere die mit Standort China, die im Fall der Kostenführerschaft eine Alternative darstellten konnten, kommen im Fall der Differenzierung als robuste Strategie nicht in Frage. Zwar

²⁶⁷ vgl. Kapitel 4.1.2

ist deren Ausprägung im OA- und im EA-Szenario akzeptabel, im Schock-Szenario erweisen sie sich jedoch mit Werten von 3 % bzw. 0 % als gänzlich ungeeignet. Ebenso ist auch die High-Tech-Integrator-Strategie USA einzuordnen, die vergleichbare Werte in den Szenarien OA und EA aufweist.

Unter Vernachlässigung der Lock-in-Effekte erscheint für die Phase des Wachstums Strategie 2 High-Tech-Integrator USA oder S5 Spezialist USA, die beide vergleichbare Werte aufweisen, als vorteilhaft. In der Reife stellt S4 High-Tech-Integrator China eine gute Alternative dar, während S1 Komplettanbieter USA (aber auch China) im Alter deutlich vorteilhafter ist.

Unter Einschluss der Lock-in-Effekte und der Verfolgung einer Lebenszyklusphasen-übergreifenden Produktionsstrategie kommt unter Umständen die Komplettanbieterstrategie USA S1 in Frage, die jedoch in der Phase der Reife nur mäßig vorteilhaft ist. Wesentlich konstanter ist die Strategie S4 High-Tech-Integrator China, die in allen Szenarien gute Ergebnisse erzielt und der daher auch eine gewisse Robustheit unterstellt werden kann.

Einen potentiell geeigneten Strategiepfad aufzuzeigen, ist vor dem Hintergrund der teils stark unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den einzelnen Szenarien im Fall der Differenzierung nicht trivial. Für Strategien mit Standort USA wäre ein Einstieg über die Spezialisten-Strategie S5 denkbar, die anschließend auch über die Reife hinweg verfolgt wird. Im Alter kann dann der Wechsel auf eine Komplettanbieterstrategie erfolgen. Für den Standort China könnte der Einstieg über die Integrator-Strategie S4 realisiert werden, die ebenfalls über die Phase der Reife hinweg beibehalten wird. Im Alter würde sich ebenso der Wechsel auf eine Komplettanbieter-Strategie anbieten.

8.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Abschließend werden an dieser Stelle nochmals die zentralen Ergebnisse der Untersuchung der Zielgrößen, der dynamisch-kontinuierlichen PROMETHEE-Bewertung sowie der abschließenden integrierten Bewertung zusammengefasst.

Die Untersuchung der Selbstkosten unter verschiedenen Strategiealternativen zeigt für die Komplettanbieter- und Spezialisten-Strategien relativ hohe Selbstkosten zu Beginn des OA- und EA-Szenarios. Im Schock-Szenario liegen die anfänglichen Selbstkosten der Komplettanbieter-Strategien nochmals deutlich höher. Für die High-Tech-Integrator-Strategien liegen die Anfangswerte dagegen durchweg relativ niedrig und bereits in der Nähe eines wettbewerbsfähigen Niveaus. Dabei können sie dieses jedoch im OA- und EA-Szenario erst nach den Spezialisten-Strategien erreichen. Die mit Hilfe der Strategien realisierten Selbstkosten zum Ende des Betrachtungszeitraums variieren dabei mitunter recht stark. So sind die Selbstkosten im OA-Szenario mit Werten zwischen 206 €/kWh (S3) und 224 €/kWh (S2) relativ hoch, weisen jedoch eine nur geringe Streuung zwischen den Strategien auf. Etwas geringere Selbstkosten konnten im Szenario Schock mit

197 €/kWh (S6) erreicht werden, während die höchsten Selbstkosten mit 235 €/kWh (S4) sogar über denen des OA-Szenarios liegen. Deutlich geringer fallen diese dagegen im Szenario EA aus. Die geringsten Selbstkosten konnten hier mit 138 €/kWh unter Strategie 3, dem Komplettanbieter China realisiert werden. Die höchsten Selbstkosten liegen mit 202 €/kWh (S2) noch unter den geringsten des OA-Szenarios.

Die Untersuchung der Lieferzeiten im OA-Szenario weisen für die Komplettanbieterstrategien keine nennenswerten Lieferverzögerungen auf. Ebenso kann unter den Spezialisten-Strategien fast durchgängig die angestrebte Lieferzeit gewahrt werden. Dies trifft auch auf die High-Tech-Integrator Strategie China S4 zu. Einzig das amerikanische Gegenstück zu dieser Strategie kann den Forderungen nicht gerecht werden und weist nach der Phase des Wachstums durchgängig eine Lieferzeit von mehr als einem Monat auf. Langfristig kann die Lieferzeit stetig verringert werden, wobei durch die noch ausstehenden Aufträge sowie die weiter ansteigende Nachfrage keine radikale Absenkung möglich ist, ohne die Gefahr größerer Überkapazitäten zu riskieren. Im Szenario Schock zeigen die Integrator- und Spezialisten-Strategien partielle Lieferverzögerungen. Während die Lieferzeiten unter den Integrator-Strategien mittelfristig wieder reduziert werden können, verschärft sich der Lieferverzug bei den Spezialisten-Strategien weiter und erreicht erst nach dem Einbruch der Nachfrage wieder ein Niveau unterhalb der geforderten Frist von einem Monat. Für das EA-Szenario können dagegen im Vergleich zu den beiden andern Szenarien keine Lieferverzögerungen festgestellt werden.

Die Bewertungen der Strategiealternativen mittels des kontinuierlichen PROMETHEE zeigen, dass szenarioübergreifend zu Beginn die High-Tech-Integratorstrategie mit Standort USA zumeist von Vorteil ist. Dies ist vermutlich auf die deutlich geringeren Selbstkosten aufgrund geringerer Investitionen in dieser Phase zurückzuführen. Weiterhin lässt sich feststellen, dass zu Beginn auch die Strategien mit Standort USA im Vorteil sind, was auf die anfänglich vorteilhaftere Ausprägung der standortabhängigen Faktoren zurückzuführen sein dürfte. Insgesamt ist in den ersten beiden Phasen der Verlauf der Strategie-Nettoflüsse sehr volatil. Mittel- bis langfristig kommt es dann jedoch zu einer Konsolidierung und Verstetigung der Verläufe, die zumindest eine Aussage zu der langfristigen Vorteilhaftigkeit einer Strategie erlauben. So zeichnen sich für das OA-Szenario und da EA-Szenario die Komplettanbieterstrategien als langfristig vorteilhaft ab, während für das Schock-Szenario die Spezialisten-Strategie China S6 am vorteilhaftesten ist.

Nachdem sich auf Basis eines Box-Plot-Diagramms keine Strategieempfehlungen formulieren ließen, erfolgte eine integrierte Bewertung der Strategien nach Szenarien und Produktlebenszyklen. Die Ergebnisse sind nochmals in Tabelle 30 zusammengefasst und bilden die Lösung der Forschungsfragen 4 und 5.

Tabelle 30: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der integrierten Bewertung

	Gleichgewichtung			Kostenführer			Differenzierung			
	Wachs- -tum	Reife	Alter	Wachs- -tum	Reife	Alter	Wachs- -tum	Rei- fe	Alter	
Inklusive Lock-in-Effekte	S1/S6			S6			S4/S1			
Exklusive Lock-in-Effekte	S2/S5	S5/S6	S1/S3/S6	S2/S5	S5/S6	S3/S1	S2/S5	S4	S1/S3	
Strategiepfad	USA	S5	S5	S1	S5	S5	S1	S5	S5	S1
	CN	S4	S6	S6/S3	S4	S6	S3	S4	S4	S3

Als generische Strategieempfehlung kann bei Gleichgewichtung der Zielgrößen die Komplettanbieterstrategie S1 empfohlen werden, die zudem auch unter einer Wettbewerbsstrategie der Differenzierung eine Alternative zu der dort vorteilhaftesten High-Tech-Integrator-Strategie S4 darstellt. Unter einer Strategie der Kostenführerschaft ist die Spezialisten-Strategie S6 am geeignetsten, die ebenfalls auch bei Gleichgewichtung sehr gute Ergebnisse erzielt. Zusätzlich zu der Suche nach einer über alle Lebenszyklusphasen hinweg dominanten Produktionsstrategie, wurde ebenfalls untersucht, welche Strategien sich unter Ausschluss möglicher Lock-in-Effekte als am geeignetsten herausstellen. Hierbei hat sich gezeigt, dass, über alle Wettbewerbsstrategien hinweg, für die Phase des Wachstums die Strategien S2 und S5 am vorteilhaftesten sind. Für die Phase der Reife stellen mit Ausnahme der Differenzierungsstrategie, in der S4 am vorteilhaftesten ist, die Strategien S5 und S6 die geeignetste Strategie dar. Im Alter sind dagegen wiederum für alle Wettbewerbsstrategien die Komplettanbieterstrategien S1 und S3 die am geeignetsten Alternativen.

Weiterhin wurden basierend auf den Ergebnissen unter Ausschluss von Lock-in-Effekten mögliche Strategiepfade betrachtet, bei denen auch die Bindewirkung der jeweiligen Elemente der Produktionsstrategie berücksichtigt wird. Da die Ergebnisse einer Strategie in unterschiedlichen Lebenszyklen stets auf denen der vorherigen Phasen aufbauen, ignoriert ein Wechsel zwischen den Strategien diese Historie und Vorleistungen. Aus diesem Grund können die Strategieempfehlungen auch nur von qualitativer Natur sein und stellen lediglich Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen dar. Aufgrund der großen Bindewirkung der Standortstrategie sowie vor dem Hintergrund, das Unternehmen evtl. bereits in einem Land aktiv sind und daher auch weiterhin dort tätig sein möchten, erfolgt eine standortabhängige Betrachtung der Strategiepfade. Für die USA ergibt sich dabei unabhängig von der Wettbewerbsstrategie eine Strategiefolge: Spezialisten-Strategie S5 für die Phase des Wachstums und der Reife sowie die Komplettanbieter-Strategie S1 für die Phase des Alters. Für den Standort China bietet sich dagegen die Folge-Strategie S4 für die Phase des Wachstums, S6 für die Reife und S3 für die Phase des Alters an. Bei einer Gleichgewichtung der Kriterien könnte zudem auch S6 weiterverfolgt werden.

Im Umkehrschluss zu obigen Erkenntnissen bedeutet dies ebenfalls, dass Strategien mit hoher Fertigungstiefe und umfangreichem Produktportfolio zu Beginn des Produktle-

benszyklus der LiB weniger vorteilhaft sind. In den späteren Phasen, die von einer hohen Nachfrage geprägt sind, sind jedoch ebendiese Strategien am erfolgreichsten.

9 Kritische Würdigung und Forschungsbedarf

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Verbesserung der Entscheidungsqualität bei der strategischen Produktionsplanung in jungen Märkten. Um dieses Ziel zu erreichen wird eine Planungsmethodik entwickelt, die den Rahmenbedingungen in jungen Märkten gerecht wird. Wesentlicher Bestandteil hiervon stellt die simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung zur dynamischen und kontinuierlichen Bewertung und Identifikation von robusten Produktionsstrategien dar. Diese wird abschließend im Rahmen einer exemplarischen Anwendung, anhand von Experteneinschätzungen aus der LiB-Industrie, angewandt. In Kapitel 9.1 werden die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse vor dem Hintergrund der Problemstellung sowie obiger Zielsetzung kritisch diskutiert. Anschließend wird in Kapitel 9.2 der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

9.1 Kritische Würdigung

Junge Märkte bieten ein hohes wirtschaftliches Potential aber auch Risiken für Unternehmen, die darin partizipieren möchten. Einer der zentralen Ansatzpunkte für die Realisierung wettbewerbsfähiger Produktpreise ist das Produktionssystem. Trotz des entsprechend hohen Stellenwertes, der der Planung einer solchen Partizipation und der Gestaltung des entsprechend benötigten Produktionssystems entgegengebracht werden sollte, fehlt es bis dato jedoch an einer durchgängigen Methodik, die dem hohen Grad an Unsicherheit und Dynamik, die junge Märkte i.d.R. kennzeichnen, gerecht wird.

Diese Arbeit setzt daher an diesem Punkt an. Zur Entwicklung einer adäquaten Planungsmethodik stellt die Untersuchung der Ursache für die Entstehung der Unsicherheiten und der Dynamik eine unausweichliche Notwendigkeit dar. Dabei zeigt sich für den in dieser Arbeit fokussierten Markt für LiB, dass dieser direkt mit dem Markt für Elektrofahrzeuge gekoppelt ist. Dieser wiederum wird durch zahlreiche ökonomische, ökologische, politisch-rechtliche, sozio-kulturelle sowie technologische Rahmenbedingungen beeinflusst. Gleichzeitig wurde die derzeitige Struktur des Marktes für LiB genauer untersucht. Ein wesentliches Ergebnis ist dabei zum einen die Erkenntnis, dass die Unsicherheit und Dynamik im Markt für LiB zwar exogen über den Markt für Elektrofahrzeuge induziert wird, die LiB selbst jedoch das inerte Potential hat, die Rahmenbedingungen, die den Markt für Elektrofahrzeuge bestimmen, zu beeinflussen. Zum anderen existiert derzeit für den LiB-Markt noch keine dominante Produktionsstrategie, die zur Orientierung für andere Akteure dienen könnte. Verschärfend lässt sich diese Aussage sogar auf die einzelnen Teilstrategien der Produktionsstrategie ausweiten. Es mangelt somit an einer adäquaten Entscheidungsunterstützung für die Akteure in diesem Markt zur Auswahl einer robusten Produktionsstrategie.

Ausgehend von dieser Erkenntnis wurde untersucht, inwiefern der bestehende Prozess zur strategischen Planung auch unter den identifizierten Rahmenbedingungen für den jungen Markt der LiB anwendbar ist. Die jeweiligen Planungsphasen des strategischen

Planungsprozesses wurden daraufhin untersucht, ob sie den Gegebenheiten junger Märkten Rechnung tragen können. Als grundlegendes Ergebnis zeigt sich, dass der strategische Planungsprozess und dessen Methoden zwar für etablierte Märkte und dessen Akteure mit ausreichender Informationsbasis durchaus gut geeignet ist, unter den informatorischen Defiziten und Unsicherheiten in jungen Märkten jedoch nicht mehr zielführend ist. Die identifizierten Defizite in den einzelnen Planungsphasen dienen anschließend als Grundlage für die Definition von Anforderungen an eine neue Planungsmethodik und deren konzeptionelle und systematische Entwicklung. Diese Erkenntnisse stellen die Lösung der ersten formulierten Forschungsfrage dar. Das Planungsproblem der strategischen Planung der Produktion wird im Rahmen der Planungsmethodik in ein Entscheidungsmodell überführt, mit dessen Unterstützung robuste Strategien getestet, bewertet und schließlich ausgewählt werden können. Diese Arbeit bietet hierbei einen solchen vollständigen und durchgängigen Ansatz zur strategischen Planung und zur Entscheidungsunterstützung unter den Rahmenbedingungen junger Märkte. Die konzeptionelle und methodische Ausgestaltung der Planungsmethodik stellt dabei die Lösung der zweiten formulierten Forschungsfrage dar. Die systematische, problemadäquate Auswahl der Methoden sowie deren Implementierung und Integration in die Gesamtplanungsmethodik stellen dabei einen weiteren Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Während die Funktionalität und Praxistauglichkeit des Fragebogens zur Definition des Zielsystems im Rahmen der Expertenbefragung getestet und als geeignet empfunden werden kann, stellt der morphologische Kasten zur Strategieformulierung eine ebenfalls standardisierte Methodik dar, deren Funktionalität und Praxistauglichkeit zwar nicht mit Experten aus der Praxis getestet wurde, jedoch aufgrund der weiten Verbreitung und alltäglichen Verwendung als gegeben erachtet werden kann.

Wesentlich anspruchsvoller gestaltet sich die Wirkprognose der Produktionsstrategien sowie deren Bewertung. Die Rahmenbedingungen in jungen Märkten bedingen in diesem Kontext die Berücksichtigung der dynamischen Komplexität, des langen Planungshorizonts sowie der vorherrschenden Unsicherheiten. Die identifizierten Methoden System Dynamics und PROMETHEE erweisen sich in diesem Kontext als äußerst nützlich und zielführend. Die systemdynamische Simulation bietet dabei die Möglichkeit aufgrund der strukturbasierten Modellierung, die in den Kapitel 2, 3 und 4 identifizierten Wechselwirkungen und komplexen Zusammenhänge systemisch zu erfassen und in Form eines generischen Modell des Produktionssystems für die Produktion von LiB abzubilden. Dem Planer wird somit erstmals ein Simulationsmodell zur Seite gestellt, mit dem er den Einfluss unterschiedlicher Produktionsstrategien auf die Entwicklung und die Leistung eines Produktionssystems für LiB aus systemischer Sichtweise analysieren kann. Der große Detaillierungsgrad und Praxisbezug bei der Modellierung des Produkts LiB und dessen Produktionsprozesses unter Einbezug aller relevanten Elementarfaktoren, ermöglichen es, ein sehr plastisches Bild des Produktionssystems und dessen Kostenstruktur zu erzeugen. Durch die explizite Berücksichtigung von spezifischen Degressionskoeffizienten für jede einzelne Produktionsanlage, kann der in Kapitel 4.2.1 aus wettbewerbsstrategischer Sicht notwendigen Forderung nach der Berücksichtigung des produkt- und fertigungsspezifischen Charakter von Erfahrungskurven, Rechnung getra-

gen werden. Das Modell entspricht somit mit dieser produkt- und fertigungsspezifischen Perspektive, die im Vergleich zu den in der Regel verwendeten, rein auf die Produktionsmengen fokussierten Erfahrungskurven, die zudem von einer optimalen Produktion ausgehen, viel eher der unternehmerischen Realität entsprechen.

Das Problem der Bewertung der teils konfliktionären Zielgrößen, wird mittels der Methode PROMETHEE begegnet. Die Wahl dieses Prävalenzverfahrens und die sich daraus ergebenden Vorteile durch die Beachtung von unscharfen Präferenzeinschätzungen oder die eingeschränkten Kompensationsmöglichkeiten sowie die bereits vordefinierten Präferenzfunktionen, ermöglichen es dem Entscheider seine Präferenzen auf einer natürlichen Art und Weise Ausdruck zu verleihen. Zudem wird durch die Methode der Informationsverlust im Zuge der Bewertung auf ein möglichst geringes Maß reduziert, was mit der Maxime der Planungsmethodik nach Informationstreue und Transparenz korreliert.

Als zweites Problem, neben den konfliktionären Zielgrößen, muss insbesondere unter den dynamischen Rahmenbedingungen eines jungen Marktes eine Lösung für das Zeitproblem bei der Bewertung gefunden werden. Zur Lösung dieses erfolgskritischen Problems wird erstmals eine methodische Kombination von System Dynamics und PROMETHEE vorgenommen, bei der letztere in die systemdynamische Simulation integriert wird und sowohl den dynamischen Verlauf der Nettoflüsse einzelner Strategien aufzeigt als auch eine aggregierte Aussage auf Basis einer integrierten Bewertung der Flüsse ermöglicht. Die methodische Kombination in dieser Weise stellt die Lösung der dritten Forschungsfrage dar. Zudem erweist sich die Kombination von systemdynamischer Simulation als Methode zur Wirkungsprognose und PROMETHEE als Methode zur multikriteriellen Bewertung bei der Lösungsfindung und -interpretation als extrem hilfreich und verbessert die Entscheidungsqualität indem sie zu einer erhöhten formalen Rationalität bei der Entscheidung führt. Es wird sowohl der Forderung nach Transparenz und Informationsbeständigkeit Rechnung getragen, als auch nach einer quantitativen Aussage zur einfachen Detektion und Auswahl einer Strategie. Das Entscheidungsunterstützungssystem erlaubt es dem Entscheider entsprechend seiner Präferenzen, vorteilhafte Produktionsstrategien für unterschiedliche Lebenszyklusphasen der LiB anhand der integrierten Auswertung zu erkennen und Produktionsstrategien auf dieser Basis rational auszuwählen. Das Ergebnis dieser integrierten Bewertung bildet die Lösung von Forschungsfrage 4. Die Antwort auf die fünfte Forschungsfrage ergibt sich aus der integrierten Bewertung, unter Einbezug spezifischer Wettbewerbsstrategien.

Die Kopplung von PROMETHEE zur Bewertung und Lösung der Zielkonflikte mit System Dynamics als Methode der Strukturmodellierung ermöglicht es, die Entstehung und

Entwicklung der Zielgrößen bis ins Detail nachzuvollziehen.²⁶⁸ In Folge dessen entstehen Lerneffekte über die Konsequenzen von Entscheidungen und über das Systemverhalten in der dynamisch-komplexen Umwelt junger Märkte an sich. Insgesamt kann durch die erhöhte Informationsbeständigkeit, die gesteigerte Transparenz und Detaillierung sowie aufgrund resultierender Lerneffekte, die Rationalität bei der Entscheidung deutlich erhöht werden und somit die angestrebte Verbesserung der Entscheidungsqualität erreicht werden.

Dem Prozess der Validierung des Modells wird aufgrund der geringen Erfahrungswerte über den jungen Markt für LiB, der großen Unsicherheit bei den im Rahmen der Modellierung getroffenen Annahmen und Vereinfachungen bezüglich Struktur- und Wirkungszusammenhänge sowie bezüglich der Daten zum Produktions- und Umweltsystems ebenfalls ein hoher Stellenwert eingeräumt. Hierzu wurde eine Reihe passfähiger Validierungstests ausgewählt und das Modell entsprechend untersucht. Auf dieser Grundlage kann die Validität des Modells als positiv angesehen werden.

Auch wenn im Rahmen dieser Arbeit versucht wurde möglichst allen kritischen und sensitiven Aspekten gerecht zu werden, bedingt der Umfang und die Komplexität der Problemstellung, dass Vereinfachungen vorgenommen und Kompromisse eingegangen werden müssen. An erster Stelle ist hier das Aggregationsniveau bei der Definition von Produktionsstrategien zu nennen. Die Formulierung dieser Strategien ist in der Regel eine sehr aufwendige Planungsangelegenheit. Da in dieser Arbeit jedoch der systemische Gedanke und somit die Interaktion zwischen den Strategien einen zentralen Stellenwert einnehmen, besteht die Notwendigkeit, Strategien nicht in ihrer ganzen Komplexität darzustellen, sondern sich auf deren zentrale Aspekte zu beschränken. Die

²⁶⁸ Dieser Vorteil lässt sich z. B. bei der Bewertung von Strategie 2, der Integrator-Strategie mit Standort USA, im OA-Szenario nachvollziehen. Die Lieferverzögerung verweilt dort beinahe über den gesamten Simulationslauf hinweg in einem nicht akzeptablen Zeitraum. Der Verlauf zeigt dabei keinerlei Ähnlichkeit zu den übrigen Strategien auf, weshalb man auch einen Fehler vermuten könnte. Die Ursache dieser Entwicklung kann aufgrund der Strukturmodellierung nachvollzogen und ein etwaiger Fehler ausgeschlossen werden. Es kann folgender Kausalzusammenhang beobachtet werden: Aufgrund der geringeren Investitionen im Fall des Standorts China, fallen die Selbstkosten entsprechend geringer aus. Diese Differenz hat zur Folge, dass geringfügig früher ein wettbewerbsfähiges Kostenniveau erreicht wird und Marktanteile ausgebaut werden. Entsprechend werden auch etwas früher die Produktionskapazitäten erweitert, wodurch das Kostenniveau weiter gesenkt werden kann. Beim Standort USA erfolgt diese Entwicklung aufgrund der etwas höheren Selbstkosten zeitverzögert, und es entsteht ein Henne-Ei-Problem. Die Selbstkosten erreichen ein wettbewerbsfähiges Niveau, und Marktanteile werden ausgebaut. Es fehlen jedoch die entsprechenden Produktionskapazitäten, da aufgrund der zurückgehenden Nachfrage nach HEV diese nicht mehr expansiv ausgebaut werden. Durch diesen Mangel an Kapazitäten entstehen Kosten für Fehlmengen, die wiederum die Selbstkosten erhöhen. Dieser Wirkungskreis kann erst mit der steigenden Nachfrage nach PHEV durchbrochen werden.

Lösung des Entscheidungsproblems sollte daher stets vor diesem Hintergrund betrachtet werden und eher als Ausgangspunkt für eine daran anschließende Feinplanung verstanden werden. Ferner soll nochmals betont werden, dass es sich um ein Entscheidungsunterstützungssystem handelt. Dem Entscheider soll daher keine finale Lösung präsentiert werden, sondern bei seiner Entscheidungsfindung unterstützt werden. Der potentielle Lösungsraum ist je nach Ausgangslage des betrachteten Unternehmens mitunter sehr groß. Die Forderung nach Transparenz und die Darstellung der kontinuierlichen Nettoflüsse bedingen jedoch, dass jeweils nur eine geringe Anzahl an Strategien gleichzeitig analysiert werden können. Deren Variation und der damit einhergehende Lernprozess beim Entscheider sind zwar vor dem Hintergrund der Problemstellung dieser Arbeit sinnvoll, jedoch besteht die Gefahr, dass eine vorteilhaftere Strategie nicht untersucht wird. Ebenfalls als kritisch anzusehen sind die großen Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung relevanter Parameter. Es konnte zwar im Rahmen von Risikoanalysen festgestellt werden, dass diese sich als wenig sensitiv gezeigt haben, jedoch kann der Variationsrahmen, der als Grundlage für die Analysen dient, auch durchaus stärkeren Schwankungen unterworfen sein. Diesem Punkt wurde versucht, durch die Gestaltung der Szenarien Rechnung zu tragen. In dem Modell wurde jedoch stets von einem rationalen Wettbewerbsverhalten ausgegangen, extreme „künstliche“ Effekte wie etwa Dumpingpreise, die in der Praxis durchaus vorkommen und einen großen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens haben können, wurden daher in dem Modell nicht berücksichtigt, können in der Praxis jedoch durchaus auftreten. Zudem wurde vereinfachend auf eine Batterietechnologie (LiB) und eine Zelltechnologie (NMC) fokussiert. Der Zeitrahmen wurde indes so gewählt, dass die Wahrscheinlichkeit des Aufkommens und der Substitution durch eine disruptive Technologie eher gering ist, jedoch kann mit fortschreitender, technologischer Entwicklung sich das Produkt evolutionär verändern (z. B. geringerer Anteil an Mangan oder Kobalt). Ein solcher Effekt würde sich auf die Kostenstruktur der Batterie auswirken. Da diese Entwicklung jedoch voraussichtlich alle Akteure in gleichem Umfang betreffen würde, bleibt das relative Ergebnis unverändert. Aus diesem Grund wird dieser Effekt nicht explizit berücksichtigt.

Die Planungsmethodik und das darin implementierte Entscheidungsunterstützungssystem wurden speziell für den Markt der LiB entwickelt. Hierbei wurde jedoch darauf geachtet, dass Methodik und Modell möglichst generisch gestaltet werden, sodass die Möglichkeit besteht, dieses auch auf weitere Problemstellungen aus anderen Anwendungsbereichen anzuwenden. Um die Konsistenz und Übertragbarkeit sicherzustellen, sollte der Anwendungsfall jedoch einigen essentiellen Anforderungen genügen. So sollte es sich bei dem Produkt um eine strategische Komponente handeln. Mit dieser Einschränkung wird sichergestellt, dass der mit der Adaption des Modells einhergehende Aufwand, auch in einem gerechten Verhältnis zum Nutzen steht. Ferner ist die Planungsmethodik zur Lösung multikriterieller Problemstellungen konzipiert worden, was in der Regel dem Charakter strategischer Entscheidungen entspricht. Da in Kapitel 5 eigens problemspezifische Methoden für die Anforderungen junger Märkte ausgewählt wurden, sollte es sich um einen Markt in einem dynamisch komplexen Umfeld handeln,

der mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Nichtsdestotrotz sollte der Lebenszyklus der Technologie über einen gewissen Zeitraum überschaubar sein und nicht von direkt absehbaren disruptiven Technologien unterbrochen werden. Aufgrund der verwendeten Erfahrungskurveneffekten, sollte das Produkt das Potential zur Massenproduktion aufweisen. In diesem Kontext sei auch auf die Ausgestaltung des Produktionssystems mit bekannter oder abschätzbarer Produktionstechnik verwiesen. Die recht detaillierte Betrachtung der einzelnen Fertigungsschritte mit den dazugehörigen Erfahrungskurveneffekten bedarf einer grundlegenden oder zumindest antizipierbaren Kenntnis über die dort eingesetzte Produktionstechnik. Unter Beachtung der beschriebenen Rahmenbedingungen ist mit dem entsprechenden Anpassungsaufwand die Übertragung der Planungsmethodik auf eine andere Problemstellung, wie z. B. die des Markts für Brennstoffzellen, möglich.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Rahmen dieser Arbeit eine Planungsmethodik samt integriertem strategischem Entscheidungsunterstützungssystem konzipiert und entwickelt wurde. Hierdurch wird es ermöglicht, auch in jungen, dynamisch-komplexen Märkten mit hoher Unsicherheit robuste Produktionsstrategien zur strategischen Planung der Produktion zu entwickeln. Die methodische Kopplung von systemdynamischer Simulation und PROMETHEE ermöglicht es dem Planer, eine kontinuierliche Bewertung der Produktionsstrategien über den gesamten Planungszeitraum hinweg vorzunehmen und eine Strategie auf quantitativer Basis auszuwählen. Die Zweckmäßigkeit und Funktionalität der Planungsmethodik sowie der darin implementierten Methoden wurde durch die exemplarische Anwendung auf Grundlage von Informationen aus der Praxis überprüft und bestätigt. Die Planungsmethodik zeigt sich dabei als praktikabel und zielführend. Das Entscheidungsunterstützungsmodell zeigt ein plausibles und nachvollziehbares Verhalten auf. Trotz schwieriger Informationslage, großer Unsicherheiten und weiterer struktureller Defekte können Produktionsstrategien formuliert, bewertet sowie vorteilhafte, robuste Strategien ausgewählt werden. Die Ergebnisse erlauben sowohl Rückschlüsse und Handlungsempfehlungen für die spezifischen Belange des Planers, als auch generische Rückschlüsse für Akteure, die in dem Markt aktiv werden möchten. Abschließend lässt sich festhalten, dass die Entscheidungsqualität bei der strategischen Produktionsplanung für junge Märkte mit der entwickelten Planungsmethodik sowie dem strategischen Entscheidungsunterstützungssystem deutlich verbessert werden kann. Die Arbeit schließt somit die anfangs formulierte Forschungslücke. Die formulierten Forschungsfragen konnten zudem allesamt beantwortet werden. Die Arbeit liefert somit inhaltlich weitere Erkenntnisse über ein aktuell kontrovers diskutiertes Thema und erweitert zudem durch die entwickelte Planungsmethodik und die methodische Kombination von System Dynamics und PROMETHEE, zur dynamischen und kontinuierlichen Bewertung, das methodische Spektrum zur Entscheidungsfindung.

9.2 Forschungsbedarf

Ausgehend von den bereits genannten Kritikpunkten sowie den gewonnenen Erfahrungen aus der Entwicklung und der Anwendung der Planungsmethodik, lässt sich weiterführender Forschungsbedarf identifizieren.

Aus inhaltlicher Perspektive stellt eine stärkere Berücksichtigung der globalen Marktstrukturen eine sinnvolle Ergänzung dar, durch die die derzeitige oder zukünftige Vorteilhaftigkeit eines Standortes stark beeinflusst werden kann. In diesem Kontext würde sich auch die explizite Berücksichtigung der damit einhergehenden Logistikkosten anbieten. LiB werden als Gefahrgut deklariert, was deren Transport verteuert. Das Bestehen einer großen lokalen Nachfrage hätte somit zweifellos Einfluss auf die Standortwahl. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass durch große Produktionsmenge entsprechende Skaleneffekte angestrebt werden, durch die die Herstellkosten für LiB gesenkt werden. Auch wenn dieser Weg, wie u.a. das Beispiel von Teslas „Gigafactory“ zeigt, als plausibel und zukunftsträchtig angesehen wird, könnte es sich vor dem Hintergrund der Transportkosten oder anderer Faktoren vielleicht durchaus lohnen, einen weiteren Standort zu eröffnen. Die Skaleneffekte würden entsprechend geringer ausfallen, während im Gegenzug jedoch die Logistikkosten sinken.

Diesen Gedanken weiterverfolgend führt dies zu einem weiteren sinnvollen Entwicklungsbedarf. Die analysierten Produktionsstrategien wurde in dieser Arbeit ex ante nach möglichst großer Plausibilität und Zukunftsfähigkeit gewählt und werden bis zum Ende des Untersuchungszeitraums beibehalten. Ein Wechsel zwischen einzelnen Strategien lässt sich lediglich unter Ausschluss von „Lock-in-Effekten“ quantifizieren. Zwar besteht wie bereits beschrieben eine teils große Bindewirkung aufgrund der verfolgten Strategien, jedoch ist der Wechsel zwischen einzelnen Strategien im Zeitverlauf potentiell möglich. Die daraus resultierenden Effekte auf die Struktur des Produktionssystems und die bis dato erlangten Erfahrungseffekte, bedürfen jedoch einer detaillierten und weitreichenden Analyse. Dies kann im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr in angemessenem Umfang erfolgen. Nichtsdestotrotz verspricht diese Wechseloption einen zusätzlichen Mehrwert für die Spezifität und die Qualität der Entscheidung.

Neben dem Wechsel zwischen Produktionsstrategien stellt auch der Wechsel der Produkttechnologie eine potentielle Bereicherung dar. Für diese Arbeit wurde als Produkt jene Zellchemie und Zellgeometrie gewählt, der das größte Markt- und Zukunftspotential zugebilligt wird. Es ist jedoch keineswegs sicher, dass diese in unveränderter Form bis zum Ende des Untersuchungszeitraums so bestehen bleiben. Vielmehr ist davon auszugehen, dass Zellchemien und -geometrien eine evolutionäre Entwicklung durchmachen werden und neue Elektrodenmaterialien zum Einsatz kommen werden oder auch andere Zellgeometrien. In diesen Fällen gilt es, entsprechend zu prüfen, welchen Einfluss eine solche Entwicklung auf das Produktionssystem und die bestehenden Erfahrungskurveneffekte ausüben würde. Als problematisch hierbei ist jedoch der Einfluss eines solchen technologischen Wandels auf den Markt und dessen Akteure zu sehen. In

der Regel geht ein solcher Technologiewechsel nicht gleichzeitig vonstatten bzw. werden neue technologische Entwicklungen nicht unternehmensübergreifend errungen. In diesem Kontext würde daher auch den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bzw. Patent- und Lizenzaktivitäten eine stärkere Rolle zukommen, die in eine solche Betrachtung mit einbezogen werden sollten.

Aus methodischer Sicht lassen sich ebenfalls weitere Entwicklungspotentiale identifizieren. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Entscheidungsunterstützung des Planers. Für das bei der exemplarischen Anwendung betrachtete Unternehmen existierten im Vorhinein keinerlei Einschränkungen bezüglich der Gestaltung von Produktionsstrategien. Der in Frage kommende Lösungsraum war entsprechend groß. Aufgrund des potentiell großen Lösungsraums ist es jedoch nicht ausgeschlossen, dass keine der tatsächlich vorteilhaftesten Lösungen identifiziert wird. Die bereits betonte hohe wirtschaftliche Bedeutung dieser strategischen Entscheidung, lässt jedoch erwarten, dass in der Praxis eine zusätzliche Rückversicherung stark zur Vertrauensbildung in eine ausgewählte Produktionsstrategie beitragen würde. Zu diesem Zweck erscheint in Anbetracht der Vorteile beider Methoden, ein hybrider Ansatz zusammen mit einer Optimierung als sehr fruchtbar. Zwar ist zu erwarten, dass in der Praxis zumeist bereits Einschränkungen bei der Formulierung von Produktionsstrategien existieren, wodurch die kombinatorische Komplexität reduziert wird, jedoch können die für eine Optimierung benötigte Rechenzeit sowie der benötigte Speicherbedarf eine potentielle Restriktion darstellen.²⁶⁹

Weiterhin stellt die Granularität der berücksichtigten Teilstrategien einen weiteren Ansatzpunkt dar, um ein detaillierteres Planungsniveau zu erreichen. Die Strategien werden zwar auf strategisch-taktischer Ebene berücksichtigt, wobei jedoch gerade die taktische Ebene verstärkt mit einbezogen werden kann, um den Teilstrategien weiteren Tiefgang zu verleihen. In diesem Kontext würde auch der Punkt der betrieblichen Organisation weiter an Stellenwert gewinnen. Ein sicherlich sinnvoller Schritt in diese Richtung wäre eine Ergänzung zur Berücksichtigung von Gruppenentscheidungen, wodurch es ermöglicht würde, eine Entscheidung unter Einschluss aller relevanten Akteure in einem Unternehmen zu finden. Das *SEPP* könnte in diesem Kontext aufgrund der hohen Transparenz und der Möglichkeit zur Abbildung der mentalen Modelle eine große Bereicherung darstellen, um die Kommunikation, Diskussion sowie letztlich die Findung eines gemeinsamen Lösungskonsens zu vereinfachen. Lösungen die auf diesem Wege gefunden werden, versprechen eine breite Akzeptanz innerhalb des Unternehmens, was im Rahmen von strategischen Entscheidungen von großem Vorteil sein kann.

²⁶⁹ Die Rechenzeit stellt in der bisherigen Modellform keinerlei Einschränkung dar, mit zunehmender Parametervariation könnte diese jedoch stark zunehmen. Der Speicherbedarf für die der Simulation zugrundeliegende Datenbasis beläuft sich auf ca. 1 GB.

10 Zusammenfassung

Junge Märkte, wie der für Lithium-Ionen-Batterien (LiB), stellen für neue und bereits etablierte Akteure der Wertschöpfungskette sowohl Chance als auch Risiko dar. Risiken entstehen dabei durch die Gefahr, dass bisher für das Unternehmen wichtige Komponenten substituiert werden, während sich Chancen durch die Möglichkeit zur strategischen Anpassung bzw. Erweiterung des Produktportfolios durch eine neue Komponente mit hohem wirtschaftlichem Potential ergeben. Die Entscheidung für eine Partizipation in diesem jungen Markt bedingt unweigerlich den Aufbau neuer Produktionsstrukturen, die oftmals mit hohem wirtschaftlichem Aufwand verbunden sind und somit auch eine große Bindewirkung besitzen. Zudem sind die Produktionsstrukturen oftmals ausschlaggebend für die Wettbewerbsfähigkeit und das Überleben eines Unternehmens. Die Schaffung und Bereitstellung der produktionsspezifischen Potentiale in einem Produktionssystem, erfolgt dabei anhand der im Rahmen von Produktionsstrategien festgelegten Entscheidungen.

In jungen Märkten liegen die zur Formulierung einer solchen Produktionsstrategie planungsrelevanten Informationen zu diesem frühen Zeitpunkt in der Regel jedoch nur bedingt vor und die zukünftige Entwicklung des Marktes und dessen Akteure ist zudem geprägt von großer Unsicherheiten, Dynamik und Komplexität. Dies führt dazu, dass die mit der Wahl einer Produktionsstrategie einhergehenden langfristigen Konsequenzen auf die Unternehmensziele sich nicht ex ante quantifizieren lassen. Die zukünftige Gestalt und die daraus resultierende Wettbewerbsfähigkeit des Produktionssystems kann entsprechend auch nicht eingeschätzt werden. Als Konsequenz ergibt sich die Problematik, dass eine generelle Entscheidung über die Partizipation in einem jungen Markt, wie dem der LiB, sowie im speziellen über die hierbei vorteilhafteste Produktionsstrategie, derzeit methodisch und insbesondere instrumentell unzureichend unterstützt wird und die potentiell existenziellen Entscheidungen nur bedingt rational gefällt werden können. Die bewährten und etablierten Methoden der strategischen Planung sowie bestehende Modelle zur Planung und Entscheidungsunterstützung fokussieren zumeist auf spätere Marktphasen und werden den turbulenten Rahmenbedingungen junger Märkte in der Regel nicht gerecht und/oder verbleiben auf einem für diese existentielle Fragestellung unzureichenden qualitativen Aussageniveau.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieser Arbeit, die Entscheidungsqualität bei der Formulierung und Bewertung von Produktionsstrategien für die von Dynamik und Unsicherheit geprägten jungen Märkte zu verbessern. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine systemorientierte Sicht auf das Planungsproblem unabdingbar. Zudem würde eine reine Fokussierung auf den Aspekt der Entscheidung der Komplexität der Problemstellung nicht ausreichend gerecht werden. Vielmehr bedarf es einer gesamtheitlichen Planungsmethodik zur Überwindung der strukturellen Defekte und informatorischen Defizite des Planungsproblems. Auf Grundlage dieser Planungsmethodik lässt sich ein Entscheidungsmodell entwickeln, das dem Planer anschließend in Form eines Entschei-

dungsunterstützungssysteme zugänglich gemacht wird und ihn bei der Bewertung und Auswahl von robusten und wettbewerbsfähigen Produktionsstrategien unterstützt.

Zur Lösung der komplexen Problemstellung dieser Arbeit bedarf es einer Unterteilung in drei übergeordnete Problemteilmereiche, die sequentiell aufeinander aufbauen und letztlich die Lösung der schlecht strukturierten Planungsaufgabe ermöglichen. Im Teil A der Arbeit, der die Kapitel 2 bis 4 umfasst, werden die relevanten Grundlagen für die strategische Planung im jungen Markt für LiB genauer erläutert. Zur Entwicklung einer zielführenden Planungsmethodik für dynamisch-komplexe und von Unsicherheiten geprägte Märkte, ist es in einem ersten Schritt notwendig, ein Verständnis für die Ursachen dieser Eigenschaften zu generieren, was Gegenstand von Kapitel 2 ist. Als Ausgangspunkt hierfür dient das Faktum, dass der Markt für LiB im Traktionsbereich direkt mit den Entwicklungen im Markt der Elektromobilität gekoppelt ist. Darauf aufbauend werden die ökonomischen, ökologischen, politisch-rechtlichen, sozio-kulturellen sowie technologischen Rahmenbedingungen untersucht, die im Kontext der Elektromobilität den Markt für LiB beeinflussen. Als Synthese dieser Betrachtung kann festgehalten werden, dass der Markt für LiB von der Entwicklung des Marktes für die Elektromobilität zwar stark exogen beeinflusst wird, im Gegenzug jedoch ebenso ein großes Potential inne hat, die Diffusion der Elektromobilität selbst stark zu beeinflussen. Aufgrund dieser engen Wirkungszusammenhänge und Rückkopplungseffekte zwischen beiden Märkten ist für die daran anschließende Betrachtung im Rahmen der Arbeit, eine systemische Perspektive sinnvoll. Ebenfalls in Kapitel zwei wird die Struktur des Marktes für LiB genauer analysiert. Dabei lassen sich zwei wesentliche Erkenntnisse gewinnen. Es herrscht ein großes Defizit an planungsrelevanten Informationen bezüglich des Marktes und seiner Wettbewerber. Dies ist charakteristisch für junge Märkte und stellt ein erhebliches Hemmnis bei der Anwendung etablierter Methoden der strategischen Produktionsplanung dar. Zudem lässt sich anhand der Aktivitäten aktuell aktiver Akteure im Markt derzeit keinerlei dominante Produktionsstrategie identifizieren, was die Notwendigkeit einer geeigneten Planungsmethodik und Entscheidungsunterstützung unterstreicht.

Die externe Sicht auf den Markt für LiB wird in Kapitel 3 durch die interne Unternehmenssichtweise ergänzt und beschreibt den Produktionsprozess sowie das entsprechende benötigte Produktionssystem zur Herstellung von LiB. Die geschilderten Prozesse und Produktionsfaktoren bilden die Grundlage für die Modellierung des Produktionssystems in Kapitel 7.

Im letzten Kapitel von Teil A, werden die Grundlagen des Prozesses der strategischen Produktionsplanung sowie die in diesem Kontext notwendige systemische Betrachtung der Produktion erläutert. Zentrales Element des Kapitels stellt dabei die Synthese der bisherigen Erkenntnisse und die sich daraus ableitenden Implikationen für die strategische Produktionsplanung auf jungen Märkten dar. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht dabei die Frage, inwiefern sich der bestehende Prozess zur strategischen Planung auch unter den identifizierten Rahmenbedingungen für den jungen Markt der LiB anwenden

lässt. Die in diesem Zuge identifizierten Defizite definieren die Anforderungen für die im Teil B dieser Arbeit systematisch entwickelte Planungsmethodik, deren Konzeption und Entwicklung Gegenstand der Kapitel 5 bis 7 ist.

Zur Lösung des strategischen Planungsproblems wird dieses in ein Entscheidungsmodell überführt. Die konzeptionelle und methodische Ausgestaltung erfolgt dabei systematisch und entsprechend den definierten Anforderungen für die einzelnen Komponenten des Entscheidungsmodells. Die Arbeit bietet dabei eine vollständige und durchgängige Planungsmethodik zur Entscheidungsunterstützung bei der strategischen Planung der Produktion unter den Rahmenbedingungen junger Märkte. Die konzeptionelle Ausgestaltung der Planungsmethodik kann dabei prinzipiell auf andere junge Märkte übertragen werden (vgl. Kapitel 5.4). Die konkrete methodische Ausgestaltung der einzelnen Komponenten des Entscheidungsmodells muss jedoch unter Umständen an die speziellen Gegebenheiten des Marktes angepasst werden. Unter Kenntnis dieser Notwendigkeit, erfolgte die methodische Umsetzung in den jeweiligen Komponenten unter der Prämisse einer möglichst generischen Struktur. Dies betrifft insbesondere die Komponenten der Wirkprognose und der Bewertung. Zentrales Element und mitunter Schwerpunkt des Entscheidungsmodells und der Arbeit bildet hierbei die erstmalige methodische Kombination der darin verorteten Methoden System Dynamics und PROMETHEE, mit dem Ziel einer kontinuierlichen und dynamischen Bewertung der Produktionsstrategien. Zusammen mit einer nachgelagerten über den Betrachtungszeitraum integrierten Gesamtbewertung, liefert diese Arbeit damit ebenfalls eine praktikable Lösung für das Zeitproblem bei der Bewertung dynamischer Zielgrößen und der damit einhergehenden Frage wann und wie eine solche Bewertung erfolgen kann.

Aufbauend auf die konzeptionelle Überlegung zur Kombination beider Methoden erfolgt anschließend deren methodische Ausgestaltung in Form eines Entscheidungsunterstützungssystems für die Anwendung auf den jungen Markt für LiB (vgl. Kapitel 7). Die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln dienen dabei als Grundlage für die Modellierung und Parametrisierung des Produktionssystems und hierfür relevanter Bereiche. Dem Planer wird es somit erstmalig ermöglicht, verschiedene Produktionsstrategien unter alternativen Umweltzuständen nicht nur zu simulieren, sondern auch kontinuierlich und transparent zu jedem einzelnen Zeitpunkt der Simulation eine Aussage über deren aktuelle als auch gesamte Vorteilhaftigkeit zu treffen. Den Abschluss von Teil B bildet die kritische Validierung des Modells.

Die exemplarische Anwendung der Planungsmethodik sowie des Entscheidungsunterstützungssystems am Beispiel des Marktes für LiB bilden den Kern von Teil C dieser Arbeit. Als Grundlage für die Definition der hierzu notwendigen Zielgrößen und Präferenzen werden Primärdaten aus der Praxis verwendet. Auf diese Weise kann sowohl eine gewisse Realitätsnähe der Ergebnisse sichergestellt werden, als auch die Praxistauglichkeit wesentlicher Elemente der Planungsmethodik nachgewiesen werden. Im Rahmen der Analyse werden sechs unterschiedliche Produktionsstrategien unter drei alternativen Umweltszenarien simuliert und bewertet. Auf Grundlage der Ergebnisse

können sowohl generische als auch spezifische Empfehlungen für robuste und wettbewerbsfähige Produktionsstrategien für unterschiedliche Phasen des Produktlebenszyklus formuliert werden. Vertiefend werden in diesem Kontext ebenfalls alternative Wettbewerbsstrategien analysiert. Den Abschluss von Teil C bilden die kritische Würdigung der Arbeit sowie der Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

Abschließend lässt sich somit festhalten, dass mit der im Rahmen dieser Arbeit konzipierten und entwickelten Planungsmethodik sowie dem strategischen Entscheidungsunterstützungssystem einem Planer erstmalig die Bewertung von Produktionsstrategien für den jungen Markt der LiB, unter Einbezug aller relevanter Wechselwirkungen und Teilstrategien ermöglicht wird. Aus methodischer Sicht bietet die Arbeit durch die methodische Kombination von systemdynamischer Simulation und PROMETHEE, erstmalig die Möglichkeit einer kontinuierlichen und dynamischen Bewertung der Produktionsstrategien über den gesamten Planungszeitraum hinweg, um so eine Produktionsstrategie auf quantitativer Basis auszuwählen. Mit Blick auf die Forschung zur strategischen Produktionsplanung in jungen Märkten liefert die Arbeit ein generisches Konzept für eine Planungsmethodik, die den speziellen Gegebenheiten und Anforderungen junger Märkte gerecht wird. Insgesamt kann auf Grundlage der entwickelten Methodik und des Entscheidungsunterstützungssystems die Rationalität bei der Entscheidung für eine Produktionsstrategie in jungen Märkten nachweislich am Beispiel des Marktes für LiB, deutlich gesteigert und die Entscheidungsqualität somit erheblich verbessert werden.

Literaturverzeichnis

Abele, E. (2006): Handbuch globale Produktion. München [u.a.]: Hanser.

Abernathy, W.; Utterback, J. (1975): A dynamic model of process and product innovation. In: *Cambridge, MA : Center for Policy Alternatives at the Massachusetts Institute of Technology*.

Adam, D. (1996): Planung und Entscheidung: Modelle - Ziele - Methoden. Mit Fallstudien und Lösungen: Gabler Verlag.

Aldinger, L. (2009): Methode zur strategischen Leistungsplanung in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen des Mittelstandes. Universität Stuttgart, Holzgartenstr. 16, 70174 Stuttgart.

Alter, R. (2011): Strategisches Controlling. Unterstützung des strategischen Managements. München: Oldenbourg.

Anderman, M. (2013): Assessing the Future of Hybrid and Electric Vehicles. The xEV Industry Insider Report. Second Edition. Advanced Automotive Batteries (AAB). Oregon House/California, USA.

Anderman, M.; Kalhammer, F.; Macarthur, D. (2000): Advanced Batteries for Electric Vehicles: An Assessment of Performance, Cost and Availability.

Andruleit, H.; Bahr, A.; Babies, H. G.; Hesse, B.; Meßner, J.; Rebscher, D. et al. (2014): Energiestudie 2014. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen (18). Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

ANL (Hg.) (2012): Modeling the Cost and Performance of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles. Final Report. Argonne National Laboratory (ANL). Chicago, USA.

Argote, L.; Epple, D. (1990): Learnig Curves in Manufacturing. In: *Science* 247, S. 920–924.

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R. (2006): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 11., überarb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch).

Baetge, J. (1974): Betriebswirtschaftliche Systemtheorie. Regelungstheoretische Planungs-Überwachungsmodelle für Produktion, Lagerung und Absatz. Opladen: Westdt. Verl. (Moderne Lehrtexte / Wirtschaftswissenschaften, 7).

Bamberg, G.; Coenenberg, A. G. (2006): Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. 13., überarb. Aufl. München: Vahlen (WiSo-Kurzlehrbücher : Reihe Betriebswirtschaft).

Barlas, Y. (1996): Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. In: *Syst. Dyn. Rev.* 12 (3), S. 183–210.

Bass, F. M. (1969): A new-product growth model for consumer durables. In: *Management Science* 15 (5), S. 215–227.

Bea, F. X.; Haas, J. (2013): *Strategisches Management*. 6., vollst. überarb. Aufl. Konstanz, [u.a.], Stuttgart: UVK; Lucius (UTB, 8498 : Betriebswirtschaftslehre).

Behrens, K. C. (1971): *Allgemeine Standortbestimmungslehre*. 2. Aufl. Opladen: Westdt. Verl. (Uni-Taschenbücher, 27).

Belkin, V. (2011): *Multikriterielles Controlling von Geschäftsprozessen. Prozessverbesserung mit Hilfe der dynamischen Simulation*. Univ., (Campus Essen), Diss.--Duisburg-Essen, 2011. 1. Aufl. Lohmar: Eul.

Belton, V.; Stewart, T. J. (2002): *Multiple criteria decision analysis. An integrated approach*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Bernstein, L.; Pachauri, R. K.; Reisinger, A. (2008): *Climate change 2007. Synthesis report*. Geneva, Switzerland: IPCC.

Betge, P. (1996): *Kapazität und Beschäftigung*. In: W. Kern, H.-H. Schröder und J. Weber (Hg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. 2., völlig neu gestaltete Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag (Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre, Bd. 7).

Bianchi, C. (2002): *Introducing SD modelling into planning and control systems to manage SMEs' growth: a learning-oriented perspective*. In: *Syst. Dyn. Rev.* 18 (3), S. 315–338. DOI: 10.1002/sdr.258.

Biere, D.; Dallinger, D.; Wietschel, M. (2009): *Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen*. In: *ZS Energ. Wirtsch.* 33 (2), S. 173–181. DOI: 10.1007/s12398-009-0020-2.

Bleicher, K. (1999): *Das Konzept integriertes Management. Visionen - Missionen - Programme*. 5., rev. und erw. Aufl. Frankfurt [u.a.]: Campus-Verl (St. Galler Management-Konzept, Bd. 1).

BMW AG (Hg.) (2014): *Der neue BMWi 8. Preisliste*.

Bossel, H. (1992): *Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Bossel, H. (2004): *Systeme, Dynamik, Simulation: Books on Demand*.

- Braess, H.-H. (2013): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 7., aktual. Aufl. 2013. Hg. v. Ulrich Seiffert. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink : Bücher).
- Brans, J. P.; Macharis, C.; Kunsch, P. L.; Chevalier, A.; Schwaninger, M. (1998): Combining multicriteria decision aid and system dynamics for the control of socio-economic processes. An iterative real-time procedure. In: *European Journal of Operational Research* 109 (2), S. 428–441. DOI: 10.1016/S0377-2217(98)00068-X.
- Brans, J. P.; Mareschal, B. (2005): PROMETHEE Methods. In: J. Figueira, S. Greco und M. Ehrgott (Hg.): Multiple criteria decision analysis. State of the art surveys. New York: Springer (International series in operations research and management science, 78), S. 163–195.
- Brans, J. P.; Vincke, Ph.; Mareschal, B. (1986): How to select and how to rank projects: The Promethee method. In: *European Journal of Operational Research* 24 (2), S. 228–238. DOI: 10.1016/0377-2217(86)90044-5.
- Brodd, R. J.; Helou, C. (2013): Cost comparison of producing high-performance Li-ion batteries in the U.S. and in China. In: *Journal of Power Sources* 231, S. 293–300. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.12.048.
- Bunz, A. (1988): Strategieunterstützungsmodelle für Montageplanungen. System Dynamics-Modelle zur Analyse und Gestaltung der Flexibilität von Montagesystemen. Frankfurt am Main, New York: P. Lang (Schriften zur Unternehmensplanung, Bd. 11).
- Buss, C. (2010): Identifizierung übernahmegeeigneter Unternehmen. Ansätze zur Erkennung von Optimierungs- und Synergiepotenzialen. Frankfurt am Main: Peter Lang (Europäische Hochschulschriften. Reihe V, Volks- und Betriebswirtschaft, Bd. 3355).
- Chauvel, A. (2003): Manual of process economic evaluation. New, rev. and expanded ed. Paris: Editions Technip (Institut français du pétrole publications).
- Chen, S.-J.; Hwang, Ch.-L. (1992): Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods. In: *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making*, Bd. 375: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems), S. 289–486. Climate Change Secretariat (2007): *Uniting on climate. A guide to the Climate Change Convention and the Kyoto Protocol*. Bonn: UNFCCC.
- Cluzel, C.; Douglas, C. (2012): Cost and Performance of EV batteries. Final report for the Committee on Climate Change. Hg. v. Element Energy Limited. Cambridge, UK.
- Corsten, H. (Hg.) (1994): *Handbuch Produktionsmanagement. Strategie - Führung - Technologie - Schnittstellen*. Wiesbaden: Gabler.

Corsten, H. (2007): Produktionswirtschaft. Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. 11., vollst. überarb. Aufl. München u.a.: Oldenbourg (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre).

Coyle, R. G. (1996): System dynamics modelling. A practical approach. London: Chapman & Hall.

Daniel, C. (2008): Materials and processing for lithium-ion batteries. In: *JOM* 60 (9), S. 43–48. DOI: 10.1007/s11837-008-0116-x.

Dörner, D. (2008): Die Logik des Misslingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. Erw. Neuausg., 7. Aufl. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt-Taschenbuch-Verl. (rororo Science, 61578).

Dörrer, T. (2000): Wissensbasierte Evaluierung zukünftiger Produktionsstrategien. Als Ms. gedr. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, 1).

Dyckhoff, H. (1998): Grundzüge der Produktionswirtschaft. Einführung in die Theorie betrieblicher Wertschöpfung. Zweite, neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).

Dyckhoff, H.; Spengler, T. S. (2010): Produktionswirtschaft. Eine Einführung. 3., überarb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).

Eisenführ, F.; Weber, M. (2003): Rationales Entscheiden: Springer.

EK (Hg.) (2011): Weißbuch. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum. Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. Europäische Kommission. Brüssel (KOM(2011) 144 endgültig), zuletzt geprüft am 15.01.2015.

EK (Hg.) (2012): Road transport: Reducing CO2 emissions from vehicles. Europäische Kommission. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/index_en.htm, zuletzt geprüft am 16.01.2015.

Ernst, C.-S.; Harter, C.; Olschewski, I.; Eckstein, L. (2014): CO2-Emissionsreduktion bei Pkw und LNF nach 2020. Hg. v. Institut für Karftfahrzeuge. Aachen, zuletzt geprüft am 02.02.2015.

EU (Hg.) (2007): Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge. Europäische Union. Brüssel.

- EU (Hg.) (2009): Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emission von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Europäische Union. Brüssel.
- Fan, C.; Friedrichsen, N.; Gnann, T.; Hüttemann, P.; Sauer, A.; Thielmann, A.; Wietschel, M. (2013): Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR). Länderbericht. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.
- Figueira, José Rui; Greco, Salvatore; Roy, Bernard; Słowiński, Roman (2013): An Overview of ELECTRE Methods and their Recent Extensions. In: *J. Multi-Crit. Decis. Anal.* 20 (1-2), S. 61–85. DOI: 10.1002/mcda.1482.
- finanzen.net (Hg.) (2015): Ölpreis (WTI). finanzen.net GmbH. Online verfügbar unter <http://www.finanzen.net/rohstoffe/oelpreis@brent/Chart>, zuletzt geprüft am 20.01.2015.
- Fischer, M.; Himme, A.; Albers, S. (2007): Pionier, früher Folger oder später Folger. Welche Strategie verspricht den größten Erfolg? In: *Journal of business economics : JBE* 77 (5, (5)), S. 539–573.
- Flehtner, H.-J. (1966): Grundbegriffe der Kybernetik. Eine Einführung. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- Forrester, J. W. (1961): *Industrial dynamics*. [Cambridge, Mass.: M.I.T. Press.
- Forrester, J. W. (1968): *Industrial dynamics*. [Cambridge, Mass.: M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology.
- Forrester, J. W. (1972): *Grundzüge einer Systemtheorie. Principles of systems*. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag.
- Forrester, J. W.; Senge, P. M. (1996): Tests for building confidence in system dynamics models. In: *Modelling for management: simulation in support of systems thinking 2*, S. 414–434.
- Foschiani, S. (1995): *Strategisches Produktionsmanagement. Ein Modellsystem zur Unterstützung produktionsstrategischer Entscheidungen*. Univ., Diss.--Stuttgart, 1994. Frankfurt am Main: Lang (Schriften zur Unternehmensplanung, 31).
- Freitag, M. (2014): Daimler will Batteriezellenproduktion stoppen. In: *manager magazin online*, 2014. Online verfügbar unter <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/daimler-will-batteriezellenproduktion-stoppen-a-970641.html>, zuletzt geprüft am 14.06.2015.

- Friel, D. (2010): Management of Batteries for Electric Traction Vehicles. In: G. Pistoia (Hg.): Electric and hybrid vehicles. Power sources, models, sustainability, infrastructure and the market. 1st ed. Amsterdam, Boston: Elsevier, S. 493–515.
- Friel, D. (2014): Electronic Options for Lithium Ion Batteries. In: G. Pistoia (Hg.): Lithium-ion batteries. Advances and applications. Amsterdam: Elsevier, S. 362–385.
- Fröhling, M. (2006): Zur taktisch-operativen Planung stoffstrombasierter Produktionssysteme. Dargestellt an Beispielen aus der stoffumwandelnden Industrie. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. (Wirtschaftswissenschaft).
- Gaines, L. (2014): The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. In: *Sustainable Materials and Technologies* 1-2, S. 2–7. DOI: 10.1016/j.susmat.2014.10.001.
- Gaines, L.; Cuenca, R. (2000): Costs of lithium-ion batteries for vehicles. Hg. v. Argonne National Laboratory (ANL). Argonne, USA.
- Gälweiler, A.; Schwaninger, M. (2005): Strategische Unternehmensführung. 3. Aufl. Frankfurt/Main, New York: Campus-Verl. (Strategie).
- Gardiner, P.; Ford, A. (1980): Which Policy Run is best and who says so? In: *TIMS Studies in the management sciences*, Bd. 14, S. 241–257.
- Geldermann, J. (2006): Mehrzielentscheidungen in der industriellen Produktion. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe.
- Gilbert, D.; Behnam, M. (2009): Strategy process management in multinational companies: status quo, deficits and future perspectives. In: *Problems and Perspectives in Management*, Bd. 7, S. 59–74. Online verfügbar unter
- Gluchowski, Peter; Dittmar, Carsten; Gabriel, Roland (2008): Management Support Systeme und Business Intelligence. Computergestützte Informationssysteme für Fach- und Führungskräfte. 2., vollst. überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg:
- Gomez, J.; Jochem, P.; Fichtner, W. (2013): EV market development pathways—An application of System Dynamics for policy simulation. In: *Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 2013.
- Gomez, P.; Probst, G. J. B. (Hg.) (1989): Vernetztes Denken. Unternehmen ganzheitlich führen. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Götze, U. (1993): Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. 2., aktualis. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Univ.-Verl. (DUV: Wirtschaftswissenschaft).

- Götze, U. (2008): Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 6., durchgesehene und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- Griebel, C-O; Rabenstein, F.; Klüting, M.; Kessler, F. (2011): The Full-Hybrid Powertrain of the new BMW ActiveHybrid 5. In: 20. Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2011. Aachen.
- Größler, A. (2008): Modelltests. In: J. Strohhecker (Hg.): System Dynamics für die Finanzindustrie. Simulieren und analysieren dynamisch-komplexer Probleme. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Frankfurt-School-Verl, S. 253–269.
- Grunwald, A. (2010): Technikfolgenabschätzung - eine Einführung. 2., grundlegend überarb. u. wesentlich erw. Aufl. Berlin: Ed. Sigma (Gesellschaft - Technik - Umwelt, n.F., 1).
- Guitouni, A.; Martel, J.-M. (1998): Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. In: *European Journal of Operational Research* 109 (2), S. 501–521. DOI: 10.1016/S0377-2217(98)00073-3.
- Hader, S. (2001): Ein hybrider Ansatz zur Optimierung technischer Systeme. Techn. Univ., Diss.--Chemnitz, 2001. Aachen: Shaker (Berichte aus der Informatik).
- Hagedorn, A. (1994): Modellgestützte Planung und Kontrolle von Produktionsstandorten. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. (DUV : Wirtschaftswissenschaft).
- Hahn, D.; Taylor, B. (2006): Strategische Unternehmensplanung - Strategische Unternehmensführung. Stand und Entwicklungstendenzen. 9., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Hamann, Tilo (2008): Lernfähige intelligente Produktionsregelung. Berlin: GITO-Verl. (Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik, 7).
- Hammer, R. (2009): Planung und Führung. 8., vollst. überarb. Aufl. München: Oldenbourg, R (Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Hanssmann, Friedrich (1993): Einführung in die Systemforschung. Methodik der modellgestützten Entscheidungsvorbereitung. 4., unwesentlich veränd. Aufl. München: Oldenbourg.
- Hanssmann, K.-W. (1974): Entscheidungsmodelle zur Standortplanung der Industrieunternehmen. Wiesbaden: Th. Gabler (Schriftenreihe des Instituts für Unternehmensforschung und des Industrieseminars der Universität Hamburg, Bd. 7).

Harrigan, K. R. (1983): *Strategies for vertical integration*. Lexington, Mass.: Lexington Books.

Harrigan, K. R. (1986): Matching vertical integration strategies to competitive conditions. In: *Strat. Mgmt. J.* 7 (6), S. 535–555. DOI: 10.1002/smj.4250070605.

Harrop, P.; Das, R. (2010): *Car Traction Batteries. the New Gold Rush 2010-2020*. Hg. v. IDTechEx Ltd. Cambridge, UK.

Hay Group (Hg.) (2013): *Fluktuation weltweit 2013 und 2018*. Online verfügbar unter <http://www.haygroup.com/downloads/de/Tabelle%20-%20Fluktuation%20weltweit%202013%20und%202018.pdf>, zuletzt geprüft am 09.02.2015.

Hayes, R. H.; Wheelwright, S. C. (1984): *Restoring our competitive edge. Competing through manufacturing*. New York: Wiley.

Hecking, M. (2014): *Comeback der Finnen. Nokia versucht Neustart im Smartphone-Geschäft*. In: *manager magazin online*, 2014. Online verfügbar unter <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/it/nokia-versucht-neustart-im-smartphone-geschaeft-a-1029567-druck.html>, zuletzt geprüft am 06.05.2015.

Heimes, H. (2014): *Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen in der Batterieproduktion*. 1. Aufl. Aachen: Apprimus Verlag (Edition Wissenschaft - Apprimus, Bd. 2014,41).

Heinen, E. (1991): *Industriebetriebslehre. Entscheidungen im Industriebetrieb*. 9., vollst. neu bearb. u erw. Aufl. Wiesbaden: Gabler.

Hellgren, J. (2007): Life cycle cost analysis of a car, a city bus and an intercity bus power-train for year 2005 and 2020. In: *Energy Policy* 35 (1), S. 39–49. DOI: 10.1016/j.enpol.2005.10.004.

Henrich, P. (2002): *Strategische Gestaltung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie*. Univ., Diss.--Augsburg, 2002. Aachen: Shaker (Berichte aus der Betriebswirtschaft).

Hering, E.; Hermann, A.; Kronmüller, E. (1989): *Unternehmenssimulation mit dem PC*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Hettesheimer, T. (2013): *Future Trends of the automotive Li-Ion Battery Supply Chain in Germany*. System Dynamics Society. Cambridge, Mass., USA, 2013.

Hettesheimer, T. (2014): *Strategische Planung der Produktion von Li-Ionen-Batterien*. Deutsche Gesellschaft für System Dynamics. Karlsruhe, 2014.

- Hettesheimer, T.; Hummen, T.; Marscheider-Weidemann, F.; Schröter, M.; Lerch, C.; Stahlberger, M.; Heussler, A. (2013): Energiespeicher Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR). Produktion und Ökobilanzierung. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.
- Hettesheimer, T.; Lerch, C. (2014): Future Trends of the automotive Li-Ion Battery Supply Chain in Germany – Dynamic effects on raw materials and employment. In: 31st international conference of the System Dynamics Society 2013. Cambridge, Massachusetts, USA, 21 - 25 July 2013. Red Hook, NY: Curran, S. 1392–1420.
- Hidalgo, J. (2014): Tesla details employment, investment plans for gigafactory. Hg. v. Reno Gazette-Journal. Online verfügbar unter <http://www.rgj.com/story/news/2014/10/22/tesla-submits-gigafactory-incentives-application-technobubble/17751341/>, zuletzt geprüft am 01.08.2014.
- Hinterhuber, H. H. (2014): Wettbewerbsstrategie. 2. Aufl. Berlin: De Gruyter.
- Hirzel, S. (2015): Analyse und Bewertung industrieller Energieeffizienzmaßnahmen. Ein multikriterieller Ansatz für Gruppenentscheidungen unter Unsicherheit dargestellt am Beispiel von Druckluftsystemen. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 2014. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 15, Umwelttechnik, 257).
- Hoenderdaal, S.; Tercero Espinoza, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Graus, W. (2013): Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? In: *Energy* 49, S. 344–355. DOI: 10.1016/j.energy.2012.10.043.
- Höft, U. (1992): Lebenszykluskonzepte. Grundlage für das strategische Marketing- und Technologiemanagement. Freie Univ., Diss.--Berlin. Berlin: E. Schmidt (Technological economics, 46).
- Hoitsch, H.-J. (1993): Produktionswirtschaft. Grundlagen einer industriellen Betriebswirtschaftslehre. 2., völlig überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Holweg, M.; Pil, F. K. (2004): The second century. Reconnecting customer and value chain through build-to-order : moving beyond mass and lean production in the auto industry. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Homburg, C. (2012): Quantitative Betriebswirtschaftslehre. Entscheidungsunterstützung durch Modelle. Mit Beispielen, Übungsaufgaben und Lösungen. 3., überarb. Aufl. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler.
- Hoyer, C. (2015): Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Høyer, K. G. (2008): The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. In: *Utilities Policy* 16 (2), S. 63–71. DOI: 10.1016/j.jup.2007.11.001.

Hummel, B. (1997): Internationale Standortentscheidung. Einflußfaktoren, informativische Fundierung und Unterstützung durch computergestützte Informationssysteme. Freiburg i. Br.: Haufe (Schriftenreihe des Instituts für Allgemeine Wirtschaftsforschung der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br, 57).

Hungenberg, H. (2008): Strategisches Management in Unternehmen. Ziele - Prozesse - Verfahren. 5., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Gabler (Lehrbuch).

Huth, C. (2014): Strategische Planung der Fertigungstiefe bei Unsicherheit und Dynamik. Ein simulationsbasierter Ansatz am Beispiel der Fertigung von Traktionsbatterien. Wiesbaden: Springer Gabler (SpringerLink : Bücher).

Hüttl, R. F.; Pischetsrieder, B.; Spath, D. (2010): Elektromobilität. Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen. Berlin, New York: Springer (Acatech Diskutiert).

Hüttner, M. (1986): Prognoseverfahren und ihre Anwendung. Berlin [u.a.]: De Gruyter.

Hwang, Ching-Lai; Yoon, Kwangsun (1981): Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications A State-of-the-Art Survey. Berlin, Heidelberg: Springer (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 186).

IEA (Hg.) (2012): World energy outlook special report 2012. Paris, France (World energy outlook special report).

IKA (2012): CO2 reduction potential for passenger cars until 2020. Management summary. Hg. v. Institut für Karftfahrzeuge. RWTH Aachen. Aachen, zuletzt geprüft am 28.01.2015.

Irle, C. (2011): Rationalität von Make-or-buy-Entscheidungen in der Produktion. WHU - Otto Beisheim School of Management, Diss.--Vallendar, 2011. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden (Schriften des Center for Controlling & Management (CCM), 42).

Jochem, P.; Kaschub, T.; Fichtner, W. (2014): How to Integrate Electric Vehicles in the Future Energy System? In: M. Hülsmann und D. Fornahl (Hg.): Evolutionary Paths Towards the Mobility Patterns of the Future: Springer Berlin Heidelberg (Lecture notes in mobility), S. 243–263.

Jochem, P.; Poganietz, W.-R.; Grunwald, A.; Fichtner, W. (Hg.) (2013): Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen. Tagungsbandbeiträge vom 08. und 09. März 2012 am KIT. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

Jung, P. (1988): Produktionsstrategie in neuen Märkten. Gestaltung der Produktion mit Hilfe der Lern- und Mengeneffekte. Zürich: Verl. Industrielle Organisation.

Kalhammer, F.; Kopf, B.; Swan, D.; Roan, V.; Walsh, M., Michael P. (2007): Status and prospects for zero emissions vehicle technology. Report of the ARB Independent Expert Panel 2007 (1). Online verfügbar unter http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevreview/zev_panel_report.pdf, zuletzt geprüft am 15.05.2015.

Kaluza, B. (1994): Rahmenentscheidungen zu Kapazität und Flexibilität produktionswirtschaftlicher Systeme. In: H. Corsten (Hg.): Handbuch Produktionsmanagement. Strategie - Führung - Technologie - Schnittstellen. Wiesbaden: Gabler.

Kamlage, K.; Hildebrandt, L. (2001): Erfolgreiche Markteintrittsstrategien im Konsumgüterbereich. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. (Gabler-Edition Wissenschaft).

Kampker, A. (2014): Elektromobilproduktion. Dordrecht: Springer.

Kampker, A.; Deutskens, C.; Heimes, H.; Nowacki, C.; Maiser, E.; Michaelis, S. (2012): Der Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Folienzelle. Hg. v. RWTH Aachen und VDMA Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbauer. Frankfurt am Main.

Kemnitz, G. (2011): Technische Informatik. Berlin [u.a.]: Springer.

Kern, W. (1992): Industrielle Produktionswirtschaft. 5., durchges. und aktualisierte Aufl. Stuttgart: Poeschel (Sammlung Poeschel, 5).

Ketterer, B.; Karl, U.; Möst, D.; Ulrich, S. (2009): Lithium-Ionen Batterien. Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. Karlsruhe, zuletzt geprüft am 11.02.2015.

Keyser, W. d.; Peeters, P. (1996): A note on the use of PROMETHEE multicriteria methods. In: *European Journal of Operational Research* 89 (3), S. 457–461.

Kieckhäfer, K. (2013): Marktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios: Dargestellt am Beispiel innovativer Antriebe in der Automobilindustrie. s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=515812>.

Kiehne, H.-A. (2000): Batterien. Grundlagen und Theorie, aktueller technischer Stand und Entwicklungstendenzen ; mit 51 Tabellen. 4., völlig Neubearb. Aufl. Renningen: Expert-Verl. (Kontakt & Studium, Bd. 57).

Kiener, S. (2009): Produktions-Management. Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. 9., verb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg.

Kinkel, S. (2004): Erfolgsfaktor Standortplanung. In- und ausländische Standorte richtig bewerten ; mit 40 Tabellen. Berlin [u.a.]: Springer.

Kinkel, S.; Zanker, C.; Lay, G.; Maloča, S.; Seydel, P. (2007): Globale Produktionsstrategien in der Automobilzulieferindustrie. Erfolgsmuster und zukunftsorientierte Methoden zur Standortbewertung. Berlin, New York: Springer.

Kirsch, W. (1974): Betriebswirtschaftslehre: Systeme, Entscheidungen, Methoden. Wiesbaden: T. Gabler.

Klein, R.; Scholl, A. (2011): Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse. 2. Aufl. München: Vahlen, Franz (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

Kleine, O. (2013): Planung von Strategien gegen industrielle Produktpiraterie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Produktion und Logistik).

Kleine, O.; Kinkel, S. (2013): Die neuen China-Strategien. In: *Harvard Business Manager* 2013 (2), S. 10–11.

Kley, F. (2011): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens. Stuttgart: Fraunhofer (ISI-Schriftenreihe "Innovationspotentiale").

Kley, F.; Lerch, C.; Dallinger, D. (2011): New business models for electric cars—A holistic approach. In: *Energy Policy* 39 (6), S. 3392–3403. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.03.036.

Kloock, J. (1969): Betriebswirtschaftliche Input-Output-Modelle. Ein Beitrag zur Produktionstheorie. Wiesbaden: Gabler Verlag (Betriebswirtschaftliche Beiträge, 12).

Kollamthodi, S. (2014): Evaluation of Regulations 443/2009 and 510/2011 on the reduction of CO₂emissions from light-duty vehicles. Ricardo-AEA. Brüssel, 2014.

Krallmann, H.; Rieger, B. (2001): Entscheidungsunterstützendes System (EUS. In: P. Mertens und A. Back (Hg.): Lexikon der Wirtschaftsinformatik. 4., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, S. 186–187.

Kühn, A.; Novinsky, P.; Schade, W. (2014a): GLOMO - Global Mobility Model. Beschreibung und Ergebnisse. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Working paper sustainability and innovation, 2014, No. 13).

Kühn, A.; Novinsky, P.; Schade, W. (2014b): GLOMO - Global Mobility Model: Beschreibung und Ergebnisse: Fraunhofer ISI.

- Kunath, O. (2009): Systemdynamische Werttreiberplanung. Strategische Erfolgsfaktoren, finanzielle Werttreiber und System Dynamics. Hamburg: Kovač (Schriftenreihe Schriften zum betrieblichen Rechnungswesen und Controlling, Bd. 77).
- Kwade, A.; Bärwaldt, G. (2012): LithoRec. Recycling von Lithium-Ionen-Batterien : Abschlussbericht des Verbundprojektes ; Laufzeit des Vorhabens: 01. September 2009 - 30. September 2011 ; gemeinsamer Abschlussbericht. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier.
- Lache, R.; Galves, D.; Nolan, P. (2010): Vehicle Electrification. More rapid growth; steeper price declines for batteries. Hg. v. Deutsche Bank. Online verfügbar unter http://gm-volt.com/files/DB_EV_Growth.pdf, zuletzt geprüft am 02.12.2014.
- Laux, H.; Gillenkirch, R.; Schenk-Mathes, Heike (2012): Entscheidungstheorie. 8. Aufl.. Korrr. Nachdruck. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- Law, A. M.; Kelton, W. D. (2000): Simulation modeling and analysis: McGraw-Hill.
- Le Téo, J. F.; Mareschal, B. (1998): An interval version of PROMETHEE for the comparison of building products' design with ill-defined data on environmental quality. In: *European Journal of Operational Research* 109 (2), S. 522–529. DOI: 10.1016/S0377-2217(98)00074-5.
- Lerch, C. (2015): Interaktion von Produkt- und Dienstleistungsinnovationen. Eine Analyse der Wechselwirkungen in Industrieunternehmen. Wiesbaden: Gabler (SpringerLink : Bücher).
- Levitt, T. (1965): Exploit the product life cycle. In: *Harvard business review* 1965, 1965 (Vol. 43, No. 6), S. 81–94.
- Levitt, T. (1985): Exploit the product life cycle. Boston, Mass.: Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- Liehr, M. (2004): Komponentenbasierte Systemmodellierung und Systemanalyse. Erweiterung des System-Dynamics-Ansatzes zur Nutzung im strategischen Management. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Little, J. (1961): A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. In: *Operations Research* 9 (3), S. 383–387.
- Macharis, C. (2000): Hybrid Modeling: System Dynamics combined with Multi-criteria Analysis. In: System Dynamics Conference Bergen Noorwegen.
- Macharis, C.; Brans, J. P.; Mareschal, B. (1998): The GDSS PROMETHEE procedure: a PROMETHEE-GAIA based procedure for group decision support. In: *Journal of Decision Systems* 1998 (7), S. 283–307.

- Mag, W. (1999): Planung und Kontrolle. In: *Vahlens Kompendium der Betriebswirtschaftslehre 2*, S. 4.
- Maiser, E.; Michaelis, S.; Müller, D.; Kampker, A.; Deuskens, C.; Heimes, H. et al. (2014): Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Hg. v. VDMA Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbauer. Frankfurt am Main.
- March, J. G.; Simon, H. A.; Guetzkow, H. (1994): Organizations. 2. ed., reprinted (twice). Cambridge, Mass.: Blackwell.
- MarkLines (2014): Automotive Industry Portal. Hg. v. Ltd MarkLines Co. Online verfügbar unter <http://www.marklines.com/en/>.
- März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (2011): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch, 130).
- McKinsey & Company Inc (Hg.) (2011): Boost! Transforming the powertrain value chain – a portfolio challenge.
- Meffert, H. (1988): Strategische Unternehmensführung und Marketing. Beiträge zur Marktorientierten Unternehmenspolitik. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Meffert, H. (1998): Marketing-Management. Analyse - Strategie - Implementierung. Nachdr. Wiesbaden: Gabler (Meffert-Marketing-Edition).
- Meyer, G. (2009): Analyse und technisch-ökonomische Bewertung von Gesetzesfolgen im Individualverkehr. Dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie Japans und Deutschlands. Braunschweig. O
- Mikus, B. (1998): Make-or-buy-Entscheidungen in der Produktion. Führungsprozesse - Risikomanagement - Modellanalysen. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. [u.a.] (Gabler-Edition Wissenschaft).
- Milling, P. (1981): Systemtheoretische Grundlagen zur Planung der Unternehmenspolitik. Berlin: Duncker & Humblot (Abhandlungen aus dem Industrieseminar der Universität Mannheim, Heft 31).
- Milling, P. (1984): Leitmotive des System-Dynamics-Ansatzes. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium : WiSt ; Zeitschrift für Studium und Forschung* 13 (10), S. 507–513.
- Milling, P. (1987): Quantifizierungs- und Validierungsprobleme bei Entscheidungs-Unterstützungs-Modellen. In: J. Biethahn und B. Schmidt (Hg.): Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. Methoden, Werkzeuge, Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer (Fachberichte Simulation, 6), S. 39–51.

- Milling, P. (2001): Kybernetische Überlegungen beim Entscheiden in komplexen Systemen. Mannheim: Univ., Fak. für Betriebswirtschaftslehre.
- Minderlein, M. (1989): Markteintrittsbarrieren und Unternehmensstrategie. Industrieökonomische Ansätze und eine Fallstudie zum Personal Computer-Markt. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag.
- Minderlein, M. (1990): Markteintrittsbarrieren und strategische Verhaltensweisen. In: *Journal of business economics : JBE* (60), S. 155–178.
- Mock, P. (2010): Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Stuttgart.
- Mock, P. (2013): Reducing CO₂ and fuel consumption from new cars: Assessing the near-term technology potential in the EU. Hg. v. ICCT. International Council on Clean Transportation.
- Morecroft, J. D. W. (1984): Strategy support models. In: *Strat. Mgmt. J.* 5 (3), S. 215–229. DOI: 10.1002/smj.4250050303.
- Mostert, C. H. (2007): Fabrik-Umfeld Simulationsmodell zur kennzahlenbasierten Bewertung von Produktionsstrategien. Univ., Diss--Kassel, 2007. Kassel: Kassel Univ. Press (Produktion & Energie, 2).
- Mussnig, W. (2001): Dynamisches Target Costing. Von der statischen Betrachtung zum strategischen Management der Kosten. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag (Neue betriebswirtschaftliche Forschung, 274).
- Neemann, C. W. (2007): Methodik zum Schutz gegen Produktimitationen. Aachen: Shaker (Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 2007,13).
- Nelson, P. A.; Gallager, K. G.; Bloom, K. G.; I Dees, D. W. (2011): Modeling the performance and cost of lithium-ion batteries for electric-drive vehicles.
- Neuner, C. (2009): Konfiguration internationaler Produktionsnetzwerke unter Berücksichtigung von Unsicherheit. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden (Gabler research Schriften zum europäischen Management).
- Nieschlag, R.; Dichtl, E.; Hörschgen, H. (1997): Marketing. 18., durchges. Aufl. Berlin: Duncker & Humblot.
- Nitzsch, R. v. (1992): Entscheidung bei Zielkonflikten. Ein PC-gestütztes Verfahren. Wiesbaden: Gabler Verlag (Neue betriebswirtschaftliche Forschung, 95).

NPE (2010a): Zwischenbericht der AG 6. Ausbildung und Qualifizierung. Hg. v. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO). Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/zwischenbericht-ag6>, zuletzt geprüft am 12.06.2015.

NPE (Hg.) (2010b): Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Nationale Plattform Elektromobilität (NPE). Berlin.

Oberschmidt, J. (2010): Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale).

OICA (Hg.) (2014): New PC registrations or sales. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. Online verfügbar unter <http://www.oica.net/category/sales-statistics/sales-statistics-2005-2013/>, zuletzt geprüft am 28.01.2015.

Olhager, J.; Rudberg, M.; Wikner, J. (2001): Long-term capacity management: Linking the perspectives from manufacturing strategy and sales and operations planning. In: *International journal of production economics* 69 (2).

Pastorello, Cinzia; Mellios, Giorgos (2014): Monitoring CO2 emissions from passenger cars and vans in 2013. Luxembourg: Publications Office (EEA Technical report, 19/2014).

Patry, G.; Romagny, A.; Martinet, S.; Froelich, D. (2015): Cost modeling of lithium-ion battery cells for automotive applications. In: *Energy Sci Eng* 3 (1), S. 71–82. DOI: 10.1002/ese3.47.

Peters, A.; Doll, C.; Kley, F.; Plötz, P.; Sauer, A.; Schade, W. et al. (2013): Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Hg. v. Büro für Technologiefolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). TAB. Berlin (TAB-Arbeitsbericht, 153), zuletzt geprüft am 16.12.2014.

Peters, M.; Timmerhaus, K.; West, R. (2003): Plant Design and Economics for Chemical Engineers: McGraw-Hill Education.

Peters, A., Hoffmann, J. (2011): Nutzerakzeptanz von Elektromobilität: Eine empirische Studie zu attraktiven Nutzungsvarianten. Fahrzeugkonzepten und Geschäftsmodellen aus Sicht potenzieller Nutzer. Hg. v. Fraunhofer ISI. Karlsruhe, zuletzt geprüft am 16.01.2015.

Pfahl, S. (2013): Alternative Antriebskonzepte: Stand der Technik und Perspektiven – Die Sicht der Automobilindustrie. In: P. Jochem, W.-R. Poganietz, A. Grunwald und W. Fichtner (Hg.): Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen. Tagungsbandbeiträge vom 08. und 09. März 2012 am KIT. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

- Pfohl, H.-C.; Stölzle, W. (1997): Planung und Kontrolle. Konzeption, Gestaltung, Implementierung. 2. neu bearb. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Picot, A. (1981): Strukturwandel und Unternehmensstrategie Teil 2. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium* (12), S. 563–571.
- Picot, A. (1982): Transaktionskostenansatz in der Organisationstheorie. Stand der Diskussion und Aussagewert (42).
- Pillot, C. (2013): The worldwide rechargeable Battery Market 2012-2025 (22nd Edition). Hg. v. avicenne Energy. Puteaux Cedex, Frankreich.
- Pistoia, G. (Hg.) (2014): Lithium-ion batteries. Advances and applications. Amsterdam: Elsevier.
- Porcher, W.; Lestriez, B.; Jouanneau, S.; Guyomard, D. (2010): Optimizing the surfactant for the aqueous processing of LiFePO₄ composite electrodes. In: *Journal of Power Sources* 195 (9), S. 2835–2843. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.088.
- Porter, M. E. (2013): Wettbewerbsstrategie. Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten. 12., erweiterte und aktualisierte Auflage. Frankfurt am Main: Campus.
- Pruyt, E. (2006): System dynamics and decision-making in the context of dynamically complex multi-dimensional societal issues (Proceedings of the 2006 Conference of the System Dynamics Society).
- Pruyt, E. (2007): Dealing with uncertainties? combining system dynamics with multiple criteria decision analysis or with exploratory modelling (Proceedings of the 25th International Conference of the System Dynamics Society).
- Ramadesigan, V.; Northrop, P. W. C.; De, S.; Santhanagopalan, S.; Braatz, R. D.; Subramanian, V. R. (2012): Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective. In: *Journal of the Electrochemical Society* 159 (3), S. R31-R45. DOI: 10.1149/2.018203jes.
- Reagan-Cirincione, P.; Schuman, S.; Richardson, G. P.; Dorf, S. A. (1991): Decision Modeling: Tools for Strategic Thinking. In: *Interfaces* 21 (6), S. 52–65. DOI: 10.1287/inte.21.6.52.
- Reif, K. (2010): Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden (Bosch Fachinformation Automobil).
- Remmerbach, K.-U. (1988): Markteintrittsentscheidungen. Eine Untersuchung im Rahmen der strategischen Marketingplanung unter besonderer Berücksichtigung des Zeit-

aspektes. Wiesbaden: Gabler (Schriftenreihe Unternehmensführung und Marketing, Bd. 21).

Remmers, J. (1991): Zur Ex-ante-Bestimmung von Investitionen bzw. Kosten für Emissionsminderungstechniken und den Auswirkungen der Datenqualität in meso-skaligen Energie-Umwelt-Modellen.

Rentz, O. (1979): Techno-Ökonomie betrieblicher Emissionsminderungsmaßnahmen. Berlin: Erich Schmidt.

Robert Bosch GmbH (2013): Bosch ends photovoltaics activities. Competitiveness is unattainable. Online verfügbar unter <http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=6195>, zuletzt geprüft am 05.05.2014.

Roland Berger (Hg.) (2011): Powertrain 2020. The Li-Ion Battery Value Chain –Trends and implications. Online verfügbar unter http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_The_Li_Ion_Battery_Value_Chain_20110801.pdf, zuletzt geprüft am 02.12.2014.

Roy, Bernard (1980): Selektieren, Sortieren und Ordnen mit Hilfe von Prävalenzrelationen: Neue Ansätze auf dem Gebiet der Entscheidungshilfe fuer Multikriterien - Probleme. In: *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* 32 (6), S. 465–497.

Roy, Bernard (1991): The outranking approach and the foundations of elective methods. In: *Theor Decis* 31 (1), S. 49–73. DOI: 10.1007/BF00134132.

Russell, R.; Taylor, B. (2000): Operations management. Multimedia version. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.

Saaty, T. L. (1980): The analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation. New York, London: McGraw-Hill International Book Co.

Sakti, A.; Michalek, J. J.; Fuchs, E. R. H.; Whitacre, J. F. (2015): A techno-economic analysis and optimization of Li-ion batteries for light-duty passenger vehicle electrification. In: *Journal of Power Sources* 273, S. 966–980. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.09.078.

Santos, S. P.; Belton, V.; Howick, S. (2002): Adding value to performance measurement by using system dynamics and multicriteria analysis. In: *Int Jnl of Op & Prod Mngemnt* 22 (11), S. 1246–1272. DOI: 10.1108/01443570210450284.

Santos, S. P.; Belton, V.; Howick, S. (2007): Enhanced performance measurement using OR: a case study. In: *J Oper Res Soc* 59 (6), S. 762–775. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602397>.

- Schade, W.; Zanker, C.; Kühn, A.; Hettesheimer, T. (2014): Sieben Herausforderungen für die deutsche Automobilindustrie. Strategische Antworten im Spannungsfeld von Globalisierung, Produkt- und Dienstleistungsinnovationen bis 2030. Unter Mitarbeit von Angela Jäger, Steffen Kinkel und Thomas Schmall. 1. Aufl. Berlin: edition sigma (Studien des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, 40).
- Schierenbeck, H. (2003): Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre. 16., vollst. überarb. und erw. Aufl. München [u.a.]: Oldenbourg.
- Schlick, T.; Hagemann, B.; Maiser, E.; Kramer, M. (2011): Zukunftsfeld Elektromobilität. Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Hg. v. Roland Berger Strategy Consultants und VDMA Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbauer.
- Schneeweiß, C. (1991): Planung. 1 Band. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Scholl, A. (2013): Robuste planung und optimierung. Grundlagenkonzepte und methoden - experimentelle Untersuchungen[S.I.]: Physica Springer.
- Schöneborn, F. (2004): Strategisches Controlling mit System Dynamics. Heidelberg: Physica-Verlag HD (Betriebswirtschaftliche Studien).
- Schröter, M. (2006): Strategisches Ersatzteilmanagement in Closed-Loop Supply Chains. Ein systemdynamischer Ansatz. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. (Gabler-Edition Wissenschaft).
- Schultmann, F. (2003): Stoffstrombasiertes Produktionsmanagement: Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung industrieller Kreislaufwirtschaftssysteme. Erich Schmidt Verlag. Berlin
- Schultmann, F.; Engels, B.; Rentz, O. (2003): Closed-loop supply chains for spent batteries. In: *Interfaces* 33 (6), S. 57–71.
- Schwaninger, M.; Ambroz, K. (2009): Plädoyer für Langfristorientierung. In: J. Strohhecker (Hg.): Strategisches und operatives Produktionsmanagement. Empirie und Simulation. Unter Mitarbeit von Peter Milling. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler (Gabler research), S. 23–46.
- Scott, P. (2013): The new BMW i3. Hg. v. BMW AG.
- Servatius, H.-G. (1985): Methodik des strategischen Technologie-Managements. Grundlage fuer erfolgreiche Innovationen. 2.aufl. Berlin (Technological economics, 13).
- Sieben, G.; Schildbach, T. (1994): Betriebswirtschaftliche Entscheidungstheorie. 4., durchges. Aufl. Düsseldorf: Werner (Wisu-Texte).

Simon, R. (2014): Kostenoptimierung und Ressourceneffizienz in der Batteriefabrik. Berlin, 29.01.2014.

smart (2015a): Der neue smart fortwo. smart. Online verfügbar unter <https://www.smart.com/de/de/index/smart-fortwo-453.html>, zuletzt geprüft am 29.06.2015.

smart (2015b): smart fortwo electric drive. smart. Online verfügbar unter <https://www.smart.com/de/de/index/smart-fortwo-electric-drive.html>, zuletzt geprüft am 29.06.2015.

Spath, D. et al. (2011): Strukturstudie BWE mobil 2011. In: *Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Stuttgart*.

Springael, J.; Kunsch, P. L.; Brans, J.-P. (2002): A multicriteria-based system dynamics modelling of traffic congestion caused by urban commuters. In: *Central European journal of operations research*, S. 81–97.

Springael, J.; Kunsch, P. L.; Brans, Jean-Pierre (2000): A group multicriteria decision aid and system dynamics approach to study the influence of an urban toll and flexible working hours on the congestion problem. In: *Proceedings of the System Dynamics 2000*, Brüssel.

Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer-Verlag.

Stan, C. (2012): *Alternative Antriebe für Automobile. Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger*. 3. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (SpringerLink : Bücher).

Statistisches Bundesamt (Hg.) (2014): *Produzierendes Gewerbe. Beschäftigte, Umsatz und Investitionen der Unternehmen und Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden*. Wiesbaden (Fachserie 4 Reihe 4.2.1).

Sterman, J. D. (1991): A Skeptic's Guide to Computer Models. In: G. O. Barney, W. B. Kreutzer und M. J. Garrett (Hg.): *Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalog*. Boulder: Westview Press, S. 209–229.

Sterman, J. D. (2000): *Buisness dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Irwin/McGraw-Hill.

Sterman, J. D. (2001): System dynamics modeling. In: *California management review* 43 (4), S. 8–25.

Steven, M. (1996): Kapazitätsgestaltung und -optimierung. In: W. Kern, H.-H. Schröder und J. Weber (Hg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. 2., völlig neu gestaltete Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag (Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre, Bd. 7).

Strohhecker, J. (Hg.) (2008): System Dynamics für die Finanzindustrie. Simulieren und analysieren dynamisch-komplexer Probleme. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Frankfurt-School-Verl.

Struben, J.; Sterman, J. (2007): Transition Challenges for Alternative Fuel Vehicle and Transportation Systems. In: *SSRN Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.881800.

Stumpfe, J. (2003): Interdependenzen von Produkt- und Prozessinnovationen in industriellen Unternehmen. Eine System-Dynamics-basierte Analyse. Frankfurt am Main, New York: Lang (Europäische Hochschulschriften. Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft Publications universitaires européennes. Série 5, Sciences économiques, gestion d'entreprise European university studies. Series V, Economics and management, v. 3031).

Sydow, J. (1992): Strategische Netzwerke. Evolution und Organisation. Wiesbaden: Gabler (Neue betriebswirtschaftliche Forschung, 100).

Tesla Motors (Hg.) (2014a): Gigafactory. Online verfügbar unter <https://www.teslamotors.com/blog/gigafactory>, zuletzt geprüft am 01.08.2014.

Tesla Motors (2014b): Tesla Gigafactory. Online verfügbar unter http://www.teslamotors.com/de_DE/gigafactory, zuletzt geprüft am 11.06.2015.

Thielmann, A.; Fan, C.; Friedrichsen, N.; Gnann, T.; Hettesheimer, T.; Hummen, T. et al. (2014): Energiespeicher für die Elektromobilität. Deutschland auf dem Weg zum Leitmarkt und Leitanbieter? Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe, zuletzt geprüft am 15.12.2014.

Thielmann, A.; Sauer, A.; Isenmann, R.; Wietschel, M. (2012): Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.

Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.

Turban, E.; Aronson, J. E.; Bolloju, N. (2001): Decision support systems and intelligent systems. 6. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Ulrich, H.; Probst, G. J. B. (1991): Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln. Ein Brevier für Führungskräfte. 3., erw. Aufl. Bern, Stuttgart: Haupt.

UN (Hg.) (2014): World urbanization prospects, the 2014 revision. Highlights. United Nations.

UNFCCC (Hg.) (1997): Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations Framework Convention on Climate Change. Online verfügbar unter http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/items/1678.php, zuletzt geprüft am 21.01.2015.

VDA (Hg.) (2009): Handeln für den Klimaschutz. CO2 Reduktion in der Automobilindustrie. 2. überarbeitete Auflage. Verband der Automobilindustrie e.V. Frankfurt am Main, zuletzt geprüft am 16.01.2015.

Ventana (Hg.) (2002): Vensim. User's Guide Version 5.

Waldkirch, K. (2009): Erfolgreiches Personalmanagement in China. Rekrutierung, Mitarbeiterführung, Verhandlung. Wiesbaden: Gabler.

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A. (2011): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien, Märkte und Implikationen. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden (SpringerLink : Bücher).

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I. (2009): Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Studium).

Wansart, J. (2012): Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO2-Flottenemissionen und zur Markteinführung alternativer Antriebe. Ein systemdynamischer Ansatz am Beispiel der kalifornischen Gesetzgebung. Wiesbaden: Springer Gabler (SpringerLink : Bücher).

Weißfloch, Ute (2013): Multikriterielle Bewertung von Produkt-Dienstleistungssystemen zur Steigerung der Energieeffizienz von Druckluftsystemen. Univ., Diss.--Göttingen, 2013. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. (ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale").

Welge, M. K.; Al-Laham, A. (2011): Strategisches Management. Grundlagen - Prozess - Implementierung. 6., aktualis. Aufl. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler (Lehrbuch).

Werner, L. (1992): Entscheidungsunterstützungssysteme. Ein problem- und benutzerorientiertes Management-Instrument. Heidelberg: Physica-Verlag HD.

Wietschel et al. (2012): Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten „Early Adoptern“. 2. Aufl. Hg. v. Fraunhofer ISI. Karlsruhe.

- Wilde, K. D. (1989): Bewertung von Produkt-Markt-Strategien. Theorie und Methoden. Berlin: Duncker & Humblot (Betriebswirtschaftliche Schriften, Heft 127).
- Wildemann, H. (2004): Der Wertbeitrag der Produktion. Entwicklungspfade von Produktionssystemen. In: *Journal of business economics* : JBE 74 (4), S. 385–404.
- Winter, D. H. (2011): Simultane strategische Produktionsplanung beim Vorliegen unvollständiger Informationen. Vorstellung eines risikobasierten Entscheidungsunterstützungssystems unter Verwendung der unscharfen, stochastischen Programmierung. Berlin: Logos Verl.
- Wöhe, G.; Döring, U. (2008): Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 23., vollst. Neubearb. Aufl. München: Vahlen (Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Wolstenholme, E. F. (1990): System enquiry: a system dynamics approach: John Wiley & Sons, Inc.
- Wolstenholme, E. F. (1994): A systematic approach to model creation. In: Morecroft, J. D. W. und J. Sterman (Hg.): Modeling for learning organizations. 1st pbk. ed. Portland, Or.: Productivity Press (System dynamics series), S. 175–194.
- WorkingDays (Hg.) (2014): Kalkulator. WorkingDays.us. Online verfügbar unter http://www.workingdays.us/DE/workingdays_holidays_2014.htm.
- Zahn, E. (1971): Das Wachstum industrieller Unternehmen: Versuch seiner Erklärung mit Hilfe eines komplexen, dynamischen Modells: Gabler Verlag.
- Zahn, E. (1988): Produktionstrategie. Hg. v. Herbert A. Henzler. Wiesbaden (Handbuch strategische Führung).
- Zahn, E. (1996): Produktionswirtschaft. Stuttgart: Lucius und Lucius (UTB, 8126).
- Zahn, E.; Foschiani, S.; Kleinhans, A. (1990): Strategieunterstützungsmodelle in der Produktion. Hg. v. E. Zahn. Gesellschaft für Management und Technologie. München (Organisationsstrategie und Produktion).
- Zangemeister, C. (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. München: Wittmannsche Buchhandlung.
- Zangwill, W. I.; Kantor, P. B. (2000): The learning curve: a new perspective. In: *Int Trans Operational Res International Transactions in Operational Research* 7 (6), S. 595–607.
- Zanker, C. (2011): Planung und Steuerung von Produktionssystemen im Kontext der strategischen Unternehmensplanung. Entwicklung eines anwendungsorientierten Refe-

renzkonzepts und Erprobung in Fallbeispielen. Frankfurt am Main [u.a.]: Lang (Controlling und Management, 44).

Zäpfel, G. (1989): Strategisches Produktions-Management. Berlin [u.a.]: De Gruyter (De-Gruyter-Lehrbuch).

Zäpfel, G. (2000a): Strategisches Produktions-Management: Oldenbourg Verlag.

Zäpfel, G. (2000b): Taktisches Produktions-Management. 2., unwesentlich veränd. Aufl. München, Wien: Oldenbourg (Internationale Standlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

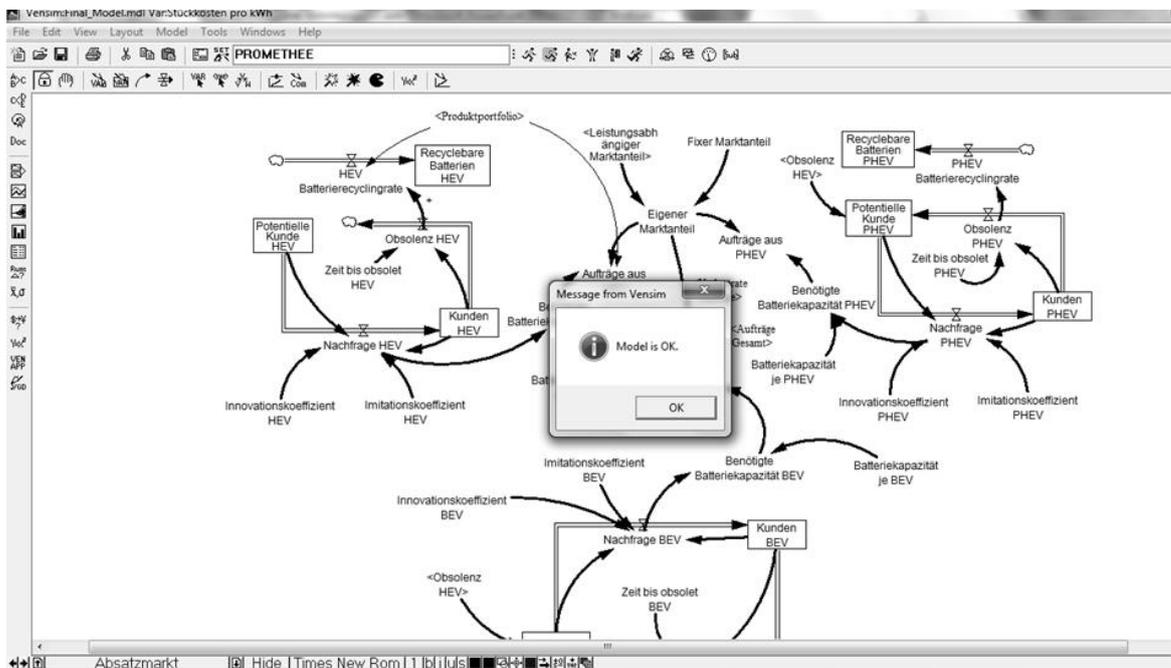
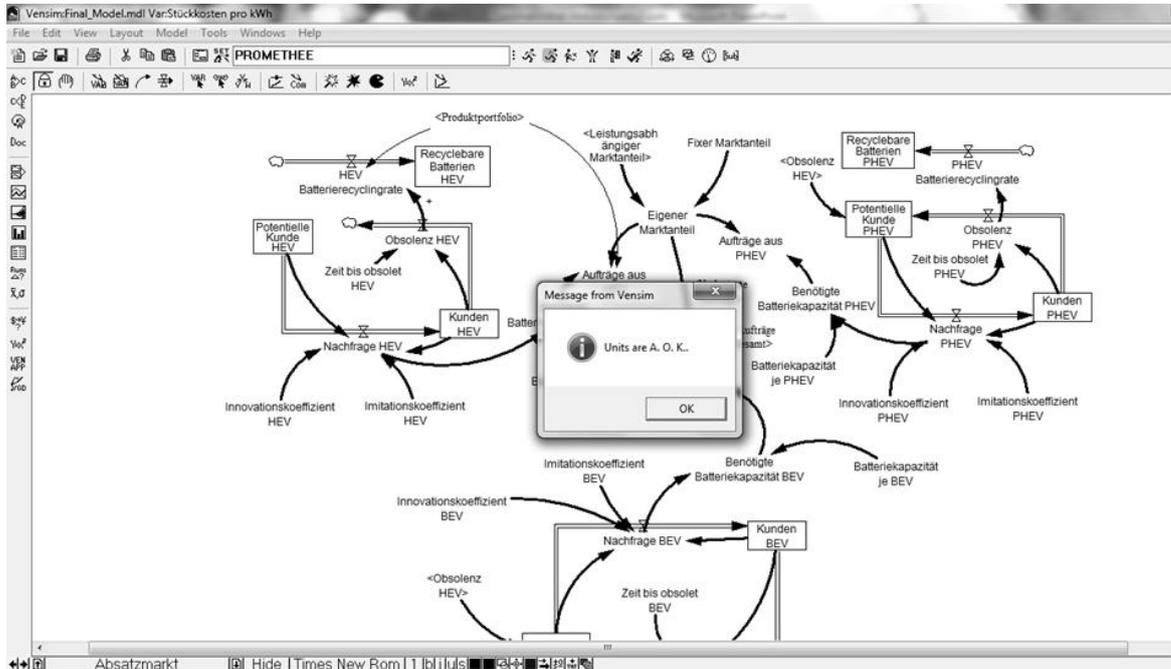
Zenglein, M. (2014): Labor Market and Salary report 2014/15. Hg. v. German Chamber of Commerce in China. Online verfügbar unter <http://china.ahk.de/de/marktinfo/surveys-studies/labor-market-and-salary-report-201415/>, zuletzt geprüft am 12.06.2015.

Zhang, K.; Kluck, C.; Achari, G. (2009): A comparative approach for ranking contaminated sites based on the risk assessment paradigm using fuzzy PROMETHEE. In: *Environmental management* 44 (5), S. 952–967.

Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L. (1991): Multi-criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin [etc.]: Springer-Verl (Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften).

Zittel, W.; Zerhusen, J.; Zerta, M. (2013): Fossil and Nuclear Fuels - the Supply Outlook. Hg. v. Energy Watch Group. Berlin.

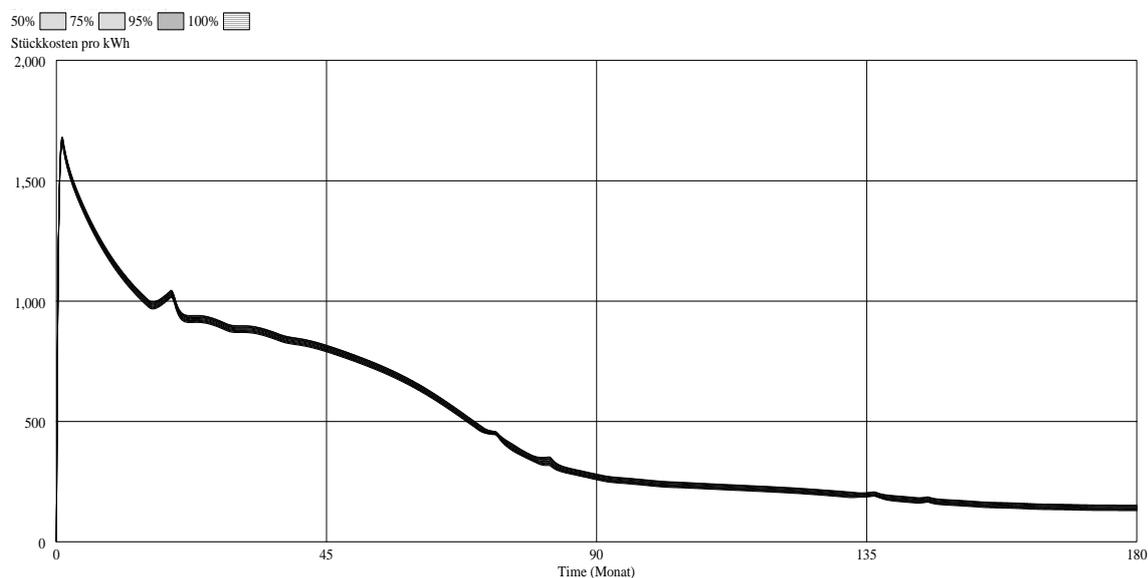
Anhang 1: Ergebnis der integrierten Prüffunktion auf Einheitenkonsistenz und Modellsyntax



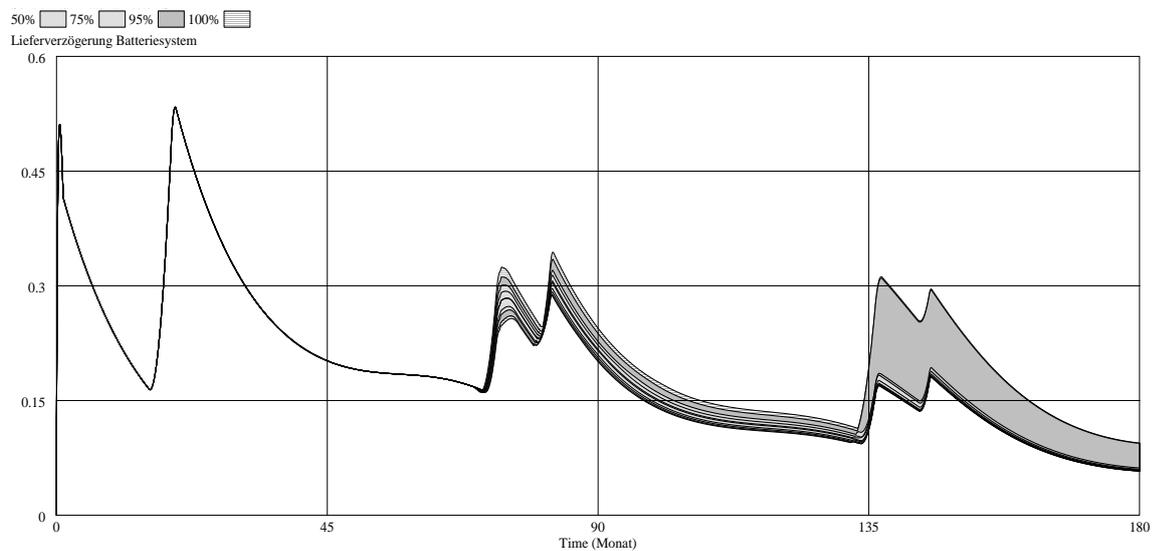
Anhang 2: Ergebnisse der Risikoanalysen

Varierte Inputparameter	Einheit	Ausgangswert	Min	Max
Kosten für Aktivmaterial neg pro kg	[\$/kg]	19	15,2	22,8
Kosten für Aktivmaterial pos pro kg	[\$/kg]	26	20,8	31,2
Kosten für Elektrolytbedarf pro kWh	[\$/l]	21,6	17,28	25,92

Selbstkosten:



Lieferzeit

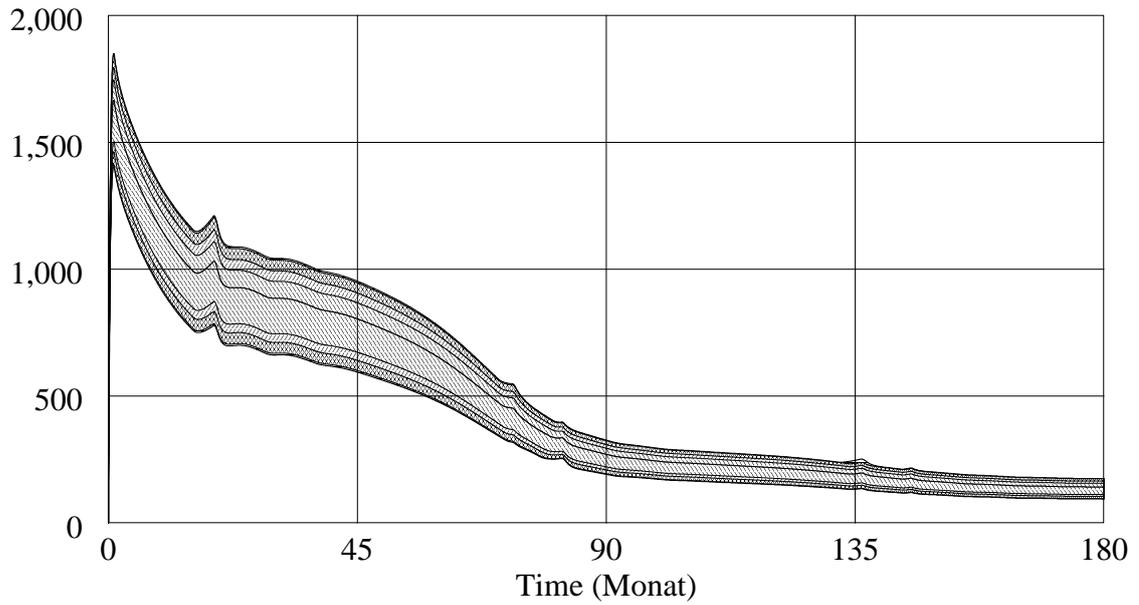


Variierte Inputparameter	Einheit	Ausgangswert	Min	Max
Dollarkurs*	[\$/€]	0,735	0,5	0,9

Selbstkosten:

50%  75%  95%  100% 

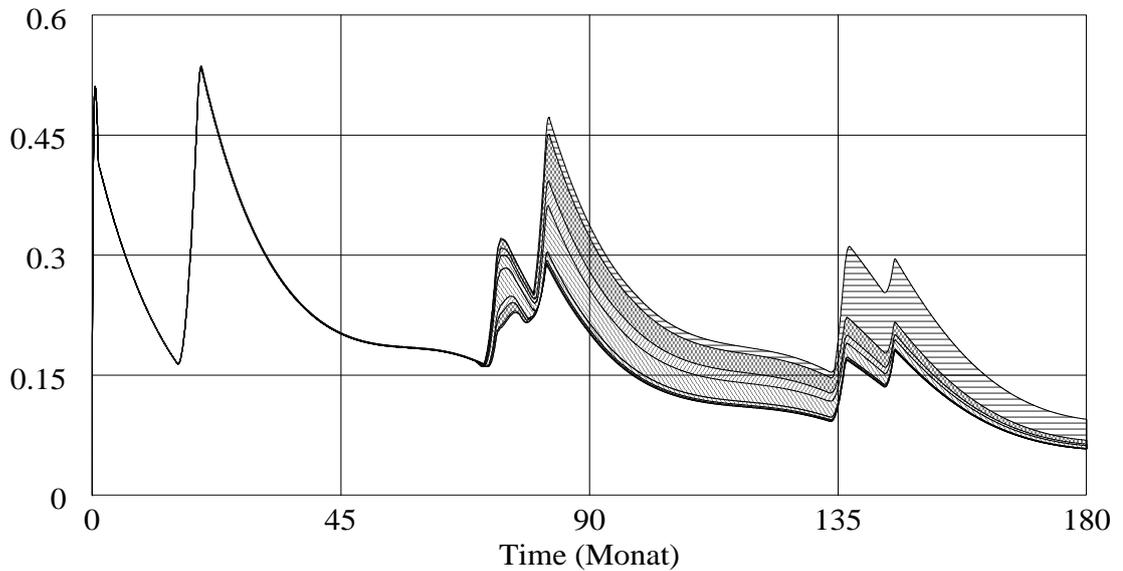
Stückkosten pro kWh



Lieferzeit

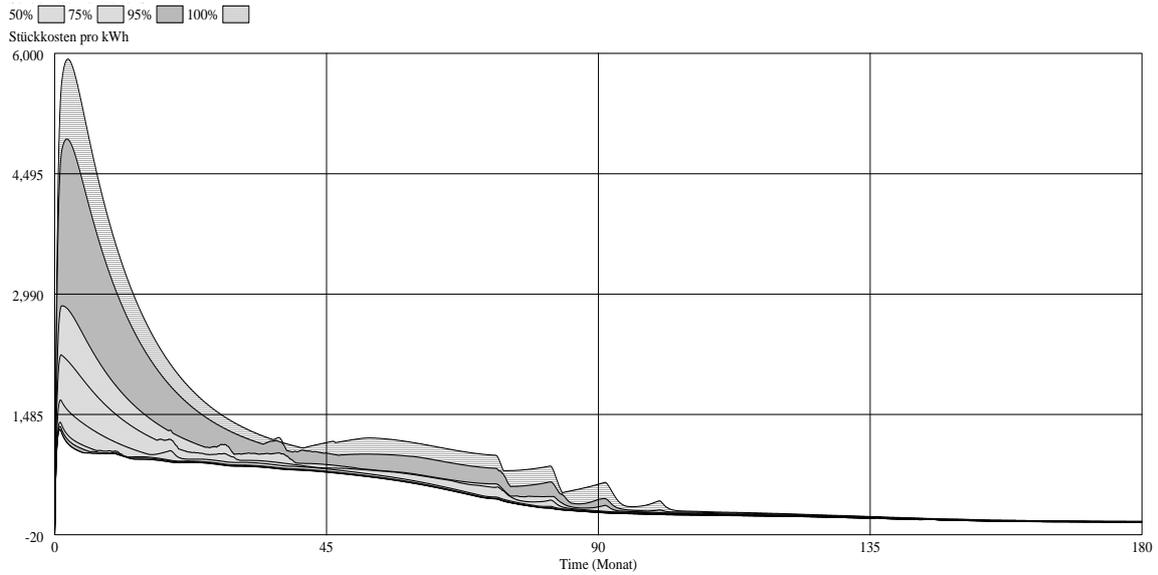
50%  75%  95%  100% 

Lieferverzögerung Batteriesystem

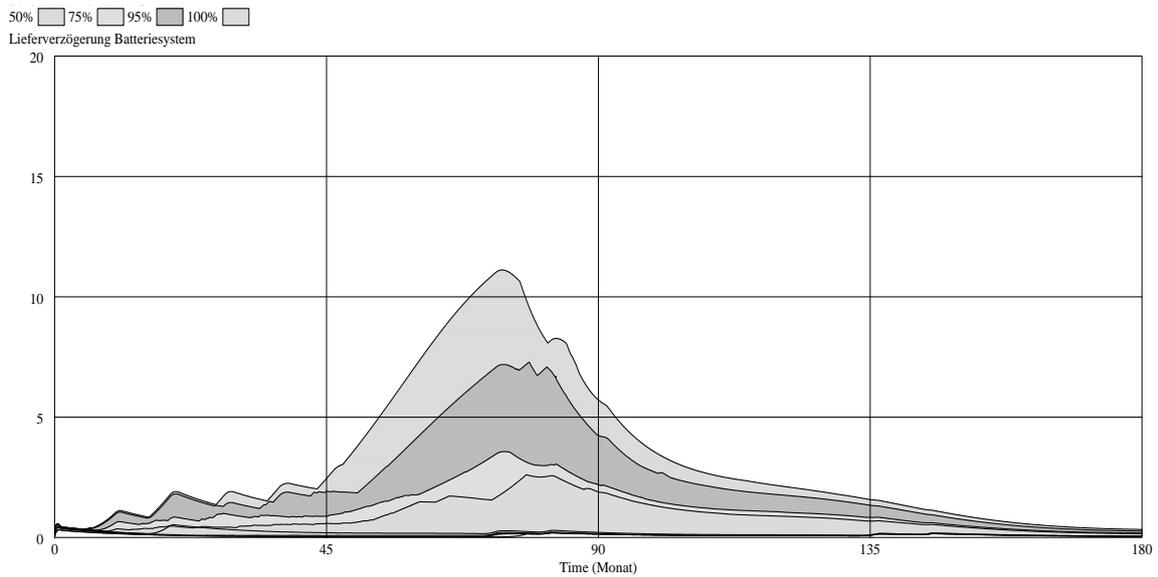


Variierte Inputparameter	Einheit	Ausgangswert	Min	Max
Fixer Marktanteil*	[Dmnl]	0,05	0,01	0,1

Selbstkosten:

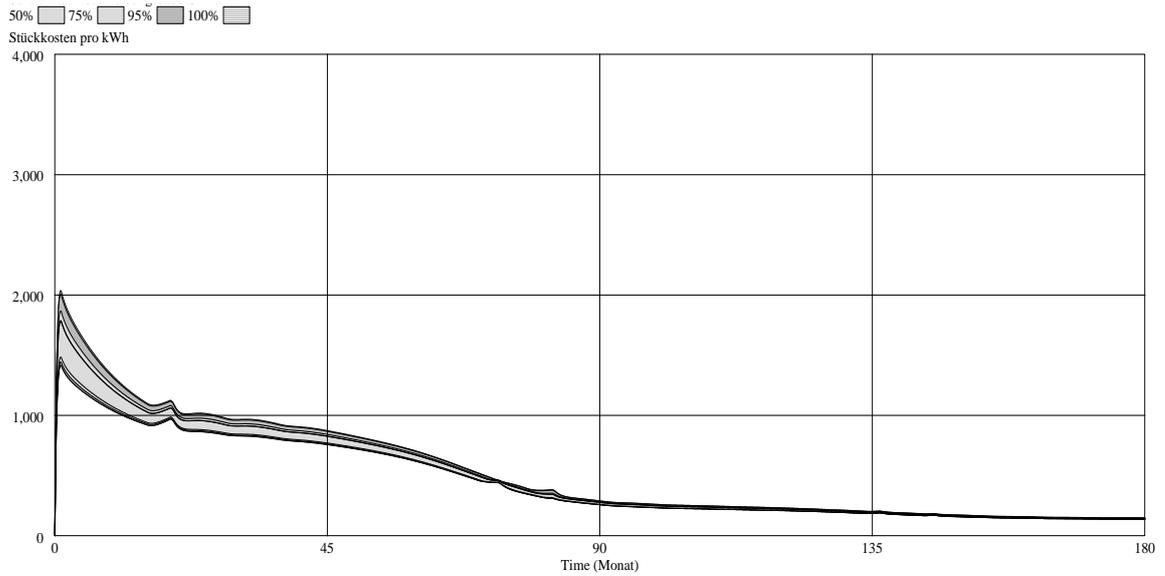


Lieferzeit

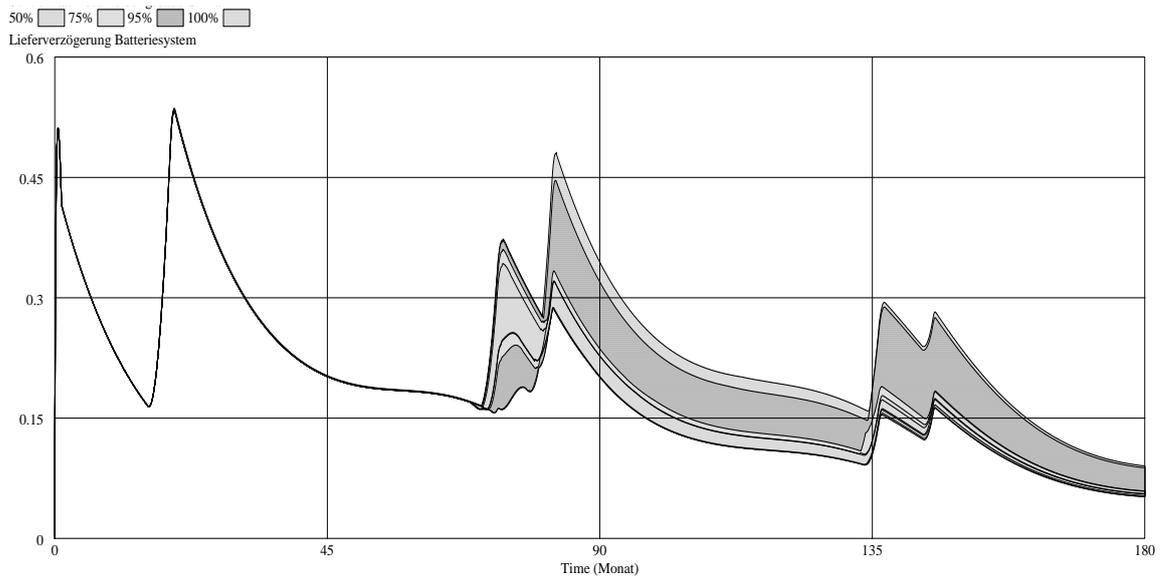


Variierte Inputparameter	Einheit	Ausgangswert	Min	Max
Abschreibungsdauer Gebäude	[Monat]	240	144	300
Abschreibungsdauer Anlagen	[Monat]	72	48	108

Selbstkosten:

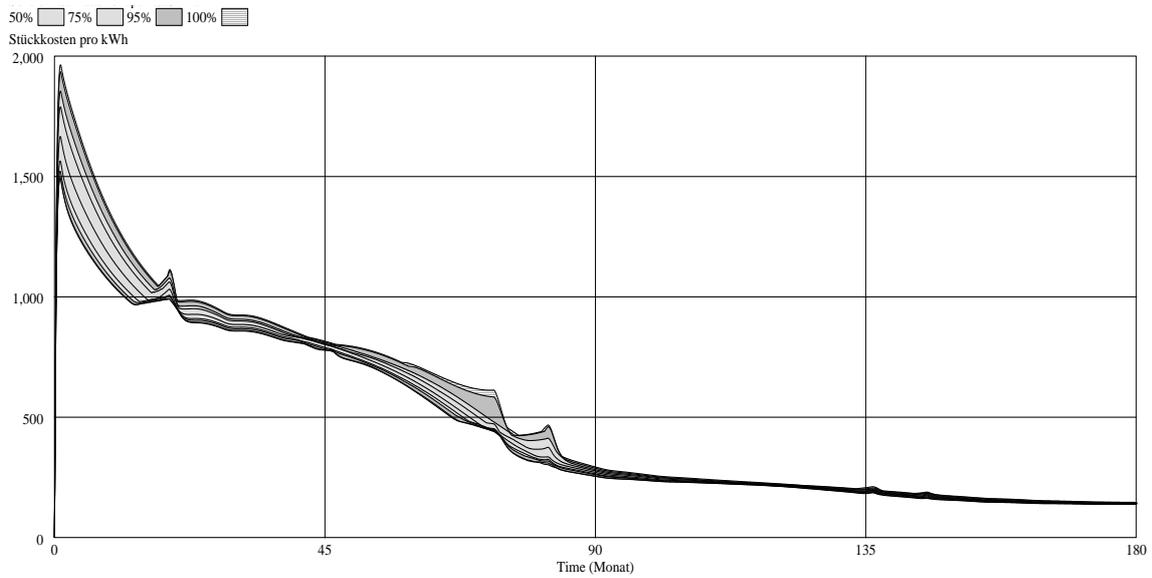


Lieferzeit

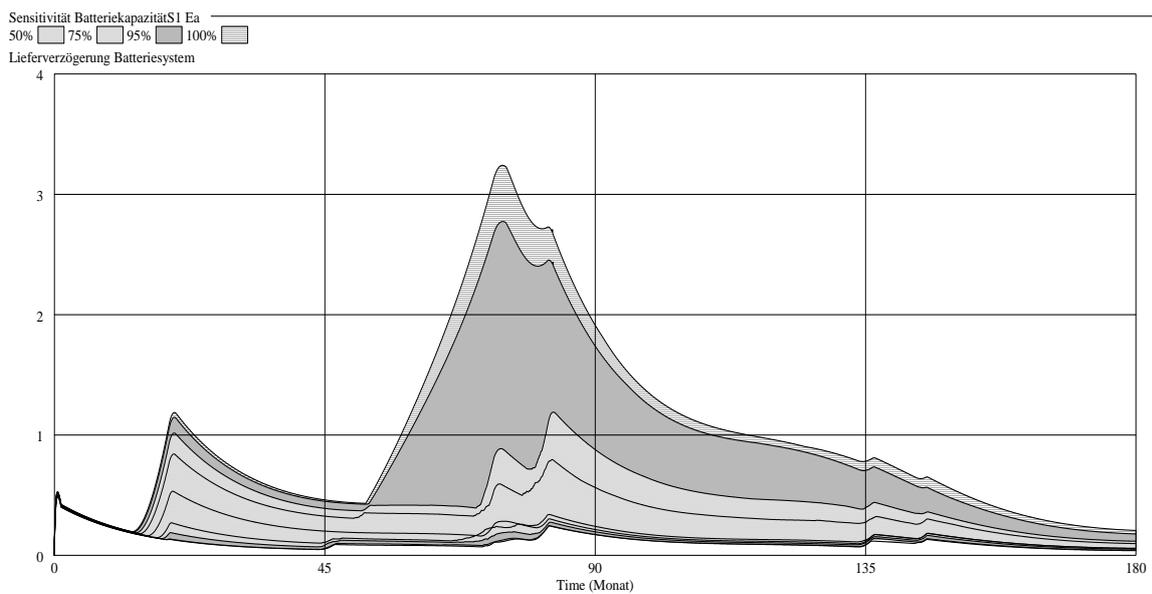


Varierte Inputparameter	Einheit	Ausgangswert	Min	Max
Batteriekapazität je BEV	[kWh/Fzg]	21,6	17,3	25,9
Batteriekapazität je HEV	[kWh/Fzg]	1,4	1,1	1,6
Batteriekapazität je PHEV	[kWh/Fzg]	7,1	5,7	8,5

Selbstkosten:



Lieferzeit



Anhang 3: Standardisierter Fragebogen

Questionnaire on the relevance and characteristics of business environments in cell and battery production

In which country is your production facility settled?

How relevant are the following factors and how pronounced are they?

Part 1: Production & competitiveness

Availability of qualified employee?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Robustness of production (Disruptions by e.g., power supply, strike, lack of service...)?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Low total costs of production (including labor, installations, energy, raw materials...)?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Low labor costs?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Low energy prices?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Volume of the domestic market?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Reliability of suppliers?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Existence of the entire value chain in the country?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Proximity to customer?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Low logistical costs?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Part 3: Political framework

Protection of intellectual property?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Low investments in buildings and equipment?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Social conditions of production (hours of work, health and safety conditions...)

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Low market power of suppliers?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Low market power of customers?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Part 2: Market & Supply Chain

Short delivery times of components and materials?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Governmental incentives?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Existing import restrictions (tariffs...)?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Cooperations with research institutes?

Relevance of the criterion	unimportant	Rather unimportant	Rather important	Very important	Decisive	Future change		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	less important	unchanged	more important
Degree of fulfillment in your companies country	Not fulfilled <input type="checkbox"/>	Rather not fulfilled <input type="checkbox"/>	Partly fulfilled <input type="checkbox"/>	Fulfilled <input type="checkbox"/>	Unique position <input type="checkbox"/>	worse <input type="checkbox"/>	unchanged <input type="checkbox"/>	better <input type="checkbox"/>

Part 4: Supplements and comments

Below you will have the opportunity to give feedback on the criteria given as well as to name further criteria which have not been considered yet. Of course you are welcome to insert your comments directly at the criterion concerned as well.

Additional comments:

Thank you very much for your support!

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Subsektor Produktion

Akzeptanzgrenze Lieferverzögerung = 1	Monat
Anfangsproduktionsrate = Bestelleingänge-Verluste	kWh/Monat
Anlagenwegfall Elektrode = DELAY FIXED (Anlagen Bestellrate Elektrode, Abschreibungszeit Anlagen Elektrode, 0)	kWh/(Monat*Monat)
Auftragsverluste = INTEG (Bestelleingänge-Verluste-Anfangsproduktionsrate,0)	kWh
Aufträge aus BEV = Benötigte Batteriekapazität BEV*Eigener Marktanteil	kWh/Monat
Aufträge aus HEV = Benötigte Batteriekapazität HEV*Eigener Marktanteil*Produktportfolio	kWh/Monat
Aufträge aus PHEV = Eigener Marktanteil*Benötigte Batteriekapazität PHEV	kWh/Monat
Aufträge Gesamt = Aufträge aus BEV + Aufträge aus HEV + Aufträge aus PHEV	kWh/Monat
Auslastung = IF THEN ELSE(Time<6, 0, Gewünschte Anfangsproduktionsrate Batterieelektroden/Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität*100)	Dmnl
Auslieferungen Batterieelektrode = Lieferrate Elektroden	kWh/Monat
Auslieferungen Batteriemodul = Lieferrate Batteriemodul	kWh/Monat
Auslieferungen Batteriesystem = Lieferrate Batteriesystem	kWh/Monat
Auslieferungen Batteriezelle = Lieferrate Batteriezelle	kWh/Monat
Bestelleingänge = Bestellrate Batterieelektrode	kWh/Monat
Bestellrate Batterieelektrode = Bestellrate Batteriezelle	kWh/Monat
Bestellrate Batteriemodul = Bestellrate Batteriesystem	kWh/Monat
Bestellrate Batteriezelle = Bestellrate Batteriemodul	kWh/Monat
Bestellungen Batterieelektrode = INTEG (Bestellrate Batterieelektrode-Auslieferungen Batterieelektrode,0)	kWh
Bestellungen Batteriemodul = INTEG (Bestellrate Batteriemodul-Auslieferungen Batteriemodul,0)	kWh
Bestellungen Batteriesystem = INTEG (Bestellrate Batteriesystem-Auslieferungen Batteriesystem,0)	kWh
Bestellungen Batteriezelle = INTEG (Bestellrate Batteriezelle-Auslieferungen Batteriezelle,0)	kWh
Differenz zu Auslieferung = Eingangsbestellrate-Auslieferungen Batteriesystem	kWh/Monat
Eingangsbestellrate = DELAY INFORMATION (Bestellrate Batteriesystem, Lieferverzögerung Batteriesystem, 0)	kWh/Monat
Fehlmengenkosten Kapazitätsdelta = Verlustrate Aufträge*Trend Verlauf	€/Monat
Gewünschte Anfangsproduktionsrate Batterieelektroden = Anfangsproduktionsrate	kWh/Monat
Gewünschte Lieferrate Batteriemodul = Bestellungen Batteriemodul/Ziel Lieferzeitraum Modul	kWh/Monat
Gewünschte Lieferrate Batteriesystem = Bestellungen Batteriesystem/Ziel Lieferzeitraum System	kWh/Monat
Gewünschte Lieferrate Batteriezelle = Bestellungen Batteriezelle/Ziel Lieferzeitraum Zelle	kWh/Monat
Gewünschte Lieferrate Elektrode = Bestellungen Batterieelektrode/Ziel Verzögerung Elektrode	kWh/Monat
Gewünschte Produktion Batteriemodul = Gewünschte Lieferrate Batteriemodul	kWh/Monat

Gewünschte Produktion Batteriesystem = Gewünschte Lieferrate Batteriesystem	kWh/Monat
Gewünschte Produktionsrate Batteriezelle = Gewünschte Lieferrate Batteriezelle	kWh/Monat
Inventar Batteriemodul = INTEG (Produktionsrate Batteriemodule-Lieferrate Batteriemodul,0)	kWh
Inventar Batteriesystem = INTEG (Produktionsrate Batteriesystem-Lieferrate Batteriesystem,0)	kWh
Inventar Batteriezelle = INTEG (Produktionsrate Batteriezelle-Lieferrate Batteriezelle,0)	kWh
Inventar Elektroden = INTEG (Produktionsrate Batterieelektrode-Lieferrate Elektroden,0)	kWh
Kosten Lieferverzögerung = IF THEN ELSE(Lieferverzögerung Batteriesystem>Akzeptanzgrenze Lieferverzögerung, MAX(0, Kostenfaktor Lieferverzug*Trend Verlauf*Differenz zu Auslieferung), 0)	€/Monat
Kostenfaktor Lieferverzug = WITH LOOKUP (Lieferverzögerung Batteriesystem/"Time = 1",((-1,0)-(100,10)),(-1,0),(4,1),(100,1))	Dmnl
Lieferrate Batteriemodul = Produktionsrate Batteriemodule	kWh/Monat
Lieferrate Batteriesystem = Produktionsrate Batteriesystem	kWh/Monat
Lieferrate Batteriezelle = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Produktionsrate Batteriezelle, Bestellrate Batteriemodul)	kWh/Monat
Lieferrate Elektroden = MIN(Produktionsrate Batterieelektrode, Gewünschte Lieferrate Elektrode)	kWh/Monat
Liefertreue Elektrode = Lieferverzögerung Elektrode/Ziel Verzögerung Elektrode	Dmnl
Lieferverzögerung Batteriemodul = ZIDZ(Bestellungen Batteriemodul,Auslieferungen Batteriemodul)	Monat
Lieferverzögerung Batteriesystem = MAX(0,ZIDZ((Bestellungen Batteriesystem),Auslieferungen Batteriesystem+Verluste))	Monat
Lieferverzögerung Batteriezelle = ZIDZ(Bestellungen Batteriezelle,Auslieferungen Batteriezelle)	Monat
Lieferverzögerung Elektrode = ZIDZ(Bestellungen Batterieelektrode,Auslieferungen Batterieelektrode)	Monat
Max Produktionsrate Batteriematerial = Materialverarbeitung/Batteriematerialbedarf pro kWh	kWh/Monat
Maximale Produktion Elektrode = MIN(Max Produktionsrate Batteriematerial, Maximale Produktionsrate Personal Elektrode)	kWh/Monat
Maximale Produktion Modul = IF THEN ELSE(Lieferrate Batteriezelle<Maximale Produktionsrate Modul Anlagenkapazität, Lieferrate Batteriezelle, IF THEN ELSE(Maximale Produktionsrate Modul Anlagenkapazität<Maximale Produktionsrate Personal Module, Maximale Produktionsrate Modul Anlagenkapazität, Maximale Produktionsrate Personal Module))	kWh/Monat
Maximale Produktion System = IF THEN ELSE(Lieferrate Batteriemodul<Maximale Produktionsrate System Anlagenkapazität, Lieferrate Batteriemodul, IF THEN ELSE(Maximale Produktionsrate System Anlagenkapazität<Maximale Produktionsrate Personal Sytems, Maximale Produktionsrate System Anlagenkapazität, Maximale Produktionsrate Personal Sytems))	kWh/Monat
Maximale Produktion Zelle = IF THEN ELSE(Lieferrate Elektroden<Maximale Produktionsrate Zelle Anlagenkapazität, Lieferrate Elektroden, IF THEN ELSE(Maximale Produktionsrate Zelle Anlagenkapazität<Maximale Produktionsrate Personal Zelle, Maximale Produktionsrate Zelle Anlagenkapazität, Maximale Produktionsrate Personal Zelle))	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität = Installierte Anlagekapazität Elektrode	kWh/Monat

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Maximale Produktionsrate Modul Anlagenkapazität = Installierte Anlagekapazität Modul	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate Personal Elektrode = Aufträge Gesamt*Erfüllungsgrad Elektrode	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate Personal Module = Aufträge Gesamt*Erfüllungsgrad Module	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate Personal Systems = Aufträge Gesamt*Erfüllungsgrad Packs	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate Personal Zelle = Aufträge Gesamt*Erfüllungsgrad Zelle	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate System Anlagenkapazität = Installierte Anlagekapazität Pack	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate Zelle Anlagenkapazität = Installierte Anlagekapazität Zelle	kWh/Monat
Obere Grenze Stückkosten kWh = WITH LOOKUP (MAX(Time/"Time = 1", 1),((0,0)-(400,800)),(1,700),(60,600),(120,500),(180,400),(250,350))	€/kWh
Performance Lieferzeit = Lieferverzögerung Batteriesystem/Ziel Lieferzeitraum System	Dmnl
Produktionsrate Batterieelektrode = MIN(Maximale Produktion Elektrode, Gewünschte Anfangsproduktionsrate Batterieelektroden)	kWh/Monat
Produktionsrate Batteriemodule = Maximale Produktion Modul	kWh/Monat
Produktionsrate Batteriesystem = Maximale Produktion System	kWh/Monat
Produktionsrate Batteriezelle = Maximale Produktion Zelle	kWh/Monat
Show restriction Elektrode = IF THEN ELSE(Maximale Produktion Elektrode = Max Produktionsrate Batteriematerial, 1, IF THEN ELSE(Maximale Produktion Elektrode = Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität, 0, -1))	Dmnl
Show restriction Modul = IF THEN ELSE(Maximale Produktion Modul = Lieferrate Batteriezelle, 1, IF THEN ELSE(Maximale Produktion Modul = Maximale Produktionsrate Modul Anlagenkapazität, 0, -1))	Dmnl
Show restriction System = IF THEN ELSE(Maximale Produktion System = Lieferrate Batteriemodul, 1, IF THEN ELSE(Maximale Produktion System = Maximale Produktionsrate System Anlagenkapazität, 0, -1))	Dmnl
Show restriction Zelle = IF THEN ELSE(Maximale Produktion Zelle = Lieferrate Elektroden, 1, IF THEN ELSE(Maximale Produktion Zelle = Maximale Produktionsrate Zelle Anlagenkapazität, 0, -1))	Dmnl
Trend Verlauf = (Trend Verlauf HEV*Nachfrage HEV+Trend Verlauf PHEV*Nachfrage PHEV+Trend Verlauf BEV*Nachfrage BEV)/(Nachfrage BEV+IF THEN ELSE(Strategiewahl = 5 :OR: Strategiewahl = 6, 0, Nachfrage HEV)+Nachfrage PHEV)	€/kWh
Untere Grenze = WITH LOOKUP (MAX(Time/"Time = 1", 1),((0,0)-(400,400)),(1,250),(60,150),(120,125),(180,100),(250,75))	€/kWh
Verluste = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, IF THEN ELSE(Time<6, 0, IF THEN ELSE(Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität<Bestellrate Batterieelektrode, Bestellrate Batterieelektrode-Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität,0)), IF THEN ELSE(Time<6, 0, IF THEN ELSE(Maximale Produktionsrate Modul Anlagenkapazität<Bestellrate Batterieelektrode, Bestellrate Batterieelektrode-Maximale Produktionsrate Modul Anlagenkapazität,0)))	kWh/Monat
Verlustrate Aufträge = Verluste	kWh/Monat
Verlustrate BEV = Verlustrate Aufträge*(Aufträge aus BEV/Aufträge Gesamt)	kWh/Monat
Verlustrate HEV = Verlustrate Aufträge*(Aufträge aus HEV/Aufträge Gesamt)	kWh/Monat
Verlustrate PHEV = Verlustrate Aufträge*(Aufträge aus PHEV/Aufträge Gesamt)	kWh/Monat
WIP Batteriemodul = INTEG (Lieferrate Batteriezelle-Produktionsrate Batteriemodule,0)	kWh

WIP Batteriesystem = INTEG (Lieferrate Batteriemodul-Produktionsrate Batteriesystem,0)	kWh
WIP Batteriezelle = INTEG (Lieferrate Elektroden-Produktionsrate Batteriezelle,0)	kWh
Ziel Lieferzeitraum Modul = 2	Monat
Ziel Lieferzeitraum System = 2	Monat
Ziel Lieferzeitraum Zelle = 2	Monat
Ziel Verzögerung Elektrode = 0.03	Monat
Zukauf von Zellen = IF THEN ELSE(Fertigungstiefe = 0 :OR: Fertigungstiefe = 2, 0, 1)	Dmnl
Zusatzkosten = Kosten Lieferverzögerung + Fehlmengenkosten Kapazitätsdelta	€/Monat

Subsektor Produktionskapazität

Abschreibungszeit Anlagen Elektrode = Anlagenenerneuerungsrate	Monat
Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode = (Aktuelle Ausbeute Anlage Elektrode*Anfangskapazität Elektrode)**"Know-how Anlagen"	kWh/Monat
Aktuelle Ausbeute Anlage Elektrode = WITH LOOKUP (Time/"Time = 1",((0,0)-(600,10)),(0,0.8),(60,0.9),(120,0.95),(360,0.98),(480,0.99))	Dmnl
Altersbedingte Anlagenwegfallrate Elektrode = Anlagenwegfall Elektrode	kWh/(Monat*Monat)
Anlagenperformance im Hochlauf Elektrode = WITH LOOKUP (Anlagenhochlaufdauer Elektrode/"Time = 1",((0,0)-(-10,10)),(0,0),(6,1))	Dmnl
Anfangskapazität Elektrode = 870000/12	kWh/Monat
Anlage in Hochlauf Elektrode = INTEG (Anlageninsatllationsrate Elektrode-Anlagenhochlauftrate Elektrode,0)	kWh/Monat
Anlage in Insatallation Elektrode = INTEG (Anlagen Bestellrate Elektrode-Anlageninsatllationsrate Elektrode,0)	kWh/Monat
Anlagen Bestellrate Elektrode = IF THEN ELSE(Anzahl Bestellungen Anlagen Elektrode >= 1,(Anzahl Bestellungen Anlagen Elektrode)*Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode/TIME STEP,0)	kWh/(Monat*Monat)
Anlagenenerneuerungsrate = WITH LOOKUP (Strategiewahl,((0,0)-(10,80)),(1,72),(2,60),(3,72),(4,60),(5,72),(6,72))	Monat
Anlagenhochlaufdauer Elektrode = Gesamtdauer Kapazitätsanpassung*2/3	Monat
Anlagenhochlauftrate Elektrode = Anlagenperformance im Hochlauf Elektrode*Anlageninstallationsrate Elektrode	kWh/(Monat*Monat)
Anlageninstallationsrate Elektrode = DELAY1(Anlagen Bestellrate Elektrode, Anlageninstallationsdauer Elektrode)	kWh/(Monat*Monat)
Anlageninstallationsdauer Elektrode = Gesamtdauer Kapazitätsanpassung/3	Monat
Anlagenperformance Alter Anlagen Elektrode = DELAY FIXED (Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode, Abschreibungszeit Anlagen Elektrode, 1)	kWh/Monat
Anlagenwegfall Elektrode = DELAY FIXED (Anlagen Bestellrate Elektrode, Abschreibungszeit Anlagen Elektrode, 0)	kWh/(Monat*Monat)
Anzahl Bestellungen Anlagen Elektrode = ZIDZ(Kapazitätsdelta Elektrode,Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode)	Dmnl
Aufträge Gesamt = Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV	kWh/Monat
FINAL TIME = 180	Monat
Gesamtdauer Kapazitätsanpassung = 9	Monat
Installierte Anlagekapazität Elektrode = Installierte Anlagen Kapazität Elektrode	kWh/Monat
Installierte Anlagen Kapazität Elektrode = INTEG (Anlagenhochlauftrate Elektrode+Neuersatz aufgrund Anlagenwegfall Elektrode-Altersbedingte Anlagenwegfallrate Elektrode,Anfangskapazität Elektrode)	kWh/Monat

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Kapazitätsaufbau = IF THEN ELSE(Kapazitätsstrategie-selektion = 0, Aufträge Gesamt, IF THEN ELSE(Kapazitätsstrategie-selektion = 1, Batterieaufträge FORECAST Anlagen, Kapazitätsaufbau leading))	kWh/Monat
Kapazitätsdelta Elektrode = PULSE TRAIN(Planungsbeginn Elektrode, TIME STEP, Planungsperioden Elektrode, FINAL TIME) * (MAX(0, (Kapazitätsaufbau-Installierte Anlagekapazität Elektrode)))	kWh/Monat
Know-how Anlagen = IF THEN ELSE(Standort = 0, 1, 0.85)	Dmnl
Lieferrate Batteriesystem = Produktionsrate Batteriesystem	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität = Installierte Anlagekapazität Elektrode	kWh/Monat
Neuersatz aufgrund Anlagenwegfall Elektrode = IF THEN ELSE(Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität <= Kapazitätsaufbau, Altersbedingte Anlagenwegfallrate Elektrode/Anlagenperformance Alter Anlagen Elektrode*Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode, Altersbedingte Anlagenwegfallrate Elektrode/Relativfaktor Ersatzinvestition)	kWh/(Monat*Monat)
Planungsbeginn Elektrode = 1	Monat
Planungsperioden Elektrode = Gesamtdauer Kapazitätsanpassung	Monat
Relativfaktor Ersatzinvestition = Installierte Anlagekapazität Elektrode/Aufträge Gesamt	Dmnl
Stückkosten pro kWh = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, SMOOTH(Stückkosten pro kWh raw-Ergebnis aus Recycling, smooth1Time11), SMOOTH(Stückkosten pro kWh raw+Referenz Trend*(„Anteil Zellkosten/kWh an Packkosten/kWh“*Profit bei Zellkauf), smooth1Time11))	€/kWh
Abschreibungszeit Anlagen Elektrode = Anlagenerneuerungsrate	Monat
Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode = (Aktuelle Ausbeute Anlage Elektrode*Anfangskapazität Elektrode)*"Know-how Anlagen"	kWh/Monat
Aktuelle Ausbeute Anlage Elektrode = WITH LOOKUP (Time/"Time = 1",((0,0)-(600,10)),(0,0.8),(60,0.9),(120,0.95),(360,0.98),(480,0.99))	Dmnl
Altersbedingte Anlagenwegfallrate Elektrode = Anlagenwegfall Elektrode	kWh/(Monat*Monat)
Anlagenperformance im Hochlauf Elektrode = WITH LOOKUP (Anlagenhochlaufdauer Elektrode/"Time = 1",((0,0)-(10,10)),(0,0),(6,1))	Dmnl
Anfangskapazität Elektrode = 870000/12	kWh/Monat
Anlage in Hochlauf Elektrode = INTEG (Anlageninstallationsrate Elektrode-Anlagenhochlaufdauer Elektrode,0)	kWh/Monat
Anlage in Installation Elektrode = INTEG (Anlagen Bestellrate Elektrode-Anlageninstallationsrate Elektrode,0)	kWh/Monat
Anlagen Bestellrate Elektrode = IF THEN ELSE(Anzahl Bestellungen Anlagen Elektrode >= 1,(Anzahl Bestellungen Anlagen Elektrode)*Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode/TIME STEP,0)	kWh/(Monat*Monat)
Anlagenerneuerungsrate = WITH LOOKUP (Strategiewahl,((0,0)-(10,80)),(1,72),(2,60),(3,72),(4,60),(5,72),(6,72))	Monat
Anlagenhochlaufdauer Elektrode = Gesamtdauer Kapazitätsanpassung*2/3	Monat
Anlagenhochlaufdauer Elektrode = Anlagenperformance im Hochlauf Elektrode*Anlageninstallationsrate Elektrode	kWh/(Monat*Monat)
Anlageninstallationsrate Elektrode = DELAY1(Anlagen Bestellrate Elektrode, Anlageninstallationsdauer Elektrode)	kWh/(Monat*Monat)
Anlageninstallationsdauer Elektrode = Gesamtdauer Kapazitätsanpassung/3	Monat
Anlagenperformance Alter Anlagen Elektrode = DELAY FIXED (Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode, Abschreibungszeit Anlagen Elektrode, 1)	kWh/Monat
Anlagenwegfall Elektrode = DELAY FIXED (Anlagen Bestellrate Elektrode, Abschreibungszeit Anlagen Elektrode, 0)	kWh/(Monat*Monat)

Anzahl Bestellungen Anlagen Elektrode = ZIDZ(Kapazitätsdelta Elektrode,Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode)	Dmnl
Aufträge Gesamt = Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV	kWh/Monat
FINAL TIME = 180	Monat
Gesamtdauer Kapazitätsanpassung = 9	Monat
Installierte Anlagekapazität Elektrode = Installierte Anlagen Kapazität Elektrode	kWh/Monat
Installierte Anlagen Kapazität Elektrode = INTEG (Anlagenhochlaufrate Elektrode+Neuersatz aufgrund Anlagenwegfall Elektrode-Altersbedingte Anlagenwegfallrate Elektrode,Anfangskapazität Elektrode)	kWh/Monat
Kapazitätsaufbau = IF THEN ELSE(Kapazitätsstrategieselektion = 0, Aufträge Gesamt, IF THEN ELSE(Kapazitätsstrategieselektion = 1, Batterieaufträge FORECAST Anlagen, Kapazitätsaufbau leading))	kWh/Monat
Kapazitätsdelta Elektrode = PULSE TRAIN(Planungsbeginn Elektrode, TIME STEP, Planungsperioden Elektrode, FINAL TIME) * (MAX(0, (Kapazitätsaufbau-Installierte Anlagekapazität Elektrode)))	kWh/Monat
Know-how Anlagen = IF THEN ELSE(Standort = 0, 1, 0.85)	Dmnl
Lieferrate Batteriesystem = Produktionsrate Batteriesystem	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität = Installierte Anlagekapazität Elektrode	kWh/Monat
Neuersatz aufgrund Anlagenwegfall Elektrode = IF THEN ELSE(Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität< = Kapazitätsaufbau, Altersbedingte Anlagenwegfallrate Elektrode/Anlagenperformance Alter Anlagen Elektrode*Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode, Altersbedingte Anlagenwegfallrate Elektrode/Relativfaktor Ersatzinvestition)	kWh/(Monat*Monat)
Planungsbeginn Elektrode = 1	Monat
Planungsperioden Elektrode = Gesamtdauer Kapazitätsanpassung	Monat
Relativfaktor Ersatzinvestition = Installierte Anlagekapazität Elektrode/Aufträge Gesamt	Dmnl
Stückkosten pro kWh = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, SMOOTH(Stückkosten pro kWh raw-Ergebnis aus Recycling, smooth1Time11), SMOOTH(Stückkosten pro kWh raw+Referenz Trend*("Anteil Zellkosten/kWh an Packkosten/kWh"*Profit bei Zellkauf), smooth1Time11))	€/kWh

Subsektor Materialbeschaffung

Akquisedauer Material = Materialanpassungszeit	Monat
Aufträge Gesamt = Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV	kWh/Monat
Batterieaufträge FORECAST Material = FORECAST(Aufträge Gesamt, Forecast smoothing Material, Materialanpassungszeit)	kWh/Monat
Batteriematerialbedarf Anfangsproduktion in t pro Monat = Anodenmaterial pro kWh+Kathodenmaterial pro kWh	t/Monat
Batteriematerialbedarf pro kWh = Batteriematerialbedarf Anfangsproduktion in t pro Monat/Aufträge Gesamt*Einheit t in kg	kg/kWh
Bestellrate Batteriesystem = Aufträge Gesamt	kWh/Monat
Einheit t in kg = 1000	kg/t
Gewünschte Anfangsproduktionsrate Batterieelektroden = Anfangsproduktionsrate	kWh/Monat
Lagerreichweite = Materiallager/Maximaler Verbrauch Batteriematerial	Monat
Materialanpassung = Batterieaufträge FORECAST Material*Batteriematerialbedarf pro kWh	kg/Monat
Materialanpassungszeit = 4	Monat

Materialbeschaffung = MAX (DELAY1 (Materialanpassung+ (IF THEN ELSE(Lagerreichweite >= 1, -Materiallager/Lagerreichweite, Materiallager/Lagerreichweite)), Akquisedauer Material), 0)	kg/Monat
Materiallager = INTEG (MAX(0, Materialbeschaffung-Materialverarbeitung),3000)	kg
Materialverarbeitung = MAX(0,Maximaler Verbrauch Batteriematerial)	kg/Monat
Max Produktionsrate Batteriematerial = Materialverarbeitung/Batteriematerialbedarf pro kWh	kWh/Monat
Maximaler Verbrauch Batteriematerial = Bestellrate Batteriesystem*Batteriematerialbedarf pro kWh	kg/Monat

Subsektor Personal

Akquisedauer Personal = 3	Monat
Arbeitsaufwand Forecast Elektrodenehrstellung = FORECAST(Arbeitsaufwand zur Elektrodenherstellung, Forecast smoothing Personal, Akquisedauer Personal)	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Elektrodenherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Arbeitsaufwand für Elektrodenbeschichtung negatives Material+Arbeitsaufwand für Elektrodenbeschichtung positives Material+Arbeitsaufwand Materialvorbereitung negatives Aktivmaterial+Arbeitsaufwand Materialvorbereitung positives Aktivmaterial+Arbeitsaufwand zum Kalandern von negativem Aktivmaterial+Arbeitsaufwand zum Kalandern von positivem Aktivmaterial+Arbeitsaufwand zur Lösungsmittelrückgewinnung, 0)	Std/Monat
Arbeitsverhältnisproduktivität Elektrode = Produzierte Elektroden/Personal Elektrodenfertigung	kWh/Personal
Aufträge Gesamt = Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV	kWh/Monat
Ausscheidungsrate Elektrodenfertigung = Personal Elektrodenfertigung/Fluktuationsrate Personal	Personal/Monat
Bedarf an Personal Elektrode = INTEGER(MAX(((Arbeitsaufwand Forecast Elektrodenehrstellung/Stunden pro Monat)-Personal Elektrodenfertigung+Ausscheidungsrate Elektrodenfertigung*Akquisedauer Personal), 0))	Personal
Benötigtes Personal Elektrode = ZIDZ(Arbeitsaufwand zur Elektrodenherstellung, Stunden pro Monat)	Personal
Einstellperiode = 1	Monat
Einstellrate Elektrodenfertigung = INTEGER(DELAY1(IF THEN ELSE(Bedarf an Personal Elektrode/Einstellperiode >= 1, Bedarf an Personal Elektrode/Einstellperiode, 0), Akquisedauer Personal))	Personal/Monat
Elektrodenproduktion = Maximale Produktionsrate Personal Elektrode	kWh/Monat
Erfüllungsgrad Elektrode = ZIDZ(Personal Elektrodenfertigung, Benötigtes Personal Elektrode)	Dmnl
Fluktuationsrate Personal = IF THEN ELSE(Standort = 0, 96, 48)	Monat
init Personal Elektrode = 19	Personal
Landestypische Arbeitszeit = IF THEN ELSE(Standort = 0, 0,1)	Std/(Monat* Personal)
Maximale Produktionsrate Personal Elektrode = Aufträge Gesamt*Erfüllungsgrad Elektrode	kWh/Monat
Personal Elektrodenfertigung = INTEG (Einstellrate Elektrodenfertigung-Ausscheidungsrate Elektrodenfertigung,init Personal Elektrode)	Personal
Produktionsrate Elektroden = DELAY FIXED (Maximale Produktionsrate Personal Elektrode, Fluktuationsrate Personal, 1)	kWh/Monat
Produzierte Elektroden = INTEG (Elektrodenproduktion-Produktionsrate Elektroden,0)	kWh

Stunden pro Monat = IF THEN ELSE(Landestypische Arbeitszeit = 0, 166,200)	(Std/Monat)/ Personal
Zukauf von Zellen = IF THEN ELSE(Fertigungstiefe = 0 :OR: Fertigungstiefe = 2, 0, 1)	Dmnl

Subsektor Recycling

Anpassungsfaktor Lohnkosten Recycling an Länder = Lohnkosten/Lohnkosten Recycling Base	Dmnl
Batteriekapazität je BEV = 21.6	kWh/Fzg
Batteriekapazität je HEV = 1.35	kWh/Fzg
Batteriekapazität je PHEV = 7.1	kWh/Fzg
Batteriemasse BEV = 0.33	t/Fzg
Batteriemasse HEV = 0.033	t/Fzg
Batteriemasse PHEV = 0.165	t/Fzg
BEV Batterierecyclingrate = Obsolenz BEV	Fzg/Monat
BEV Recycling kWh = Batteriekapazität je BEV*Pot BEV Recycling*Rücklauf Fzg Obsolet	kWh/Monat
BEVäqui BEV = 1	BEVäqui/Fzg
BEVäqui HEV = 0.1	BEVäqui/Fzg
BEVäqui PHEV = 0.33	BEVäqui/Fzg
Bezugseinheit Lohnkosten bei Recycling = 1	€/t
Deckungsbeitrag Stofffluss Demontage = 439	€/t
Deckungsbeitrag Stofffluss Mech Aufbereitungsrate = 340	€/t
Deckungsbeitrag Stofffluss NMC Hydro Aufbereitungsrate = 623	€/t
Degressionsfaktor Demontage = 0.67	Dmnl
Degressionsfaktor Hydro Aufbereitung = 0.5	Dmnl
Degressionsfaktor Mech Aufbereitung = 0.38	Dmnl
Degressionsfaktor Umschlag = 0.62	Dmnl
Demontage Base Kapa = 6000/12	BEVäqui/Monat
Demontagerate = SammelrateUmschlagzentrum	BEVäqui/Monat
Demontagerate = INTEG (Demontagerate-"Mech. Aufbereitungsrate",0)	BEVäqui
Eigener Marktanteil = Fixer Marktanteil+IF THEN ELSE(Statischer Marktanteil = 1, 0, Leistungsabhängiger Marktanteil)	Dmnl
Eigener Marktanteil an Recyclingbatterien = DELAY FIXED (Eigener Marktanteil, 120, Eigener Marktanteil)	Dmnl
Einheit Gewicht Batteriesystem je Fzg = 1	t/Fzg
Ergebnis Recycling pro kWh gesamt = ((Gesamtdeckungsbeitrag-Gesamtfixkosten)*Szenarioabhängige Reyclingerlöse)/(HEV Recycling kWh+PHEV Recycling kWh+BEV Recycling kWh)	€/kWh
Fixkosten Demontage = (Kalkulatorische Kosten Demontage Base+Pagatorische Kosten Demontage Base)*(Demontagerate/Demontage Base Kapa)^Degressionsfaktor Demontage	€/Monat
Fixkosten Hydro Aufbereitung = (Kalkulatorische Kosten Hydro Aufbereitung Base+Pagatorische Kosten Hydro Aufbereitung Base)*(Hydrometallurgische Aufbereitungsrate/Hydro Aufbereitung Base Kapa)^Degressionsfaktor Hydro Aufbereitung	€/Monat
Fixkosten Mech Aufbereitung = (Kalkulatorische Kosten Mech Aufbereitung Base+Pagatorische Kosten Mech Aufbereitung Base)*("Mech. Aufbereitungsrate"/Mech Aufbereitung Base Kapa)^Degressionsfaktor Mech Aufbereitung	€/Monat

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Fixkosten Umschlag = (Kalkulatorische Kosten Umschlag Base+Pagatorische Kosten Umschlag Base)*(SammelrateUmschlagzentrum/Umschlag Base Kapa)^Degressionsfaktor Umschlag	€/Monat
Geamtdeckungsbeitrag = Gesamt Mech Aufbereitungsrate+Gesamt Hydro Aufbereitungsrate+Gesamt Demontage	€/Monat
Geamtergebnis = INTEG (Geamtdeckungsbeitrag-Gesamtfixkosten,0)	€
Gesamt BEVÄquivalente in t = (Pot BEV Recycling*Batteriemasse BEV+Pot HEV Recycling*Batteriemasse HEV+Pot PHEV Recycling*Batteriemasse PHEV)/1000	t/Monat
Gesamt BEVÄquivalente = (Pot BEV Recycling*BEVäqui BEV+Pot PHEV Recycling*BEVäqui PHEV+Pot HEV Recycling*BEVäqui HEV)*Rücklauf Fzg Obsolet	BEVäqui/Monat
Gesamt Demontage = (Deckungsbeitrag Stofffluss Demontage-"Lohn/Energie Demontage"-Transport Demontage)*Materialrate Batteriesysteme Demontage	€/Monat
Gesamt Hydro Aufbereitungsrate = (Deckungsbeitrag Stofffluss NMC Hydro Aufbereitungsrate-"Lohn/Energie Hydro Aufbereitungsrate"-Transport Hydro Aufbereitungsrate)*Materialrate Batteriesysteme Hydro Aufbereitungsrate	€/Monat
Gesamt Mech Aufbereitungsrate = (Deckungsbeitrag Stofffluss Mech Aufbereitungsrate-"Lohn/Energie Mech Aufbereitungsrate"-Transport Mech Aufbereitungsrate)*Materialrate Batteriesysteme Mech Aufbereitungsrate	€/Monat
Gesamtfixkosten = Fixkosten Hydro Aufbereitung+Fixkosten Demontage+Fixkosten Mech Aufbereitung+Fixkosten Umschlag	€/Monat
Gewicht BEVÄqui = 0.33	t/BEVäqui
HEV Batterierecyclingrate = Obsolenz HEV*Produktportfolio	Fzg/Monat
HEV Recycling kWh = Pot HEV Recycling*Batteriekapazität je HEV*Rücklauf Fzg Obsolet	kWh/Monat
Hydro Aufbereitung Base Kapa = 62500/12	BEVäqui/Monat
Hydrometallurgische Aufbereitung = INTEG (Hydrometallurgische Aufbereitungsrate,0)	BEVäqui
Hydrometallurgische Aufbereitungsrate = "Mech. Aufbereitungsrate"	BEVäqui/Monat
Kalkulatorische Kosten Demontage Base = 46985/12	€/Monat
Kalkulatorische Kosten Hydro Aufbereitung Base = 1e+006/12	€/Monat
Kalkulatorische Kosten Mech Aufbereitung Base = 201272/12	€/Monat
Kalkulatorische Kosten Umschlag Base = 25313/12	€/Monat
Kobaltsulfate = Übergangssalze*5.51	t/Monat
Lohn/Energie Demontage = 239*Anpassungsfaktor Lohnkosten Recycling an Länder*Bezugseinheit Lohnkosten bei Recycling	€/t
Lohn/Energie Hydro Aufbereitungsrate = 60*Anpassungsfaktor Lohnkosten Recycling an Länder*Bezugseinheit Lohnkosten bei Recycling	€/t
Lohn/Energie Mech Aufbereitungsrate = 20*Anpassungsfaktor Lohnkosten Recycling an Länder*Bezugseinheit Lohnkosten bei Recycling	€/t
Lohnkosten = IF THEN ELSE(Standort = 0, 12.8, 3.4*Lookup Lohnkosten China)*Einheit Lohnkosten	€/Std
Lohnkosten Recycling Base = 20	€/Std
Mangansulfate = Übergangssalze*4.82	t/Monat
Materialrate Batteriesysteme Demontage = Demontagerate*Gewicht BEVÄqui	t/Monat
Materialrate Batteriesysteme Hydro Aufbereitungsrate = Hydrometallurgische Aufbereitungsrate*Gewicht BEVÄqui	t/Monat
Materialrate Batteriesysteme Mech Aufbereitungsrate = "Mech. Aufbereitungsrate"*Gewicht BEVÄqui	t/Monat
Mech Aufbereitung Base Kapa = 6000/12	BEVäqui/Monat

Mech. Aufbereitungsrate = Demontagerate	BEVäqui/Monat
Mechanisches Aufbereitungswerk = INTEG ("Mech. Aufbereitungsrate"-Hydrometallurgische Aufbereitungsrate,0)	BEVäqui
Nickelsulfate = Übergangssalze*5.31	t/Monat
Pagatorische Kosten Demontage Base = 226720/12	€/Monat
Pagatorische Kosten Hydro Aufbereitung Base = 1.35e+006/12	€/Monat
Pagatorische Kosten Mech Aufbereitung Base = 119612/12	€/Monat
Pagatorische Kosten Umschlag Base = 43089/12	€/Monat
PHEV Batterierecyclingrate = Obsolenz PHEV	Fzg/Monat
PHEV Recycling kWh = Batteriekapazität je PHEV*Pot PHEV Recycling*Rücklauf Fzg Obsolet	kWh/Monat
Pot BEV Recycling = Eigener Marktanteil an Recyclingbatterien*BEV Batterierecyclingrate	Fzg/Monat
Pot HEV Recycling = Eigener Marktanteil an Recyclingbatterien*HEV Batterierecyclingrate	Fzg/Monat
Pot PHEV Recycling = PHEV Batterierecyclingrate*Eigener Marktanteil an Recyclingbatterien	Fzg/Monat
Rücklauf Fzg Obsolet = IF THEN ELSE(Standort = 0, 0.75*Szenarioabhängige Recyclinrate, IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, 0.48*Szenarioabhängige Recyclinrate,0.6*Szenarioabhängige Recyclinrate))	Dmnl
SammelrateUmschlagzentrum = "Gesamt BEVÄquivalente"	BEVäqui/Monat
Strategiewahl = 3	Dmnl
Szenarioabhängige Recyclerlöse = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, 0.66, IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, 1.33, 1))	Dmnl
Szenariowahl = 2	Dmnl=OA1=EA2=Shock
Tonnen je BEVäqui = 0.3	tBEVÄqui=1/3Tonne
Transport Demontage = 5	€/t
Transport Hydro Aufbereitungsrate = 6	€/t
Transport Mech Aufbereitungsrate = 6	€/t
Umschlag Base Kapa = 10000/12	BEVäqui/Monat
Umschlaglager = INTEG (SammelrateUmschlagzentrum-Demontagerate,0)	BEVäqui
Übergangssalze = 0.184*Materialrate Batteriesysteme Hydro Aufbereitungsrate	t/Monat
Wirtschaftlichkeit pro t gesamt = ((Geamtdeckungsbeitrag-Gesamtfixkosten)*Szenarioabhängige Recyclerlöse)/("Gesamt BEVÄquivalente"*Tonnen je BEVäqui)	€/t
Wirtschaftlichkeit pro t gesamt auf kg Basis = (Geamtdeckungsbeitrag-Gesamtfixkosten)/(Rücklauf Fzg Obsolet*(Pot HEV Recycling*0.0275+Pot PHEV Recycling*0.0558+Pot BEV Recycling*0.14675)*Einheit Gewicht Batteriesystem je Fzg)	€/t

Subsektor Unternehmensskalierung

Aktivmaterial gesamt = (Aktivmaterial positiv pro kWh+Aktivmaterial negativ pro kWh)*Aufträge Gesamt	kg/Monat
Aktivmaterial negativ Base = 1.06037e+006/12	kg/Monat
Aktivmaterial negativ pro kWh = 1.062	kg/kWh
Aktivmaterial positiv Base = 1.71252e+006/12	kg/Monat
Aktivmaterial positiv pro kWh = 1.556	kg/kWh

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Anzahl produzierter Zellen Base = 6.31579e+006/12	Zellen/Monat
Anzahl Zellen = Aufträge aus HEV/(Batteriekapazität je HEV/Zellen pro Pack)+Aufträge aus PHEV/(Batteriekapazität je PHEV/Zellen pro Pack)+Aufträge aus BEV/(Batteriekapazität je BEV/Zellen pro Pack)	Zellen/Monat
Anzahl zu produzierender Zellen = Anzahl Zellen*Ausbeute Zelle gesamt	Zellen/Monat
Arbeitsaufwand für Elektrodenbeschichtung negatives Material = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base)^0.5*Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand für Elektrodenbeschichtung positives Material = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base)^0.5*Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand für sonstige Tätigkeiten = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Arbeitsaufwand Warenausgang+Arbeitsaufwand Wareneingang+Arbeitsaufwand zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss+Arbeitsaufwand zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung, (Arbeitsaufwand Warenausgang+Arbeitsaufwand Wareneingang)*0.006+Arbeitsaufwand zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss*0-1)	Std/Monat
Arbeitsaufwand Materialvorbereitung negatives Aktivmaterial = ((Aktivmaterial negativ pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial negativ Base)^0.5*Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand Materialvorbereitung positives Aktivmaterial = ((Aktivmaterial positiv pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial positiv Base)^0.5*Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand total = Arbeitsaufwand für sonstige Tätigkeiten+Arbeitsaufwand zur Elektrodenherstellung+Arbeitsaufwand zur Modulmontage+Arbeitsaufwand zur Packmontage und finalen Überprüfung+Arbeitsaufwand zur Zellherstellung	Std/Monat
Arbeitsaufwand Warenausgang = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base)^0.5*Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand Wareneingang = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base)^0.4*Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Anschweißen des Stromabnehmers = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base)^0.7*Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Einsetzen in den Zellcontainer = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base)^0.5*Arbeitszeit Base*3	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Elektrodenschneiden = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base)^0.5*Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Kalandern von negativem Aktivmaterial = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base)^0.5*Arbeitszeit Base	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Kalandern von positivem Aktivmaterial = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base)^0.5*Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Testen der Ladungserhaltung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base)^0.4*Arbeitszeit Base*3	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Trockenraummanagement = (Flächenbedarf Trockenraum/Flächenbedarf Trockenraum Base)^0.4*Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Vakuumtrocknen der Elektroden = (Aktivmaterial gesamt/(Aktivmaterial negativ Base+Aktivmaterial positiv Base))^0.5*Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Zellstapeln = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base)^0.7*Arbeitszeit Base*5	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base)^0.5*Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Betreibung eines Kontrolllabors = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base)^0.5*Arbeitszeit Base*4	Std/Monat

Arbeitsaufwand zur Elektrodenherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Arbeitsaufwand für Elektrodenbeschichtung negatives Material+Arbeitsaufwand für Elektrodenbeschichtung positives Material+Arbeitsaufwand Materialvorbereitung negatives Aktivmaterial+Arbeitsaufwand Materialvorbereitung positives Aktivmaterial+Arbeitsaufwand zum Kalandern von negativem Aktivmaterial+Arbeitsaufwand zum Kalandern von positivem Aktivmaterial+Arbeitsaufwand zur Lösungsmittelrückgewinnung, 0)	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur finalen Zellversiegelung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Formierung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7} *Arbeitszeit Base*8	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Lösungsmittelrückgewinnung = ((Binderlösemittel NMP pro kWh*Aufträge Gesamt)/Bindemittelrückgewinnung Base) ^{0.4} *Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Modulmontage = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*6	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Packmontage und finalen Überprüfung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*6	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7} *Arbeitszeit Base*5	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Zellherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Arbeitsaufwand zum Anschweißen des Stromabnehmers+Arbeitsaufwand zum Einsetzen in den Zellcontainer+Arbeitsaufwand zum Elektrodenschneiden+Arbeitsaufwand zum Testen der Ladungserhaltung+Arbeitsaufwand zum Trockenraummanagement+Arbeitsaufwand zum Vakuumtrocknen der Elektroden+Arbeitsaufwand zum Zellstapeln+Arbeitsaufwand zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung+Arbeitsaufwand zur Betreuung eines Kontrollabors+Arbeitsaufwand zur finalen Zellversiegelung+Arbeitsaufwand zur Formierung, 0)	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.7} *Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitszeit Base = 7200/12	Std/Monat
Aufträge aus BEV = Benötigte Batteriekapazität BEV*Eigener Marktanteil	kWh/Monat
Aufträge aus HEV = Benötigte Batteriekapazität HEV*Eigener Marktanteil*Produktportfolio	kWh/Monat
Aufträge aus PHEV = Eigener Marktanteil*Benötigte Batteriekapazität PHEV	kWh/Monat
Aufträge Gesamt = Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV	kWh/Monat
Ausbeute Zelle gesamt = 1+1-Verbesserung Ausbeute Zelle	Dmnl
Ausrüstung für Elektrodenbeschichtung negatives Material = 8*(Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.8}	Dmnl
Ausrüstung für Elektrodenbeschichtung positives Material = 8*(Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.8}	Dmnl
Ausrüstung für Materialvorbereitung negativ = ((Aktivmaterial negativ pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial negativ Base) ^{0.7} *2	Dmnl
Ausrüstung für Materialvorbereitung positiv = ((Aktivmaterial positiv pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial positiv Base) ^{0.7} *2	Dmnl
Ausrüstung für sonstige Tätigkeiten = (IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Ausrüstung für Warenausgang+Ausrüstung für Wareneingang+Ausrüstung zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss+Ausrüstung zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung, (Ausrüstung für Warenausgang+Ausrüstung für Wareneingang)*0.006+Ausrüstung zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss*0.003))*Einheit Ausrüstung in Mio \$	Mio\$

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Ausrüstung für Warenausgang = $(\text{Aufträge Gesamt}/\text{Produzierte Zellkapazität Base})^{0.7*5}$	Dmnl
Ausrüstung für Wareneingang = $(\text{Aufträge Gesamt}/\text{Produzierte Zellkapazität Base})^{0.6*3.6}$	Dmnl
Ausrüstung total = $((\text{Ausrüstung für sonstige Tätigkeiten} + \text{Ausrüstung zur Elektrodenherstellung} + \text{Ausrüstung zur Modulmontage} + \text{Ausrüstung zur Packmontage und finalen Überprüfung} + \text{Ausrüstung zur Zellherstellung}) * \text{Umrechnungsfaktor Mio \$ in Mio €} * \text{IF THEN ELSE}(\text{Switch Korrekturfaktor Anlagenkosten} = 1, \text{Korrekturfaktor Anlagenkosten}, 1))$	Mio€
Ausrüstung zum Anschweißen des Stromabnehmers = $(\text{Anzahl zu produzierender Zellen}/\text{Anzahl produzierter Zellen Base})^{0.8*4}$	Dmnl
Ausrüstung zum Einsetzen in den Zellcontainer = $(\text{Anzahl zu produzierender Zellen}/\text{Anzahl produzierter Zellen Base})^{0.7*3}$	Dmnl
Ausrüstung zum Elektrodenschneiden = $(\text{Elektrodenfläche gesamt}/\text{Elektrodenfläche Base})^{0.7*2}$	Dmnl
Ausrüstung zum Kalandern von negativem Aktivmaterial = $(\text{Elektrodenfläche gesamt}/\text{Elektrodenfläche Base})^{0.7*1}$	Dmnl
Ausrüstung zum Kalandern von positivem Aktivmaterial = $(\text{Elektrodenfläche gesamt}/\text{Elektrodenfläche Base})^{0.7*1}$	Dmnl
Ausrüstung zum Testen der Ladungserhaltung = $(\text{Anzahl zu produzierender Zellen}/\text{Anzahl produzierter Zellen Base})^{0.7*4.75}$	Dmnl
Ausrüstung zum Trockenraummanagement = $(\text{Flächenbedarf Trockenraum}/\text{Flächenbedarf Trockenraum Base})^{0.6*20}$	Dmnl3
Ausrüstung zum Vakuumtrocknen der Elektroden = $(\text{Elektrodenfläche gesamt}/\text{Elektrodenfläche Base})^{0.7*1.6}$	Dmnl
Ausrüstung zum Zellstapeln = $4 * (\text{Anzahl zu produzierender Zellen}/\text{Anzahl produzierter Zellen Base})^{0.8} * (\text{Durchschnittliche Zellkapazität in Ah}/\text{Zellkapazität Base})^{0.3}$	Dmnl
Ausrüstung zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung = $(\text{Anzahl zu produzierender Zellen}/\text{Anzahl produzierter Zellen Base})^{0.7*5}$	Dmnl
Ausrüstung zur Betreuung eines Kontrollabors = $(\text{Aufträge Gesamt}/\text{Produzierte Zellkapazität Base})^{0.7*1.5}$	Dmnl
Ausrüstung zur Elektrodenherstellung = $\text{IF THEN ELSE}(\text{Zukauf von Zellen} = 0, \text{Ausrüstung für Elektrodenbeschichtung negatives Material} + \text{Ausrüstung für Elektrodenbeschichtung positives Material} + \text{Ausrüstung für Materialvorbereitung negativ} + \text{Ausrüstung für Materialvorbereitung positiv} + \text{Ausrüstung zum Kalandern von negativem Aktivmaterial} + \text{Ausrüstung zum Kalandern von positivem Aktivmaterial} + \text{Ausrüstung zur Lösungsmittelrückgewinnung}, 0) * \text{Einheit Ausrüstung in Mio \$} * \text{Korrekturfaktor Kapa aufträge}$	Mio\$
Ausrüstung zur finalen Zellversiegelung = $(\text{Anzahl zu produzierender Zellen}/\text{Anzahl produzierter Zellen Base})^{0.7*2}$	Dmnl
Ausrüstung zur Formierung = $30 * (\text{Anzahl zu produzierender Zellen}/\text{Anzahl produzierter Zellen Base})^{0.8} * (\text{Durchschnittliche Zellkapazität in Ah}/\text{Zellkapazität Base})^{0.3}$	Dmnl
Ausrüstung zur Lösungsmittelrückgewinnung = $((\text{Binderlösemittel NMP pro kWh} * \text{Aufträge Gesamt}) / \text{Bindemittelrückgewinnung Base})^{0.6*3}$	Dmnl
Ausrüstung zur Modulmontage = $(\text{Anzahl zu produzierender Zellen}/\text{Anzahl produzierter Zellen Base})^{0.7*6} * \text{Einheit Ausrüstung in Mio \$} * \text{Korrekturfaktor Kapa aufträge}$	Mio\$
Ausrüstung zur Packmontage und finalen Überprüfung = $6 * (\text{Anzahl zu produzierender Zellen}/\text{Anzahl produzierter Zellen Base})^{0.7} * (\text{Durchschnittliche Modulanzahl}/\text{Durchschnittliche Modulanzahl Base})^{0.3} * \text{Einheit Ausrüstung in Mio \$} * \text{Korrekturfaktor Kapa aufträge}$	Mio\$

Ausrüstung zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7} *2.5	Dmnl
Ausrüstung zur Zellherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Ausrüstung zum Anschweißen des Stromabnehmers+Ausrüstung zum Einsetzen in den Zellcontainer+Ausrüstung zum Elektrodenschneiden+Ausrüstung zum Testen der Ladungserhaltung+Ausrüstung zum Trockenraummanagement+Ausrüstung zum Vakuumtrocknen der Elektroden+Ausrüstung zum Zellstapeln+Ausrüstung zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung+Ausrüstung zur Betreibung eines Kontrolllabors+Ausrüstung zur finalen Zellversiegelung+Ausrüstung zur Formierung, 0)*Einheit Ausrüstung in Mio \$*Korrekturfaktor Kapa aufträge	Mio\$
Ausrüstung zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.7} *1.5	Dmnl
Bindemittelrückgewinnung Base = 2.30902e+006/12	kg/Monat
Binderlösemittel NMP pro kWh = 2.098	kg/kWh
Dollarkurs = 0.735	€/§
Durchschnittliche Modulanzahl = (Aufträge aus HEV*8+Aufträge aus PHEV*6+Aufträge aus BEV*8)/Aufträge Gesamt	Dmnl
Durchschnittliche Modulanzahl Base = 4	Dmnl
Durchschnittliche Zellkapazität in Ah = (Aufträge aus HEV*Zellkapazität HEV+Aufträge aus PHEV*Zellkapazität PHEV+Aufträge aus BEV*Zellkapazität BEV)/Aufträge Gesamt	Ah
Einheit Ausrüstung in Mio \$ = 1	Mio\$
Einheit Flächenbedarf = 1	m ²
Elektrodenfläche Base = 8.20904e+006/12	m ² /Monat
Elektrodenfläche BEV = 7.74	m ² /kWh
Elektrodenfläche gesamt = ((Aufträge aus HEV*Elektrodenfläche HEV+Aufträge aus PHEV*Elektrodenfläche PHEV+Aufträge aus BEV*Elektrodenfläche BEV)*Ausbeute Zelle gesamt)	m ² /Monat
Elektrodenfläche HEV = 70.14	m ² /kWh
Elektrodenfläche PHEV = 12.8	m ² /kWh
Fertigungstiefe = WITH LOOKUP (Strategiewahl,(((0,0)-(10,10)),(1,2),(2,1),(3,2),(4,1),(5,0),(6,0)))	Dmnl
Flächenbedarf für Elektrodenbeschichtung negatives Material = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.8} *750	Dmnl
Flächenbedarf für Elektrodenbeschichtung positives Material = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.8} *750	Dmnl
Flächenbedarf für Materialvorbereitung negativ = ((Aktivmaterial negativ pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial negativ Base) ^{0.6} *600	Dmnl
Flächenbedarf für Materialvorbereitung positiv = ((Aktivmaterial positiv pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial positiv Base) ^{0.6} *600	Dmnl
Flächenbedarf für sonstige Tätigkeiten = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Flächenbedarf für Warenausgang+Flächenbedarf für Wareneingang+Flächenbedarf zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss+Flächenbedarf zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung, (Flächenbedarf für Warenausgang+Flächenbedarf für Wareneingang)*0.01+Flächenbedarf zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss*0.005)	Dmnl
Flächenbedarf für Warenausgang = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.6} *900	Dmnl
Flächenbedarf für Wareneingang = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.5} *900	Dmnl

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Flächenbedarf installiert = INTEG (Flächeninstallationsrate,15425)	m ²
Flächenbedarf total = ((Flächenbedarf für sonstige Tätigkeiten+Flächenbedarf zur Elektrodenherstellung+Flächenbedarf zur Modulmontage+Flächenbedarf zur Packmontage und finalen Überprüfung+Flächenbedarf zur Zellherstellung)*Einheit Flächenbedarf)*Korrekturfaktor Kapa aufträge	m ²
Flächenbedarf Trockenraum = (Flächenbedarf zum Anschweißen des Stromabnehmers+Flächenbedarf zum Einsetzen in den Zellkontainer+Flächenbedarf zum Zellstapeln+Flächenbedarf zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung+Flächenbedarf zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung*1/3)*Einheit Flächenbedarf	m ²
Flächenbedarf Trockenraum Base = 3000	m ²
Flächenbedarf zum Anschweißen des Stromabnehmers = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.8} *600	Dmnl
Flächenbedarf zum Einsetzen in den Zellkontainer = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *600	Dmnl
Flächenbedarf zum Elektrodenschneiden = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.6} *300	Dmnl
Flächenbedarf zum Kalandern von negativem Aktivmaterial = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.6} *225	Dmnl
Flächenbedarf zum Kalandern von positivem Aktivmaterial = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.6} *225	Dmnl
Flächenbedarf zum Testen der Ladungserhaltung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *900	Dmnl
Flächenbedarf zum Trockenraummanagement = (Flächenbedarf Trockenraum/Flächenbedarf Trockenraum Base) ^{0.4} *100	Dmnl
Flächenbedarf zum Vakuumtrocknen der Elektroden = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.6} *300	Dmnl
Flächenbedarf zum Zellstapeln = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.8} *600	Dmnl
Flächenbedarf zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *900	Dmnl
Flächenbedarf zur Betreuung eines Kontrollabors = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.6} *300	Dmnl
Flächenbedarf zur Elektrodenherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Flächenbedarf für Elektrodenbeschichtung negatives Material+Flächenbedarf für Elektrodenbeschichtung positives Material+Flächenbedarf für Materialvorbereitung negativ+Flächenbedarf für Materialvorbereitung positiv+Flächenbedarf zum Kalandern von negativem Aktivmaterial+Flächenbedarf zum Kalandern von positivem Aktivmaterial+Flächenbedarf zur Lösungsmittelrückgewinnung, 0)	Dmnl
Flächenbedarf zur finalen Zellversiegelung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *450	Dmnl
Flächenbedarf zur Formierung = 2200*(Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.8}	Dmnl
Flächenbedarf zur Lösungsmittelrückgewinnung = ((Binderlösemittel NMP pro kWh*Aufträge Gesamt)/Bindemittelrückgewinnung Base) ^{0.6} *225	Dmnl
Flächenbedarf zur Modulmontage = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *600	Dmnl
Flächenbedarf zur Packmontage und finalen Überprüfung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *900	Dmnl
Flächenbedarf zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *600	Dmnl

Flächenbedarf zur Zellherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Flächenbedarf zum Anschweißen des Stromabnehmers+Flächenbedarf zum Einsetzen in den Zellcontainer+Flächenbedarf zum Elektrodenschneiden+Flächenbedarf zum Testen der Ladungserhaltung+Flächenbedarf zum Trockenraummanagement+Flächenbedarf zum Vakuumtrocknen der Elektroden+Flächenbedarf zum Zellstapeln+Flächenbedarf zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung+Flächenbedarf zur Betreuung eines Kontrollabors+Flächenbedarf zur finalen Zellversiegelung+Flächenbedarf zur Formierung, 0)	Dmnl
Flächenbedarf zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base)^0.6*900	Dmnl
Flächeninstallationsrate = IF THEN ELSE(Flächenbedarf installiert<Flächenbedarf total, Maximale Flächeninstallationsrate, 0)	m ² /Monat
Installierte Anlagekapazität Elektrode = Installierte Anlagen Kapazität Elektrode	kWh/Monat
Konstruktionsdauer = 1	Monat
Korrekturfaktor Anlagenkosten = WITH LOOKUP (MAX(Time*Smoothreg, 1),((0,0)-(200,10)),(1,1.25),(72,1),(200,1))	Dmnl
Korrekturfaktor Kapa aufträge = IF THEN ELSE(Strategiewahl = 5, MIN(SMOOTH(Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität/Aufträge Gesamt, 1), 5),SMOOTH(Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität/Aufträge Gesamt,1))	Dmnl
Maximale Flächeninstallationsrate = (Flächenbedarf total-Flächenbedarf installiert)/Konstruktionsdauer	m ² /Monat
Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität = Installierte Anlagekapazität Elektrode	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate System Anlagenkapazität = Installierte Anlagekapazität Pack	kWh/Monat
Produzierte Zellkapazität Base = 869416/12	kWh/Monat
Smoothreg = 1	1/Monat
Strategiewahl = 3	Dmnl
Switch Korrekturfaktor Anlagenkosten = 1	Dmnl
Umrechnungsfaktor Mio \$ in Mio € = 0.735	Mio€/Mio\$
Umrechnungsfaktor Mio € in € = 1e+006	€/Mio€
Zellkapazität Base = 40	Ah
Zellkapazität BEV = 61.257	Ah
Zellkapazität HEV = 3.75	Ah
Zellkapazität PHEV = 19.96	Ah
Zukauf von Zellen = IF THEN ELSE(Fertigungstiefe = 0 :OR: Fertigungstiefe = 2, 0, 1)	Dmnl
Aktivmaterial gesamt = (Aktivmaterial positiv pro kWh+Aktivmaterial negativ pro kWh)*Aufträge Gesamt	kg/Monat
Aktivmaterial negativ Base = 1.06037e+006/12	kg/Monat
Aktivmaterial negativ pro kWh = 1.062	kg/kWh
Aktivmaterial positiv Base = 1.71252e+006/12	kg/Monat
Aktivmaterial positiv pro kWh = 1.556	kg/kWh
Anzahl produzierter Zellen Base = 6.31579e+006/12	Zellen/Monat
Anzahl Zellen = Aufträge aus HEV/(Batteriekapazität je HEV/Zellen pro Pack)+Aufträge aus PHEV/(Batteriekapazität je PHEV/Zellen pro Pack)+Aufträge aus BEV/(Batteriekapazität je BEV/Zellen pro Pack)	Zellen/Monat

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Anzahl zu produzierender Zellen = Anzahl Zellen*Ausbeute Zelle gesamt	Zellen/Monat
Arbeitsaufwand für Elektrodenbeschichtung negatives Material = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand für Elektrodenbeschichtung positives Material = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand für sonstige Tätigkeiten = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Arbeitsaufwand Warenausgang+Arbeitsaufwand Wareneingang+Arbeitsaufwand zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss+Arbeitsaufwand zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung, (Arbeitsaufwand Warenausgang+Arbeitsaufwand Wareneingang)*0.006+Arbeitsaufwand zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss*0-1)	Std/Monat
Arbeitsaufwand Materialvorbereitung negatives Aktivmaterial = ((Aktivmaterial negativ pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial negativ Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand Materialvorbereitung positives Aktivmaterial = ((Aktivmaterial positiv pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial positiv Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand total = Arbeitsaufwand für sonstige Tätigkeiten+Arbeitsaufwand zur Elektrodenherstellung+Arbeitsaufwand zur Modulmontage+Arbeitsaufwand zur Packmontage und finalen Überprüfung+Arbeitsaufwand zur Zellherstellung	Std/Monat
Arbeitsaufwand Warenausgang = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand Wareneingang = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.4} *Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Anschweißen des Stromabnehmers = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7} *Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Einsetzen in den Zellcontainer = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*3	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Elektrodenschneiden = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Kalandern von negativem Aktivmaterial = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Kalandern von positivem Aktivmaterial = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Testen der Ladungserhaltung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.4} *Arbeitszeit Base*3	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Trockenraummanagement = (Flächenbedarf Trockenraum/Flächenbedarf Trockenraum Base) ^{0.4} *Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Vakuumtrocknen der Elektroden = (Aktivmaterial gesamt/(Aktivmaterial negativ Base+Aktivmaterial positiv Base)) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zum Zellstapeln = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7} *Arbeitszeit Base*5	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Betreuung eines Kontrolllabors = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Elektrodenherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Arbeitsaufwand für Elektrodenbeschichtung negatives Material+Arbeitsaufwand für Elektrodenbeschichtung positives Material+Arbeitsaufwand Materialvorbereitung negatives Aktivmaterial+Arbeitsaufwand Materialvorbereitung positives Aktivmaterial+Arbeitsaufwand zum Kalandern von negativem Aktivmaterial+Arbeitsaufwand	Std/Monat

zum Kalandern von positivem Aktivmaterial+Arbeitsaufwand zur Lösungsmittelrückgewinnung, 0)	
Arbeitsaufwand zur finalen Zellversiegelung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Formierung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7} *Arbeitszeit Base*8	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Lösungsmittelrückgewinnung = ((Binderlösemittel NMP pro kWh*Aufträge Gesamt)/Bindemittelrückgewinnung Base) ^{0.4} *Arbeitszeit Base*2	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Modulmontage = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*6	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Packmontage und finalen Überprüfung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.5} *Arbeitszeit Base*6	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7} *Arbeitszeit Base*5	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur Zellherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Arbeitsaufwand zum Anschweißen des Stromabnehmers+Arbeitsaufwand zum Einsetzen in den Zellkontainer+Arbeitsaufwand zum Elektrodenschneiden+Arbeitsaufwand zum Testen der Ladungserhaltung+Arbeitsaufwand zum Trockenraummanagement+Arbeitsaufwand zum Vakuumtrocknen der Elektroden+Arbeitsaufwand zum Zellstapeln+Arbeitsaufwand zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung+Arbeitsaufwand zur Betreibung eines Kontrollabors+Arbeitsaufwand zur finalen Zellversiegelung+Arbeitsaufwand zur Formierung, 0)	Std/Monat
Arbeitsaufwand zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.7} *Arbeitszeit Base*4	Std/Monat
Arbeitszeit Base = 7200/12	Std/Monat
Aufträge aus BEV = Benötigte Batteriekapazität BEV*Eigener Marktanteil	kWh/Monat
Aufträge aus HEV = Benötigte Batteriekapazität HEV*Eigener Marktanteil*Produktportfolio	kWh/Monat
Aufträge aus PHEV = Eigener Marktanteil*Benötigte Batteriekapazität PHEV	kWh/Monat
Aufträge Gesamt = Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV	kWh/Monat
Ausbeute Zelle gesamt = 1+1-Verbesserung Ausbeute Zelle	Dmnl
Ausrüstung für Elektrodenbeschichtung negatives Material = 8*(Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.8}	Dmnl
Ausrüstung für Elektrodenbeschichtung positives Material = 8*(Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.8}	Dmnl
Ausrüstung für Materialvorbereitung negativ = ((Aktivmaterial negativ pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial negativ Base) ^{0.7} *2	Dmnl
Ausrüstung für Materialvorbereitung positiv = ((Aktivmaterial positiv pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial positiv Base) ^{0.7} *2	Dmnl
Ausrüstung für sonstige Tätigkeiten = (IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Ausrüstung für Warenausgang+Ausrüstung für Wareneingang+Ausrüstung zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss+Ausrüstung zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung, (Ausrüstung für Warenausgang+Ausrüstung für Wareneingang)*0.006+Ausrüstung zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss*0.003))*Einheit Ausrüstung in Mio \$	Mio\$
Ausrüstung für Warenausgang = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.7} *5	Dmnl
Ausrüstung für Wareneingang = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.6} *3.6	Dmnl
Ausrüstung total = ((Ausrüstung für sonstige Tätigkeiten+Ausrüstung zur Elektrodenherstellung+Ausrüstung zur Modulmontage+Ausrüstung zur Packmontage und	Mio€

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

finalen Überprüfung+Ausrüstung zur Zellherstellung)*Umrechnungsfaktor Mio \$ in Mio €*IF THEN ELSE(Switch Korrekturfaktor Anlagenkosten = 1, Korrekturfaktor Anlagenkosten, 1))	
Ausrüstung zum Anschweißen des Stromabnehmers = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.8*4}	Dmnl
Ausrüstung zum Einsetzen in den Zellkontainer = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7*3}	Dmnl
Ausrüstung zum Elektrodenschneiden = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.7*2}	Dmnl
Ausrüstung zum Kalandern von negativem Aktivmaterial = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.7*1}	Dmnl
Ausrüstung zum Kalandern von positivem Aktivmaterial = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.7*1}	Dmnl
Ausrüstung zum Testen der Ladungserhaltung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7*4.75}	Dmnl
Ausrüstung zum Trockenraummanagement = (Flächenbedarf Trockenraum/Flächenbedarf Trockenraum Base) ^{0.6*20}	Dmnl
Ausrüstung zum Vakuumtrocknen der Elektroden = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.7*1.6}	Dmnl
Ausrüstung zum Zellstapeln = 4*(Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.8*(Durchschnittliche Zellkapazität in Ah/Zellkapazität Base)^{0.3}}	Dmnl
Ausrüstung zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7*5}	Dmnl
Ausrüstung zur Betreuung eines Kontrollabors = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.7*1.5}	Dmnl
Ausrüstung zur Elektrodenherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Ausrüstung für Elektrodenbeschichtung negatives Material+Ausrüstung für Elektrodenbeschichtung positives Material+Ausrüstung für Materialvorbereitung negativ+Ausrüstung für Materialvorbereitung positiv+Ausrüstung zum Kalandern von negativem Aktivmaterial+Ausrüstung zum Kalandern von positivem Aktivmaterial+Ausrüstung zur Lösungsmittelrückgewinnung, 0)*Einheit Ausrüstung in Mio \$*Korrekturfaktor Kapa aufträge	Mio\$
Ausrüstung zur finalen Zellversiegelung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7*2}	Dmnl
Ausrüstung zur Formierung = 30*(Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.8*(Durchschnittliche Zellkapazität in Ah/Zellkapazität Base)^{0.3}}	Dmnl
Ausrüstung zur Lösungsmittelrückgewinnung = ((Binderlösemittel NMP pro kWh*Aufträge Gesamt)/Bindemittelrückgewinnung Base) ^{0.6*3}	Dmnl
Ausrüstung zur Modulmontage = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7*6} *Einheit Ausrüstung in Mio \$*Korrekturfaktor Kapa aufträge	Mio\$
Ausrüstung zur Packmontage und finalen Überprüfung = 6*(Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7*(Durchschnittliche Modulanzahl/Durchschnittliche Modulanzahl Base)^{0.3}} *Einheit Ausrüstung in Mio \$*Korrekturfaktor Kapa aufträge	Mio\$
Ausrüstung zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.7*2.5}	Dmnl
Ausrüstung zur Zellherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Ausrüstung zum Anschweißen des Stromabnehmers+Ausrüstung zum Einsetzen in den Zellkontainer+Ausrüstung zum Elektrodenschneiden+Ausrüstung zum Testen der Ladungserhaltung+Ausrüstung zum Trockenraummanagement+Ausrüstung zum	Mio\$

Vakuumtrocknen der Elektroden+Ausrüstung zum Zellstapeln+Ausrüstung zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung+Ausrüstung zur Betreibung eines Kontrollabors+Ausrüstung zur finalen Zellversiegelung+Ausrüstung zur Formierung, 0)*Einheit Ausrüstung in Mio \$*Korrekturfaktor Kapa aufträge	
Ausrüstung zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.7} *1.5	Dmnl
Bindemittelrückgewinnung Base = 2.30902e+006/12	kg/Monat
Binderlösemittel NMP pro kWh = 2.098	kg/kWh
Durchschnittliche Modulanzahl = (Aufträge aus HEV*8+Aufträge aus PHEV*6+Aufträge aus BEV*8)/Aufträge Gesamt	Dmnl
Durchschnittliche Modulanzahl Base = 4	Dmnl
Durchschnittliche Zellkapazität in Ah = (Aufträge aus HEV*Zellkapazität HEV+Aufträge aus PHEV*Zellkapazität PHEV+Aufträge aus BEV*Zellkapazität BEV)/Aufträge Gesamt	Ah
Einheit Ausrüstung in Mio \$ = 1	Mio\$
Einheit Flächenbedarf = 1	m ²
Elektrodenfläche Base = 8.20904e+006/12	m ² /Monat
Elektrodenfläche BEV = 7.74	m ² /kWh
Elektrodenfläche gesamt = ((Aufträge aus HEV*Elektrodenfläche HEV+Aufträge aus PHEV*Elektrodenfläche PHEV+Aufträge aus BEV*Elektrodenfläche BEV)*Ausbeute Zelle gesamt)	m ² /Monat
Elektrodenfläche HEV = 70.14	m ² /kWh
Elektrodenfläche PHEV = 12.8	m ² /kWh
Fertigungstiefe = WITH LOOKUP (Strategiewahl,(((0,0)-(10,10)),(1,2),(2,1),(3,2),(4,1),(5,0),(6,0)))	Dmnl
Flächenbedarf für Elektrodenbeschichtung negatives Material = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.8} *750	Dmnl
Flächenbedarf für Elektrodenbeschichtung positives Material = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.8} *750	Dmnl
Flächenbedarf für Materialvorbereitung negativ = ((Aktivmaterial negativ pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial negativ Base) ^{0.6} *600	Dmnl
Flächenbedarf für Materialvorbereitung positiv = ((Aktivmaterial positiv pro kWh*Aufträge Gesamt)/Aktivmaterial positiv Base) ^{0.6} *600	Dmnl
Flächenbedarf für sonstige Tätigkeiten = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Flächenbedarf für Warenausgang+Flächenbedarf für Wareneingang+Flächenbedarf zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss+Flächenbedarf zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung, (Flächenbedarf für Warenausgang+Flächenbedarf für Wareneingang)*0.01+Flächenbedarf zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss*0.005)	Dmnl
Flächenbedarf für Warenausgang = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.6} *900	Dmnl
Flächenbedarf für Wareneingang = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.5} *900	Dmnl
Flächenbedarf installiert = INTEG (Flächeninstallationsrate,15425)	m ²
Flächenbedarf total = ((Flächenbedarf für sonstige Tätigkeiten+Flächenbedarf zur Elektrodenherstellung+Flächenbedarf zur Modulmontage+Flächenbedarf zur Packmontage und finalen Überprüfung+Flächenbedarf zur Zellherstellung)*Einheit Flächenbedarf)*Korrekturfaktor Kapa aufträge	m ²
Flächenbedarf Trockenraum = (Flächenbedarf zum Anschweißen des Stromabnehmers+Flächenbedarf zum Einsetzen in den Zellkontainer+Flächenbedarf zum Zellstapeln+Flächenbedarf zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung+Flächenbedarf	m ²

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung*1/3)*Einheit Flächenbedarf	
Flächenbedarf Trockenraum Base = 3000	m ²
Flächenbedarf zum Anschweißen des Stromabnehmers = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.8} *600	Dmnl
Flächenbedarf zum Einsetzen in den Zellcontainer = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *600	Dmnl
Flächenbedarf zum Elektrodenschneiden = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.6} *300	Dmnl
Flächenbedarf zum Kalandern von negativem Aktivmaterial = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.6} *225	Dmnl
Flächenbedarf zum Kalandern von positivem Aktivmaterial = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.6} *225	Dmnl
Flächenbedarf zum Testen der Ladungserhaltung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *900	Dmnl
Flächenbedarf zum Trockenraummanagement = (Flächenbedarf Trockenraum/Flächenbedarf Trockenraum Base) ^{0.4} *100	Dmnl
Flächenbedarf zum Vakuumtrocknen der Elektroden = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base) ^{0.6} *300	Dmnl
Flächenbedarf zum Zellstapeln = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.8} *600	Dmnl
Flächenbedarf zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *900	Dmnl
Flächenbedarf zur Betreuung eines Kontrollabors = (Aufträge Gesamt/Produzierte Zellkapazität Base) ^{0.6} *300	Dmnl
Flächenbedarf zur Elektrodenherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Flächenbedarf für Elektrodenbeschichtung negatives Material+Flächenbedarf für Elektrodenbeschichtung positives Material+Flächenbedarf für Materialvorbereitung negativ+Flächenbedarf für Materialvorbereitung positiv+Flächenbedarf zum Kalandern von negativem Aktivmaterial+Flächenbedarf zum Kalandern von positivem Aktivmaterial+Flächenbedarf zur Lösungsmittelrückgewinnung, 0)	Dmnl
Flächenbedarf zur finalen Zellversiegelung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *450	Dmnl
Flächenbedarf zur Formierung = 2200*(Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.8}	Dmnl
Flächenbedarf zur Lösungsmittelrückgewinnung = ((Binderlösemittel NMP pro kWh*Aufträge Gesamt)/Bindemittelrückgewinnung Base) ^{0.6} *225	Dmnl
Flächenbedarf zur Modulmontage = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *600	Dmnl
Flächenbedarf zur Packmontage und finalen Überprüfung = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *900	Dmnl
Flächenbedarf zur Sammlung von recyclingfähigem Abfall und Ausschuss = (Anzahl zu produzierender Zellen/Anzahl produzierter Zellen Base) ^{0.6} *600	Dmnl
Flächenbedarf zur Zellherstellung = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Flächenbedarf zum Anschweißen des Stromabnehmers+Flächenbedarf zum Einsetzen in den Zellcontainer+Flächenbedarf zum Elektrodenschneiden+Flächenbedarf zum Testen der Ladungserhaltung+Flächenbedarf zum Trockenraummanagement+Flächenbedarf zum Vakuumtrocknen der Elektroden+Flächenbedarf zum Zellstapeln+Flächenbedarf zur Befüllung mit Elektrolyt und Versiegelung+Flächenbedarf zur Betreuung eines Kontrollabors+Flächenbedarf zur finalen Zellversiegelung+Flächenbedarf zur Formierung, 0)	Dmnl

Flächenbedarf zur zwischenprozesslichen Materialhandhabung = (Elektrodenfläche gesamt/Elektrodenfläche Base)^0.6*900	Dmnl
Flächeninstallationsrate = IF THEN ELSE(Flächenbedarf installiert<Flächenbedarf total, Maximale Flächeninstallationsrate, 0)	m ² /Monat
Installierte Anlagekapazität Elektrode = Installierte Anlagen Kapazität Elektrode	kWh/Monat
Konstruktionsdauer = 1	Monat
Korrekturfaktor Anlagenkosten = WITH LOOKUP (MAX(Time*Smoothreg, 1),((0,0)-(200,10)),(1,1.25),(72,1),(200,1))	Dmnl
Korrekturfaktor Kapa aufträge = IF THEN ELSE(Strategiewahl = 5, MIN(SMOOTH(Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität/Aufträge Gesamt, 1), 5),SMOOTH(Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität/Aufträge Gesamt,1))	Dmnl
Maximale Flächeninstallationsrate = (Flächenbedarf total-Flächenbedarf installiert)/Konstruktionsdauer	m ² /Monat
Maximale Produktionsrate Elektrode Anlagenkapazität = Installierte Anlagekapazität Elektrode	kWh/Monat
Maximale Produktionsrate System Anlagenkapazität = Installierte Anlagekapazität Pack	kWh/Monat
Produzierte Zellkapazität Base = 869416/12	kWh/Monat
Strategiewahl = 3	Dmnl
Switch Korrekturfaktor Anlagenkosten = 1	Dmnl
Umrechnungsfaktor Mio \$ in Mio € = 0.735	Mio€/Mio\$
Umrechnungsfaktor Mio € in € = 1e+006	€/Mio€
Zellkapazität Base = 40	Ah
Zellkapazität BEV = 61.257	Ah
Zellkapazität HEV = 3.75	Ah
Zellkapazität PHEV = 19.96	Ah
Zukauf von Zellen = IF THEN ELSE(Fertigungstiefe = 0 :OR: Fertigungstiefe = 2, 0, 1)	Dmnl

Subsektor Material- und Komponentenkosten

Anteil Elektrode = Kosten für Materialien auf Elektrodenebene/Kosten für komplettes Batteriesystem	Dmnl
Anteil Modul = Kosten für Batteriemodul/Kosten für komplettes Batteriesystem	Dmnl
Anteil System = 1	Dmnl
Anteil Zelle = Kosten auf Zelllevel/Kosten für komplettes Batteriesystem	Dmnl
Anzahl produzierter Zellen Base = 6.31579e+006/12	Zellen/Monat
Aufträge aus BEV = Benötigte Batteriekapazität BEV*Eigener Marktanteil	kWh/Monat
Aufträge aus HEV = Benötigte Batteriekapazität HEV*Eigener Marktanteil*Produktportfolio	kWh/Monat
Aufträge aus PHEV = Eigener Marktanteil*Benötigte Batteriekapazität PHEV	kWh/Monat
Aufträge Gesamt = Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV	kWh/Monat
Ausbeute Anodematerialien gesamt = (1+1-0.922)*Ausbeute Zelle gesamt	Dmnl
Ausbeute Elektrolyt gesamt = (1+1-0.94)	Dmnl
Ausbeute Kathodenmaterialien gesamt = (1+1-0.922)*Ausbeute Zelle gesamt	Dmnl
Ausbeute Separator gesamt = (1+1-0.98)	Dmnl
Ausbeute Stromabnehmer gesamt = (1+1-0.902)	Dmnl

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Ausbeute Zelle gesamt = 1+1-Verbesserung Ausbeute Zelle	Dmnl
Batteriekapazität je BEV = 21.6	kWh/Fzg
Batteriekapazität je HEV = 1.35	kWh/Fzg
Batteriekapazität je PHEV = 7.1	kWh/Fzg
Batteriesystemkosten pro kWh = Kosten für komplettes Batteriesystem/(Aufträge Gesamt-Verlustrate Aufträge)	\$/kWh
Kosten auf Zelllevel = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Kosten für Zukaufteile auf Zellebene+Kosten für Materialien auf Elektrodenebene+Kosten für negativer Zellelektrolyt gesamt+Kosten für positive Zellelektrolyt gesamt+Kosten für Elektrolytbedarf gesamt+Kosten für Separatorbedarf gesamt, 0)	\$/Monat
Kosten für Aktivmaterial neg pro kg = 19	\$/kg
Kosten für Aktivmaterial neg pro kWh = (1.062*Ausbeute Anodematerialien gesamt)*Kosten für Aktivmaterial neg pro kg*Einheit kg pro kWh	\$/kWh
Kosten für Aktivmaterial pos pro kg = 26	\$/kg
Kosten für Aktivmaterial pos pro kg auf kWh Basis = ((Produzierte Zellkapazität Base/((Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV)-Verlustrate Aufträge))^(1-0.95))*Kosten für Aktivmaterial pos pro kg	\$/kg
Kosten für Aktivmaterial pos pro kWh = (1.556*Ausbeute Kathodenmaterialien gesamt)*Kosten für Aktivmaterial pos pro kg auf kWh Basis*Einheit kg pro kWh	\$/kWh
Kosten für Aluminium Wärmeleiter gesamt = ((Aufträge aus HEV-Verlustrate HEV)/(Batteriekapazität je HEV/Zellen je Fahrzeug)+(Aufträge aus PHEV-Verlustrate PHEV)/(Batteriekapazität je PHEV/Zellen je Fahrzeug)+(Aufträge aus BEV-Verlustrate BEV)/(Batteriekapazität je BEV/Zellen je Fahrzeug))*Kosten für Aluminium Wärmeleiter pro Zelle	\$/Monat
Kosten für Aluminium Wärmeleiter pro Zelle = (Anzahl produzierter Zellen Base/(Produzierte Zellen pro Monat HEV+Produzierte Zellen pro Monat PHEV+Produzierte Zellen pro Monat BEV))^(1-0.8)*(Produzierte Zellen pro Monat HEV*0.129+Produzierte Zellen pro Monat PHEV*0.233+Produzierte Zellen pro Monat BEV*0.455)/(Produzierte Zellen pro Monat HEV+Produzierte Zellen pro Monat PHEV+Produzierte Zellen pro Monat BEV)*"Einheit \$/Zelle"	\$/Zellen
Kosten für Anodenmaterial gesamt = Kosten für Anodenmaterial pro kWh gesamt*((Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV)-Verlustrate Aufträge)	\$/Monat
Kosten für Anodenmaterial pro kWh gesamt = Kosten für Aktivmaterial neg pro kWh+Kosten für Binder pro kWh+Kosten für Binderlösemittel Wasser pro kWh+Kosten für Carbon Black pro kWh	\$/kWh
Kosten für Batteriemodul = (Kosten auf Zelllevel+Kosten für Materialien und Komponenten auf Modulebene)*IF THEN ELSE(Switch Materialteuerung = 0, 1, Materialteuerung)	\$/Monat
Kosten für Bedarf an Kohlenstoff pro kg = 6.8	\$/kg
Kosten für Bedarf an Kohlenstoff pro kWh = (0.105*Ausbeute Kathodenmaterialien gesamt)*Kosten für Bedarf an Kohlenstoff pro kg*Einheit kg pro kWh	\$/kWh
Kosten für Binder pro kg = 10	\$/kg
Kosten für Binder pro kWh = (0.056*Ausbeute Anodenmaterialien gesamt)*Kosten für Binder pro kg*Einheit kg pro kWh	\$/kWh
Kosten für Binder PVDF pro kg = 10	\$/kg
Kosten für Binder PVDF pro kWh = (0.087*Ausbeute Kathodenmaterialien gesamt)*Kosten für Binder PVDF pro kg*Einheit kg pro kWh	\$/kWh
Kosten für Binderlösemittel NMP pro kg = 3.2	\$/kg
Kosten für Binderlösemittel NMP pro kWh = (2.098*Ausbeute Kathodenmaterialien gesamt)*Kosten für Binderlösemittel NMP pro kg*Einheit kg pro kWh	\$/kWh

Kosten für Binderlösemittel Wasser pro kg = 0	\$/kg
Kosten für Binderlösemittel Wasser pro kWh = (1.341*Ausbeute Anodematerialien gesamt)*Kosten für Binderlösemittel Wasser pro kg*Einheit kg pro kWh	\$/kWh
Kosten für Carbon Black pro kg = 6.8	\$/kg
Kosten für Carbon Black pro kWh = (0*Ausbeute Anodematerialien gesamt)*Kosten für Carbon Black pro kg*Einheit kg pro kWh	\$/kWh
Kosten für das Thermomanagement = ((Aufträge aus HEV-Verlustrate HEV)*103.7+(Aufträge aus PHEV-Verlustrate PHEV)*28.17+(Aufträge aus BEV-Verlustrate BEV)*10.19)*"Einheit \$/kWh"	\$/Monat
Kosten für die Packintegration = ((Aufträge aus HEV-Verlustrate HEV)*174.07+(Aufträge aus PHEV-Verlustrate PHEV)*61.27+(Aufträge aus BEV-Verlustrate BEV)*21.99)*"Einheit \$/kWh"	\$/Monat
Kosten für Elektrolytbedarf gesamt = (((Aufträge aus BEV-Verlustrate BEV)*0.5958+(Aufträge aus PHEV-Verlustrate PHEV)*0.6548+(Aufträge aus HEV-Verlustrate HEV)*1.3415)*Ausbeute Elektrolyt gesamt*Ausbeute Zelle gesamt)*Kosten für Elektrolytbedarf pro kWh*Einheit l pro kWh	\$/Monat
Kosten für Elektrolytbedarf pro kWh = 21.6	\$/l
Kosten für Kathodenmaterial gesamt = ((Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV)-Verlustrate Aufträge)*Kosten für Kathodenmaterial pro kWh gesamt	\$/Monat
Kosten für Kathodenmaterial pro kWh gesamt = Kosten für Aktivmaterial pos pro kWh+Kosten für Bedarf an Kohlenstoff pro kWh+Kosten für Binder PVDF pro kWh+Kosten für Binderlösemittel NMP pro kWh	\$/kWh
Kosten für komplettes Batteriesystem = Kosten für Materialien und Komponenten auf Packebene+Kosten für das Thermomanagement+Kosten für die Packintegration+Kosten für Batteriemodul	\$/Monat
Kosten für Materialien auf Elektrodenebene = IF THEN ELSE(Zukauf von Zellen = 0, Kosten für Anodenmaterial gesamt+Kosten für Kathodenmaterial gesamt,0)	\$/Monat
Kosten für Materialien und Komponenten auf Modulebene = Kosten für Aluminium Wärmeleiter gesamt+Kosten für weitere Komponenten Modul	\$/Monat
Kosten für Materialien und Komponenten auf Packebene = ((Aufträge aus HEV-Verlustrate HEV)*98.07+(Aufträge aus PHEV-Verlustrate PHEV)*16.67+(Aufträge aus BEV-Verlustrate BEV)*12.29)*"Einheit \$/kWh"	\$/Monat
Kosten für negative Kontaktfahne pro Zelle = ((Anzahl produzierter Zellen Base/((Produzierte Zellen pro Monat HEV+Produzierte Zellen pro Monat PHEV+Produzierte Zellen pro Monat BEV)*Ausbeute Zelle gesamt))^(1-0.8)*0.31)*"Einheit \$/Zelle"	\$/Zellen
Kosten für negative Kontaktfahne Zelle gesamt = ((Produzierte Zellen pro Monat HEV+Produzierte Zellen pro Monat PHEV+Produzierte Zellen pro Monat BEV)*Ausbeute Zelle gesamt)*Kosten für negative Kontaktfahne pro Zelle	\$/Monat
Kosten für negativer Zelleableiter gesamt = (((Aufträge aus BEV-Verlustrate BEV)*4.426+(Aufträge aus PHEV-Verlustrate PHEV)*7.361+(Aufträge aus HEV-Verlustrate HEV)*40.844)*Ausbeute Stromabnehmer gesamt*Ausbeute Zelle gesamt)*Kosten für Negativer Zelleableiterbedarf pro m ² *Einheit m ² pro kWh	\$/Monat
Kosten für Negativer Zelleableiterbedarf pro m ² = 1.8	\$/m ²
Kosten für Negatives Binderlösemittel gelöst gesamt = 1.34*((Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV)-Verlustrate Aufträge)*Ausbeute Zelle gesamt*Einheit kg pro kWh	kg/Monat
Kosten für positive Kontaktfahne pro Zelle = (Anzahl produzierter Zellen Base/((Produzierte Zellen pro Monat HEV+Produzierte Zellen pro Monat PHEV+Produzierte Zellen pro Monat BEV)*Ausbeute Zelle gesamt))^(1-0.8)*0.26	\$/Zellen

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Kosten für positive Kontaktfahne Zelle gesamt = (Produzierte Zellen pro Monat HEV+Produzierte Zellen pro Monat PHEV+Produzierte Zellen pro Monat BEV)*Kosten für positive Kontaktfahne pro Zelle*Ausbeute Zelle gesamt	\$/Monat
Kosten für positive Zellableiter gesamt = (((Aufträge aus BEV-Verlustrate BEV)*4.029+(Aufträge aus PHEV-Verlustrate PHEV)*6.793+(Aufträge aus HEV-Verlustrate HEV)*38.279)*Ausbeute Stromabnehmer gesamt*Ausbeute Zelle gesamt)*Kosten für positive Zellableiterbedarf pro m ² *Einheit m ² pro kWh	\$/Monat
Kosten für positive Zellableiterbedarf pro m ² = 0.8	\$/m ²
Kosten für Positives Binderlösemittel gelöst gesamt = 2.1*((Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV)-Verlustrate Aufträge)*Ausbeute Zelle gesamt*Einheit kg pro kWh	kg/Monat
Kosten für Separatorbedarf gesamt = (((Aufträge aus BEV-Verlustrate BEV)*8.054+(Aufträge aus PHEV-Verlustrate PHEV)*13.661+(Aufträge aus HEV-Verlustrate HEV)*77.646)*Ausbeute Separator gesamt*Ausbeute Zelle gesamt)*Kosten für Separatorbedarf pro m ² *Einheit m ² pro kWh	\$/Monat
Kosten für Separatorbedarf pro m ² = 2	\$/m ²
Kosten für weitere Komponenten Modul = ((Aufträge aus HEV-Verlustrate HEV)*125.13+(Aufträge aus PHEV-Verlustrate PHEV)*25.75+(Aufträge aus BEV-Verlustrate BEV)*10.83)*"Einheit \$/kWh"	\$/Monat
Kosten für Zellkontainer gesamt = ((Produzierte Zellen pro Monat HEV+Produzierte Zellen pro Monat PHEV+Produzierte Zellen pro Monat BEV)*Kosten für Zellkontainer pro Zelle)*Ausbeute Zelle gesamt	\$/Monat
Kosten für Zellkontainer pro Zelle = ((Anzahl produzierter Zellen Base/(Produzierte Zellen pro Monat HEV+Produzierte Zellen pro Monat PHEV+Produzierte Zellen pro Monat BEV))^(1-0.8)*0.23)*"Einheit \$/Zelle"	\$/Zellen
Kosten für Zukaufteile auf Zellebene = Kosten für negative Kontaktfahne Zelle gesamt+Kosten für positive Kontaktfahne Zelle gesamt+Kosten für Zellkontainer gesamt	\$/Monat
Kosten pro kWh Elektrodenmaterial = Kosten für Materialien auf Elektrodenebene/(Aufträge Gesamt-Verlustrate Aufträge)	\$/kWh
kWh pro Zelle BEV = Batteriekapazität je BEV/Zellen je Fahrzeug	kWh/Zellen
kWh pro Zelle HEV = Batteriekapazität je HEV/Zellen je Fahrzeug	kWh/Zellen
kWh pro Zelle PHEV = Batteriekapazität je PHEV/Zellen je Fahrzeug	kWh/Zellen
Materialteuerung = WITH LOOKUP (MAX(Time*Smoothreg, 1),((1,1)-(400,2)],(1,1),(120,1.1),(240,1.2)))	Dmnl
Modulkosten incl. Zelle pro kWh = Modulkosten pro kWh+Zellkosten pro kWh	\$/kWh
Modulkosten pro kWh = Kosten für Materialien und Komponenten auf Modulebene/Aufträge Gesamt	\$/kWh
Packkosten pro kWh = Kosten für Batteriemodul/(Aufträge Gesamt-Verlustrate Aufträge)	\$/kWh
Produzierte Zellen pro Monat BEV = (Aufträge aus BEV-Verlustrate BEV)/kWh pro Zelle BEV	Zellen/Monat
Produzierte Zellen pro Monat HEV = (Aufträge aus HEV-Verlustrate HEV)/kWh pro Zelle HEV	Zellen/Monat
Produzierte Zellen pro Monat PHEV = (Aufträge aus PHEV-Verlustrate PHEV)/kWh pro Zelle PHEV	Zellen/Monat
Produzierte Zellkapazität Base = 869416/12	kWh/Monat
Switch Materialteuerung = 1	Dmnl
Verbesserung Ausbeute Zelle = WITH LOOKUP (Time/"Time = 1",((0,0)-(200,10)],(0,0.75),(72,0.95),(180,0.95)))	Dmnl
Verlustrate Aufträge = Verluste	kWh/Monat

Verlustrate BEV = Verlustrate Aufträge*(Aufträge aus BEV/Aufträge Gesamt)	kWh/Monat
Verlustrate HEV = Verlustrate Aufträge*(Aufträge aus HEV/Aufträge Gesamt)	kWh/Monat
Verlustrate PHEV = Verlustrate Aufträge*(Aufträge aus PHEV/Aufträge Gesamt)	kWh/Monat
Zellen je Fahrzeug = 96	Zellen/Fzg
Zellkosten pro kWh = Kosten auf Zelllevel/(Aufträge Gesamt-Verlustrate Aufträge)	\$/kWh
Zukauf von Zellen = IF THEN ELSE(Fertigungstiefe = 0 :OR: Fertigungstiefe = 2, 0, 1)	Dmnl

Subsektor Selbstkosten

Abschreibung = ((Ausrüstung total*Umrechnungsfaktor Mio € in €)/Anlagenerneuerungsrate+Gebäudekosten Abschreibung)	€/Monat
Abschreibungsdauer Gebäude = 240	Monat
Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode = (Aktuelle Ausbeute Anlage Elektrode*Anfangskapazität Elektrode)*"Know-how Anlagen"	kWh/Monat
Anlagenerneuerungsrate = WITH LOOKUP (Strategiewahl,(((0,0)-(10,80)),(1,72),(2,60),(3,72),(4,60),(5,72),(6,72)))	Monat
Anteil Zellkosten/kWh an Packkosten/kWh = (Aufträge aus HEV*0.35+Aufträge aus PHEV*0.55+Aufträge aus BEV*0.75)/(Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV)	Dmnl
Anzahl Bestellungen Anlagen Elektrode = ZIDZ(Kapazitätsdelta Elektrode,Aktuell Verfügbare Anlagenperformance Elektrode)	Dmnl
Arbeiter gesamt = Arbeitsaufwand total/Stunden pro Monat	Personal
Arbeitsaufwand Forecast total = Arbeitsaufwand Forecast Elektrodeneherstellung+Arbeitsaufwand Forecast Zellherstellung+Arbeitsaufwand Forecast Modulherstellung+Arbeitsaufwand Forecast Packherstellung	Std/Monat
Arbeitsaufwand total = Arbeitsaufwand für sonstige Tätigkeiten+Arbeitsaufwand zur Elektrodenherstellung+Arbeitsaufwand zur Modulmontage+Arbeitsaufwand zur Packmontage und finalen Überprüfung+Arbeitsaufwand zur Zellherstellung	Std/Monat
Aufträge aus BEV = Benötigte Batteriekapazität BEV*Eigener Marktanteil	kWh/Monat
Aufträge aus HEV = Benötigte Batteriekapazität HEV*Eigener Marktanteil*Produktportfolio	kWh/Monat
Aufträge aus PHEV = Eigener Marktanteil*Benötigte Batteriekapazität PHEV	kWh/Monat
Aufträge Gesamt = Aufträge aus BEV+Aufträge aus HEV+Aufträge aus PHEV	kWh/Monat
Ausrüstung total = ((Ausrüstung für sonstige Tätigkeiten+Ausrüstung zur Elektrodenherstellung+Ausrüstung zur Modulmontage+Ausrüstung zur Packmontage und finalen Überprüfung+Ausrüstung zur Zellherstellung)*Umrechnungsfaktor Mio \$ in Mio €*IF THEN ELSE(Switch Korrekturfaktor Anlagenkosten = 1, Korrekturfaktor Anlagenkosten, 1))	Mio€
Batterieaufträge FORECAST Anlagen = FORECAST(Aufträge Gesamt, Forecast smoothing,Gesamtdauer Kapazitätsanpassung)	kWh/Monat
Batteriesystem komplett incl Recycling = IF THEN ELSE(Fertigungstiefe = 2, 1, 0)	Dmnl
Berücksichtigung von Konventionalstrafen = IF THEN ELSE(Wahl der Konventionalstrafen = 2, (Fehlmengenkosten Kapazitätsdelta+Kosten Lieferverzögerung), IF THEN ELSE(Wahl der Konventionalstrafen = 1, Fehlmengenkosten Kapazitätsdelta, 0))	€/Monat
Dollarkurs = 0.735	€/§
Ergebnis aus Recycling = IF THEN ELSE(Batteriesystem komplett incl Recycling = 1 , Ergebnis Recycling pro kWh gesamt, 0)	€/kWh
Ergebnis Recycling pro kWh gesamt = ((Geamtdeckungsbeitrag-Gesamtfixkosten)*Szenarioabhängige Reyclingerlöse)/(HEV Recycling kWh+PHEV	€/kWh

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Recycling kWh+BEV Recycling kWh)	
Fehlmengenkosten Kapazitätsdelta = Verlustrate Aufträge*Trend Verlauf	€/Monat
Flächenbedarf installiert = INTEG (Flächeninstallationsrate,15425)	m ²
Forschung und Entwicklung = Abschreibung*0.4	€/Monat
Garantie = (Gesamtkosten ohne Material*2)*0.05	€/Monat
Geamtergebnis = INTEG (Geamtdeckungsbeitrag-Gesamtfixkosten,0)	€
Gebäudekosten = IF THEN ELSE(Standort = 0, 3000, 1600)*Dollarkurs*Einheit Gebäudekosten Base*Lookup Gebäudekosten China	€/m ²
Gebäudekosten Abschreibung = Gebäudekosten Gesamt/Abschreibungsdauer Gebäude	€/Monat
Gebäudekosten Gesamt = Gebäudekosten*Flächenbedarf installiert	€
Gesamtkosten ohne Material = (Vertriebs Verwaltungs und Gemeinkosten+Forschung und Entwicklung+Investitionen+Lohnkosten Gesamt+Profit+Variabler Overhead)	€/Monat
Gesamtkosten pro installierter kWh = (Gesamtkosten ohne Material+Materialien und Komponenten+Garantie)/Aufträge Gesamt	€/kWh
Installierte Anlagen Kapazität Elektrode = INTEG (Anlagenhochlaufrate Elektrode+Neuersatz aufgrund Anlagenwegfall Elektrode-Altersbedingte Anlagenwegfallrate Elektrode,Anfangskapazität Elektrode)	kWh/Monat
Investitionen = (Ausrüstung total*Umrechnungsfaktor Mio € in €)/Anlagenerneuerungsrate+Gebäudekosten Gesamt/Abschreibungsdauer Gebäude+Working Capital	€/Monat
Investitionen Ausrüstung = INTEG (Zufluss Ausrüstung,0)	€
Investitionen Gebäude = INTEG (Zufluss Gebäude,0)	€
Investitionen gesamt = INTEG (Zufluss Invest,0)	€
Kalkulatorische Zinsen = (Investitionen+Materialien und Komponenten)*0.5*0.09	€/Monat
Kapazitätsdelta Elektrode = PULSE TRAIN(Planungsbeginn Elektrode, TIME STEP, Planungsperioden Elektrode, FINAL TIME) * (MAX(0, (Kapazitätsaufbau-Installierte Anlagekapazität Elektrode)))	kWh/Monat
Kosten für komplettes Batteriesystem = Kosten für Materialien und Komponenten auf Packebene+Kosten für das Thermomanagement+Kosten für die Packintegration+Kosten für Batteriemodul	\$/Monat
Kosten Lieferverzögerung = IF THEN ELSE(Lieferverzögerung Batteriesystem>Akzeptanzgrenze Lieferverzögerung, MAX(0, Kostenfaktor Lieferverzug*Trend Verlauf*Differenz zu Auslieferung), 0)	€/Monat
Kosten Verlauf BEV Base = 650	\$/kWh
Kosten Verlauf HEV Base = 1000	\$/kWh
Kosten Verlauf PHEV Base = 780	\$/kWh
Leistungsabhängiger Marktanteil = INTEG (Marktanteils änderung*Smoothreg,0)	Dmnl
Lernrate Optimistisch = -0.424	Dmnl
Lernrate Pessimistisch = -0.152	Dmnl
Lernrate Trend = -0.3219	Dmnl
Lieferrate Batteriesystem = Produktionsrate Batteriesystem	kWh/Monat
Lohnkosten = IF THEN ELSE(Standort = 0, 12.8, 3.4*Lookup Lohnkosten China)*Einheit Lohnkosten	€/Std
Lohnkosten Gesamt = (Arbeitsaufwand Fore+cast total*Lohnkosten)	€/Monat

Marktanteils Änderung = IF THEN ELSE(Stückkosten pro kWh>Referenz Pessimistisch, IF THEN ELSE(Leistungsabhängiger Marktanteil>0,IF THEN ELSE(Produktportfolio = 1, -Zugewinn Marktanteil, -Zugewinn Marktanteil No HEV),0), IF THEN ELSE(Stückkosten pro kWh<Referenz Pessimistisch :AND: Stückkosten pro kWh>Referenz Trend, IF THEN ELSE(Produktportfolio = 1, Zugewinn Marktanteil, Zugewinn Marktanteil No HEV), IF THEN ELSE(Stückkosten pro kWh<Referenz Trend :AND: Stückkosten pro kWh>Referenz Optimistisch,IF THEN ELSE(Produktportfolio = 1, Zugewinn Marktanteil*1.25, Zugewinn Marktanteil No HEV*1.25), IF THEN ELSE(Produktportfolio = 1, Zugewinn Marktanteil*1.33, Zugewinn Marktanteil No HEV*1.33))))))	Dmnl
Materialien und Komponenten = Kosten für komplettes Batteriesystem*Dollarkurs	€/Monat
Maximale Produktion Elektrode = MIN(Max Produktionsrate Batteriematerial, Maximale Produktionsrate Personal Elektrode)	kWh/Monat
Mittlere Grenze = WITH LOOKUP (MAX(Time/"Time = 1", 1),((0,0)-(400,600)),(1,500),(60,400),(120,300),(180,200),(250,150)))	€/kWh
Nachfrage BEV = (Potentielle Kunde BEV*Innovationskoeffizient BEV+Potentielle Kunde BEV*Kunden BEV*Imitationskoeffizient BEV)/(Potentielle Kunde BEV+Kunden BEV)	Fzg/Monat
Nachfrage HEV = (Potentielle Kunde HEV*Innovationskoeffizient HEV+Potentielle Kunde HEV*Kunden HEV*Imitationskoeffizient HEV)/(Potentielle Kunde HEV+Kunden HEV)	Fzg/Monat
Nachfrage PHEV = (Potentielle Kunde PHEV*Innovationskoeffizient PHEV+Potentielle Kunde PHEV*Kunden PHEV*Imitationskoeffizient PHEV)/(Potentielle Kunde PHEV+Kunden PHEV)	Fzg/Monat
Obere Grenze Stückkosten kWh = WITH LOOKUP (MAX(Time/"Time = 1", 1),((0,0)-(400,800)),(1,700),(60,600),(120,500),(180,400),(250,350)))	€/kWh
Optimistisch Verlauf BEV = (Kosten Verlauf BEV Base*(Steigung Szenarien/Steigung Szenarien Base)^Lernrate Optimistisch)*Dollarkurs	€/kWh
Optimistisch Verlauf HEV = IF THEN ELSE(Strategiewahl = 5 :OR: Strategiewahl = 6, 0,(Kosten Verlauf HEV Base*(Steigung Szenarien/Steigung Szenarien Base)^Lernrate Optimistisch)*Dollarkurs)	€/kWh
Optimistisch Verlauf PHEV = (Kosten Verlauf PHEV Base*(Steigung Szenarien/Steigung Szenarien Base)^Lernrate Optimistisch)*Dollarkurs	€/kWh
Optimistischer Verlauf = (Optimistisch Verlauf HEV*Nachfrage HEV+Optimistisch Verlauf PHEV*Nachfrage PHEV+Optimistisch Verlauf BEV*Nachfrage BEV)/(Nachfrage BEV+IF THEN ELSE(Strategiewahl = 5 :OR: Strategiewahl = 6, 0, Nachfrage HEV)+Nachfrage PHEV)	€/kWh
Pessimistisch Verlauf = (Pessimistisch Verlauf HEV*Nachfrage HEV+Pessimistisch Verlauf PHEV*Nachfrage PHEV+Pessimistisch Verlauf BEV*Nachfrage BEV)/(Nachfrage BEV+IF THEN ELSE(Strategiewahl = 5 :OR: Strategiewahl = 6, 0, Nachfrage HEV)+Nachfrage PHEV)	€/kWh
Pessimistisch Verlauf BEV = (Kosten Verlauf BEV Base*(Steigung Szenarien/Steigung Szenarien Base)^Lernrate Pessimistisch)*Dollarkurs	€/kWh
Pessimistisch Verlauf HEV = IF THEN ELSE(Strategiewahl = 5 :OR: Strategiewahl = 6, 0,(Kosten Verlauf HEV Base*(Steigung Szenarien/Steigung Szenarien Base)^Lernrate Pessimistisch)*Dollarkurs)	€/kWh
Pessimistisch Verlauf PHEV = (Kosten Verlauf PHEV Base*(Steigung Szenarien/Steigung Szenarien Base)^Lernrate Pessimistisch)*Dollarkurs	€/kWh
Produktionsmenge = (Lieferrate Batteriesystem*12)/(80)	Fzg
Produktportfolio = WITH LOOKUP (Strategiewahl,((0,0)-(10,10)),(1,1),(2,1),(3,1),(4,1),(5,0),(6,0)))	Dmnl
Profit = Investitionen*0.05	€/Monat

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Profit bei Zellkauf = 1.1	Dmnl
Referenz Optimistisch = IF THEN ELSE(Referenzszenarien = 0, Untere Grenze, Optimistischer Verlauf)	€/kWh
Referenz Pessimistisch = IF THEN ELSE(Referenzszenarien = 0, Obere Grenze Stückkosten kWh, Pessimistisch Verlauf)	€/kWh
Referenz Trend = IF THEN ELSE(Referenzszenarien = 0, Mittlere Grenze, Trend Verlauf)	€/kWh
Referenzszenarien = 1	Dmnl
Steigung Szenarien = WITH LOOKUP (MAX(Time*Smoothreg, 1),((0,0)-(200,4e+006)),(1,500000),(180,2.1e+006), (180,2.1e+006))	Stk/Monat
Steigung Szenarien Base = 100000	Stk/Monat
Strategiewahl = 3	Dmnl
Stunden pro Monat = IF THEN ELSE(Landestypische Arbeitszeit = 0, 166,200)	(Std/Monat)/Personal
Stückkosten pro kWh raw = ZIDZ((Materialien und Komponenten+Garantie+Gesamtkosten ohne Material+Berücksichtigung von Konventionalstrafen), Lieferrate Batteriesystem)	€/kWh
Szenariowahl = 2	Dmnl
TIME STEP = 0.03125	Monat.
Trend Verlauf = (Trend Verlauf HEV*Nachfrage HEV+Trend Verlauf PHEV*Nachfrage PHEV+Trend Verlauf BEV*Nachfrage BEV)/(Nachfrage BEV+IF THEN ELSE(Strategiewahl = 5 :OR: Strategiewahl = 6, 0, Nachfrage HEV)+Nachfrage PHEV)	€/kWh
Trend Verlauf BEV = (Kosten Verlauf BEV Base*(Steigung Szenarien/Steigung Szenarien Base)^Lernrate Trend)*Dollarkurs	€/kWh
Trend Verlauf HEV = IF THEN ELSE(Strategiewahl = 5 :OR: Strategiewahl = 6, 0, (Kosten Verlauf HEV Base*(Steigung Szenarien/Steigung Szenarien Base)^Lernrate Trend)*Dollarkurs)	€/kWh
Trend Verlauf PHEV = (Kosten Verlauf PHEV Base*(Steigung Szenarien/Steigung Szenarien Base)^Lernrate Trend)*Dollarkurs	€/kWh
Umrechnungsfaktor Mio € in € = 1e+006	€/Mio€
Untere Grenze = WITH LOOKUP (MAX(Time/"Time = 1", 1),((0,0)-(400,400)),(1,250),(60,150),(120,125),(180,100),(250,75))	€/kWh
Variabler Overhead = Abschreibung*0.2+Lohnkosten Gesamt*0.4	€/Monat
Verlustrate Aufträge = Verluste	kWh/Monat
Vertriebs Verwaltungs und Gemeinkosten = (Lohnkosten Gesamt+Variabler Overhead)*0.25+Abschreibung*0.25	€/Monat
Wahl der Konventionalstrafen = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, 0, IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, 1, 2))	€/Monat
Working Capital = Variabler Overhead*0.15	€/Monat
Zufluss Ausrüstung = Ausrüstung total	\$/Monat
Zufluss Gebäude = Gebäudekosten Abschreibung	\$/Monat
Zufluss Invest = Investitionen	\$/Monat
Zugewinn Marktanteil = WITH LOOKUP (MAX(Time/"Time = 1", 1),((0,0)-(200,0.004)),(1,0.002),(59.9388,0.00112281),(112.538,0.000807018),(200,0.0004))	Dmnl
Zugewinn Marktanteil No HEV = WITH LOOKUP (MAX(Time/"Time = 1", 1),((0,0)-(200,0.004)),(1,0.001),(58.7156,0.001),(112.538,0.000807018),(200,0.0004))	Dmnl
Zukauf von Zellen = IF THEN ELSE(Fertigungstiefe = 0 :OR: Fertigungstiefe = 2, 0, 1)	Dmnl

Subsektor multikriterielle Bewertung

Alter = 120	Monat
Reife = 120	Monat
Wachstum = 60	Monat
Alternativenormierung = 1/5	Dmnl
Ausprägungsdifferenz Landesinterne Förderungen = Landesinterne Förderungen CN-Landesinterne Förderungen USA	Dmnl
Ausprägungsdifferenz Nähe zu den Kunden = Nähe zu den Kunden Ausprägung CN- Nähe zu den Kunden Ausprägung USA	Dmnl
Ausprägungsdifferenz Schutz des geistigen Eigentums = Schutz des geistigen Eigen- tums Ausprägung CN-Schutz des geistigen Eigentums Ausprägung USA	Dmnl
Ausprägungsdifferenz Verfügbarkeit von qual Personal = Verfügbarkeit von qual Personal CN-Verfügbarkeit von qual Personal USA	Dmnl
Einheit Transform Lieferzeit = 1	1/Monat
Einheit Transform Stückkosten = 1	kWh/€
Externe Kriterien EA Strategiebündel 1: = GET VDF DA- TA('S1_EA_USA_Match_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien EA Strategiebündel 2: = GET VDF DA- TA('S2_EA_USA_Lead_HEV_60_NC.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien EA Strategiebündel 3: = GET VDF DA- TA('S3_EA_CN_Match_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien EA Strategiebündel 4: = GET VDF DA- TA('S4_EA_CN_Lead_HEV_60_NC.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien EA Strategiebündel 5: = GET VDF DA- TA('S5_EA_USA_Match_No_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien EA Strategiebündel 6: = GET VDF DA- TA('S6_EA_CN_Match_No_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien OA Strategiebündel 1: = GET VDF DA- TA('S1_OA_USA_Match_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien OA Strategiebündel 2: = GET VDF DA- TA('S2_OA_USA_Lead_HEV_60_NC.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien OA Strategiebündel 3: = GET VDF DA- TA('S3_OA_CN_Match_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien OA Strategiebündel 4: = GET VDF DA- TA('S4_OA_CN_Lead_HEV_60_NC.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien OA Strategiebündel 5: = GET VDF DA- TA('S5_OA_USA_Match_No_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien OA Strategiebündel 6: = GET VDF DA- TA('S6_OA_CN_Match_No_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien Shock Strategiebündel 1: = GET VDF DA- TA('S1_Shock_USA_Match_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien Shock Strategiebündel 2: = GET VDF DA- TA('S2_Shock_USA_Lead_HEV_60_NC.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien Shock Strategiebündel 3: = GET VDF DA- TA('S3_Shock_CN_Match_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien Shock Strategiebündel 4: = GET VDF DA- TA('S4_Shock_CN_Lead_HEV_60_NC.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien Shock Strategiebündel 5: = GET VDF DA- TA('S5_Shock_USA_Match_No_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	Dmnl
Externe Kriterien Shock Strategiebündel 6: = GET VDF DA-	Dmnl

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

TA('S6_Shock_CN_Match_No_HEV_72_All.vdf','Standort',0, 1)	
Gewichtete Präferenz CN über USA Landesinterne Förderungen = Gewichtung Landesinterne Förderungen*Präferenz CN über USA Landesinterne Förderungen/Summe der Gewichtungen	Dmnl
Gewichtete Präferenz CN über USA Nähe zu den Kunden = Gewichtung Nähe zu den Kunden*Präferenz CN über USA Nähe zu den Kunden/Summe der Gewichtungen	Dmnl
Gewichtete Präferenz CN über USA Schutz des geistigen Eigentums = Gewichtung Schutz des geistigen Eigentums*Präferenz CN über USA Schutz des geistigen Eigentums/Summe der Gewichtungen	Dmnl
Gewichtete Präferenz CN über USA Soziale Produktionsbedingungen = Gewichtung Soziale Produktionsbedingungen*Präferenz CN über USA Soziale Produktionsbedingungen/Summe der Gewichtungen	Dmnl
Gewichtete Präferenz CN über USA Verfügbarkeit von qual Personal = Gewichtung Verfügbarkeit von qual Personal*Präferenz CN über USA Verfügbarkeit von qual Personal/Summe der Gewichtungen	Dmnl
Gewichtete Präferenz USA über CN Landesinterne Förderungen = Gewichtung Landesinterne Förderungen*Präferenz USA über CN Landesinterne Förderungen/Summe der Gewichtungen	Dmnl
Gewichtete Präferenz USA über CN Nähe zu den Kunden = Gewichtung Nähe zu den Kunden*Präferenz USA über CN Nähe zu den Kunden/Summe der Gewichtungen	Dmnl
Gewichtete Präferenz USA über CN Schutz des geistigen Eigentums = Präferenz USA über CN Schutz des geistigen Eigentums*Gewichtung Schutz des geistigen Eigentums/Summe der Gewichtungen	Dmnl
Gewichtete Präferenz USA über CN Soziale Produktionsbedingungen = Gewichtung Soziale Produktionsbedingungen*Präferenz USA über CN Soziale Produktionsbedingungen/Summe der Gewichtungen	Dmnl
Gewichtete Präferenz USA über CN Verfügbarkeit von qual Personal = Gewichtung Verfügbarkeit von qual Personal*Präferenz USA über CN Verfügbarkeit von qual Personal/Summe der Gewichtungen	Dmnl
Gewichtung Landesinterne Förderungen = 4	Dmnl
Gewichtung Lieferzeit = Spezifische Kriteriengewichtung Lieferzeit	Dmnl
Gewichtung Nähe zu den Kunden = 4+IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, RAMP(1/120, 0, 120), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1,RAMP(1/63, 0, 120), RAMP(1/36, 0, 36)))	Dmnl
Gewichtung Schutz des geistigen Eigentums = 4+IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, RAMP(1/120, 0, 120), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, RAMP(1/60, 0, 60), RAMP(1/36, 0, 36)))	Dmnl
Gewichtung Soziale Produktionsbedingungen = 3	Dmnl
Gewichtung Verfügbarkeit von qual Personal = 4.5	Dmnl
Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 1 = 2	Dmnl
Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 2 = 2	Dmnl
Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 3 = 2	Dmnl
Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 4 = 2	Dmnl
Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 5 = 1	Dmnl
Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 6 = 1	Dmnl
Integral Strategie 1 = INTEG ((Phi netto raw Strategie 1-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6)))))))*"Smoothreg",0)	Dmnl
Integral Strategie 1 Alter = INTEG (IF THEN ELSE(Time>"1Reife", Phi netto raw Strategie 1-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi	Dmnl

Phi netto raw Strategie 6))))), 0)*"Smoothreg",0)	
Integral Strategie 4 Reife = INTEG (IF THEN ELSE(Time<"1Alter":AND:Time>"1Wachstum", Phi netto raw Strategie 4-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6))))), 0)*"Smoothreg",0)	Dmnl
Integral Strategie 4 Wachstum = INTEG (IF THEN ELSE(Time<"1Wachstum", Phi netto raw Strategie 1-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6))))), 0)*"Smoothreg",0)	Dmnl
Integral Strategie 5 = INTEG ((Phi netto raw Strategie 5-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6))))))*"Smoothreg",0)	Dmnl
Integral Strategie 5 Alter = INTEG (IF THEN ELSE(Time>"1Reife", Phi netto raw Strategie 5-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6))))), 0)*"Smoothreg",0)	Dmnl
Integral Strategie 5 Reife = INTEG (IF THEN ELSE(Time<"1Alter":AND:Time>"1Wachstum", Phi netto raw Strategie 5-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6))))), 0)*"Smoothreg",0)	Dmnl
Integral Strategie 5 Wachstum = INTEG (IF THEN ELSE(Time<"1Wachstum", Phi netto raw Strategie 5-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6))))), 0)*"Smoothreg",0)	Dmnl
Integral Strategie 6 = INTEG ((Phi netto raw Strategie 6-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6))))))*"Smoothreg",0)	Dmnl
Integral Strategie 6 Alter = INTEG (IF THEN ELSE(Time>"1Reife", Phi netto raw Strategie 6-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6))))), 0)*"Smoothreg",0)	Dmnl
Integral Strategie 6 Reife = INTEG (IF THEN ELSE(Time<"1Alter":AND:Time>"1Wachstum", Phi netto raw Strategie 6-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6))))), 0)*"Smoothreg",0)	Dmnl
Integral Strategie 6 Wachstum = INTEG (IF THEN ELSE(Time<"1Wachstum", Phi netto raw Strategie 6-(MIN(Phi netto raw Strategie 1, MIN(Phi netto raw Strategie 2, MIN(Phi netto raw Strategie 3, MIN(Phi netto raw Strategie 4, MIN(Phi netto raw Strategie 5, Phi netto raw Strategie 6))))), 0)*"Smoothreg",0)	Dmnl
Kriteriengewichtung Lieferzeit = 2.5	Dmnl
Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien = 2.5	Dmnl
Kriteriengewichtung Stückkosten = 5	Dmnl
Landesinterne Förderungen CN = 3	Dmnl
Landesinterne Förderungen USA = 3+IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, RAMP(-1/63, 0, 63), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, RAMP(-1/42, 0, 42), RAMP(-1/30, 0, 30)))	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-2 = (Strategie 1 Lieferzeit pro installierter-Strategie 2 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl

Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-3 = (Strategie 1 Lieferzeit pro installierter-Strategie 3 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-4 = (Strategie 1 Lieferzeit pro installierter-Strategie 4 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-5 = (Strategie 1 Lieferzeit pro installierter-Strategie 5 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-6 = (Strategie 1 Lieferzeit pro installierter-Strategie 6 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-3 = (Strategie 2 Lieferzeit pro installierter-Strategie 3 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-4 = (Strategie 2 Lieferzeit pro installierter-Strategie 4 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-5 = (Strategie 2 Lieferzeit pro installierter-Strategie 5 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-6 = (Strategie 2 Lieferzeit pro installierter-Strategie 6 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-4 = (Strategie 3 Lieferzeit pro installierter-Strategie 4 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-5 = (Strategie 3 Lieferzeit pro installierter-Strategie 5 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-6 = (Strategie 3 Lieferzeit pro installierter-Strategie 6 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 4-5 = (Strategie 4 Lieferzeit pro installierter-Strategie 5 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 4-6 = (Strategie 4 Lieferzeit pro installierter-Strategie 6 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 5-6 = (Strategie 5 Lieferzeit pro installierter-Strategie 6 Lieferzeit pro installierter)*Minimieren Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit EA Strategiebündel 1 LEAD: = GET VDF DA-TA('S1_EA_USA_LEAD_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit EA Strategiebündel 1 MATCH: = GET VDF DA-TA('S1_EA_USA_Match_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit EA Strategiebündel 2 LEAD: = GET VDF DA-TA('S2_EA_USA_Lead_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit EA Strategiebündel 2 MATCH: = GET VDF DA-TA('S2_EA_USA_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit EA Strategiebündel 3 LEAD: = GET VDF DA-TA('S3_EA_CN_LEAD_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit EA Strategiebündel 3 MATCH: = GET VDF DA-TA('S3_EA_CN_Match_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit EA Strategiebündel 4 LEAD: = GET VDF DA-TA('S4_EA_CN_Lead_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit EA Strategiebündel 4 MATCH: = GET VDF DA-TA('S4_EA_CN_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit EA Strategiebündel 5 LEAD: = GET VDF DA-TA('S5_EA_USA_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit EA Strategiebündel 5 MATCH: = GET VDF DA-TA('S5_EA_USA_Match_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit EA Strategiebündel 6 LEAD: = GET VDF DA-TA('S6_EA_CN_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Lieferzeit EA Strategiebündel 6 MATCH: = GET VDF DA-TA('S6_EA_CN_Match_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 5 = Lieferzeit Präferenz Strategie 2 über 5*Gewichtung Lieferzeit	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 2 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 1 über 2	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 3 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 1 über 3	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 4 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 1 über 4	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 5 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 1 über 5	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 6 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 1 über 6	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 1 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 2 über 1	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 3 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 2 über 3	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 4 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 2 über 4	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 6 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 2 über 6	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 1 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 3 über 1	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 2 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 3 über 2	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 4 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 3 über 4	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 5 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 3 über 5	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 6 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 3 über 6	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 1 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 4 über 1	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 2 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 4 über 2	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 3 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 4 über 3	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 5 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 4 über 5	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 6 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 4 über 6	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 1 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 5 über 1	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 2 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 5 über 2	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 3 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 5 über 3	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 4 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 5 über 4	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 6 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 5 über 6	Dmnl

Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 1 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 6 über 1	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 2 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 6 über 2	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 3 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 6 über 3	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 4 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 6 über 4	Dmnl
Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 5 = Gewichtung Lieferzeit*Lieferzeit Präferenz Strategie 6 über 5	Dmnl
Lieferzeit OA Strategiebündel 1 LEAD: = GET VDF DA- TA('S1_OA_USA_LEAD_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 1 MATCH: = GET VDF DA- TA('S1_OA_USA_Match_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 2 LEAD: = GET VDF DA- TA('S2_OA_USA_Lead_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 2 MATCH: = GET VDF DA- TA('S2_OA_USA_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 3 LEAD: = GET VDF DA- TA('S3_OA_CN_LEAD_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 3 MATCH: = GET VDF DA- TA('S3_OA_CN_Match_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 4 LEAD: = GET VDF DA- TA('S4_OA_CN_Lead_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 4 MATCH: = GET VDF DA- TA('S4_OA_CN_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 5 LEAD: = GET VDF DA- TA('S5_OA_USA_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 5 MATCH: = GET VDF DA- TA('S5_OA_USA_Match_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 6 LEAD: = GET VDF DA- TA('S6_OA_CN_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit OA Strategiebündel 6 MATCH: = GET VDF DA- TA('S6_OA_CN_Match_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit Präferenz Strategie 1 über 2 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdiffe- renz Strategie 1-2">0, "Lieferzeit Strategie 1-2 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 1 über 3 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdiffe- renz Strategie 1-3">0, "Lieferzeit Strategie 1-3 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 1 über 4 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdiffe- renz Strategie 1-4">0, "Lieferzeit Strategie 1-4 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 1 über 5 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdiffe- renz Strategie 1-5">0, "Lieferzeit Strategie 1-5 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 1 über 6 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdiffe- renz Strategie 1-6">0, "Lieferzeit Strategie 1-6 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 2 über 1 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdiffe- renz Strategie 1-2"<0, "Lieferzeit Strategie 1-2 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 2 über 3 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdiffe- renz Strategie 2-3">0, "Lieferzeit Strategie 2-3 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 2 über 4 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdiffe- renz Strategie 2-4">0, "Lieferzeit Strategie 2-4 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl

Lieferzeit Präferenz Strategie 2 über 5 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-5">0, "Lieferzeit Strategie 2-5 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 2 über 6 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-6">0, "Lieferzeit Strategie 2-6 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 3 über 1 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-3"<0, "Lieferzeit Strategie 1-3 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 3 über 2 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-3"<0, "Lieferzeit Strategie 2-3 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 3 über 4 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-4">0, "Lieferzeit Strategie 3-4 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 3 über 5 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-5">0, "Lieferzeit Strategie 3-5 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 3 über 6 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-6">0, "Lieferzeit Strategie 3-6 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 4 über 1 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-4"<0, "Lieferzeit Strategie 1-4 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 4 über 2 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-4"<0, "Lieferzeit Strategie 2-4 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 4 über 3 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-4"<0, "Lieferzeit Strategie 3-4 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 4 über 5 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 4-5">0, "Lieferzeit Strategie 4-5 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 4 über 6 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 4-6">0, "Lieferzeit Strategie 4-6 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 5 über 1 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-5"<0, "Lieferzeit Strategie 1-5 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 5 über 2 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-5"<0, "Lieferzeit Strategie 2-5 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 5 über 3 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-5"<0, "Lieferzeit Strategie 3-5 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 5 über 4 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 4-5"<0, "Lieferzeit Strategie 4-5 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 5 über 6 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 5-6">0, "Lieferzeit Strategie 5-6 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 6 über 1 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-6"<0, "Lieferzeit Strategie 1-6 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 6 über 2 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-6"<0, "Lieferzeit Strategie 2-6 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 6 über 3 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-6"<0, "Lieferzeit Strategie 3-6 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 6 über 4 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 4-6"<0, "Lieferzeit Strategie 4-6 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Strategie 6 über 5 = IF THEN ELSE("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 5-6"<0, "Lieferzeit Strategie 5-6 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 1 zu 2 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-2",((-20,0)-(20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 1 zu 3 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-3",((-20,0)-(20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 1 zu 4 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-4",((-20,0)-(20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-	Dmnl

0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 1 zu 5 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-5",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 1 zu 6 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 1-6",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 2 zu 3 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-3",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 2 zu 4 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-4",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 2 zu 5 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-5",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 2 zu 6 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 2-6",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 3 zu 4 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-4",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 3 zu 5 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-5",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 3 zu 6 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 3-6",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 4 zu 5 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 4-5",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 4 zu 6 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 4-6",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 5 zu 6 = WITH LOOKUP ("Lieferzeit Ausprägungsdifferenz Strategie 5-6",(((-20,0)-(-20,1)),(-12,1),(-3,0.75),(-1,0.5),(-0.5,0.25),(-0.25,0.15),(0,0),(0.25,0.15),(0.5,0.25),(1,0.5),(3,0.75),(12,1)))	Dmnl
Lieferzeit Shock Strategiebündel 1 LEAD: = GET VDF DATA('S1_Shock_USA_LEAD_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit Shock Strategiebündel 1 MATCH: = GET VDF DATA('S1_Shock_USA_Match_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit Shock Strategiebündel 2 LEAD: = GET VDF DATA('S2_Shock_USA_Lead_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit Shock Strategiebündel 2 MATCH: = GET VDF DATA('S2_Shock_USA_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit Shock Strategiebündel 3 LEAD: = GET VDF DATA('S3_Shock_CN_LEAD_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit Shock Strategiebündel 3 MATCH: = GET VDF DATA('S3_Shock_CN_Match_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat
Lieferzeit Shock Strategiebündel 4 LEAD: = GET VDF DATA('S4_Shock_CN_Lead_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0, 1)	Monat

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Lieferzeit Shock Strategiebündel 4 MATCH: = GET VDF DA-TA('S4_Shock_CN_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0,1)	Monat
Lieferzeit Shock Strategiebündel 5 LEAD: = GET VDF DA-TA('S5_Shock_USA_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0,1)	Monat
Lieferzeit Shock Strategiebündel 5 MATCH: = GET VDF DA-TA('S5_Shock_USA_Match_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0,1)	Monat
Lieferzeit Shock Strategiebündel 6 LEAD: = GET VDF DA-TA('S6_Shock_CN_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0,1)	Monat
Lieferzeit Shock Strategiebündel 6 MATCH: = GET VDF DA-TA('S6_Shock_CN_Match_No_HEV_72_All.vdf','Lieferverzögerung Batteriesystem',0,1)	Monat
Lieferzeit Strategie 1-2 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 1 zu 2	Dmnl
Lieferzeit Strategie 1-3 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 1 zu 3	Dmnl
Lieferzeit Strategie 1-4 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 1 zu 4	Dmnl
Lieferzeit Strategie 1-5 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 1 zu 5	Dmnl
Lieferzeit Strategie 1-6 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 1 zu 6	Dmnl
Lieferzeit Strategie 2-3 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 2 zu 3	Dmnl
Lieferzeit Strategie 2-4 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 2 zu 4	Dmnl
Lieferzeit Strategie 2-5 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 2 zu 5	Dmnl
Lieferzeit Strategie 2-6 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 2 zu 6	Dmnl
Lieferzeit Strategie 3-4 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 3 zu 4	Dmnl
Lieferzeit Strategie 3-5 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 3 zu 5	Dmnl
Lieferzeit Strategie 3-6 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 3 zu 6	Dmnl
Lieferzeit Strategie 4-5 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 4 zu 5	Dmnl
Lieferzeit Strategie 4-6 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 4 zu 6	Dmnl
Lieferzeit Strategie 5-6 PÄferenz Struktur Typ 5 = Lieferzeit Präferenz Typ 5 S 5 zu 6	Dmnl
Minimieren Lieferzeit = -1	Dmnl
Minimieren Stückkosten = -1	Dmnl
Nähe zu den Kunden Ausprägung CN = 3+IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, RAMP(1/120, 0, 120), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, RAMP(1/84, 0, 84), RAMP(1/63, 0, 63)))	Dmnl
Nähe zu den Kunden Ausprägung USA = 4	Dmnl
Normierung Stückkosten = Spezifische Kriteriengewichtung Stückkosten	Dmnl
Phi + Strategie 1 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 1 über 2+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 1 über 3+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 1 über 4+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 1 über 5+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 1 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 1 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 2+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 3+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 4+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 5+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 1 = "Phi + Strategie 1 Gesamtkosten"+"Phi + Strategie 1 Lieferzeit"+"Phi+ Strategie 1 standortabhängige Kriterien"	Dmnl

Phi + Strategie 2 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 2 über 5+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 2 über 1+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 2 über 3+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 2 über 4+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 2 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 2 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 5+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 1+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 3+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 4+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 2 = "Phi + Strategie 2 Gesamtkosten"+"Phi + Strategie 2 Lieferzeit"+"Phi+ Strategie 2 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi + Strategie 3 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 1+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 2+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 4+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 5+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 3 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 1+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 2+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 4+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 5+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 3 = "Phi + Strategie 3 Gesamtkosten"+"Phi + Strategie 3 Lieferzeit"+"Phi+ Strategie 3 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi + Strategie 4 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 1+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 2+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 3+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 5+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 4 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 1+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 2+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 3+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 5+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 4 = "Phi + Strategie 4 Gesamtkosten"+"Phi + Strategie 4 Lieferzeit"+"Phi+ Strategie 4 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi + Strategie 5 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 1+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 2+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 3+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 4+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 5 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 1+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 2+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 3+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 4+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 5 = "Phi + Strategie 5 Gesamtkosten"+"Phi + Strategie 5 Lieferzeit"+"Phi+ Strategie 5 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi + Strategie 6 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 2+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 1+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 3+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 4+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 5)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 6 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 2+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 1+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 3+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 4+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 5)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi + Strategie 6 = "Phi + Strategie 6 Gesamtkosten"+"Phi + Strategie 6 Lieferzeit"+"Phi+ Strategie 6 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi - Strategie 1 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 2 über 1+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 1+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 1+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über	Dmnl

1+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 1)*Alternativenormierung	
Phi - Strategie 1 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 1+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 1+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 1+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 1+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 1)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi - Strategie 1 = "Phi - Strategie 1 Gesamtkosten"+"Phi - Strategie 1 Lieferzeit"+"Phi- Strategie 1 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi - Strategie 2 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 1 über 2+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 2+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 2+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 2+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 2)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi - Strategie 2 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 2+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 2+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 2+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 2+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 2)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi - Strategie 2 = "Phi - Strategie 2 Gesamtkosten"+"Phi - Strategie 2 Lieferzeit"+"Phi- Strategie 2 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi - Strategie 3 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 1 über 3+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 2 über 3+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 3+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 3+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 3)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi - Strategie 3 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 3+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 3+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 3+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 3+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 3)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi - Strategie 3 = "Phi - Strategie 3 Gesamtkosten"+"Phi - Strategie 3 Lieferzeit"+"Phi- Strategie 3 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi - Strategie 4 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 1 über 4+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 2 über 4+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 4+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 4+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 4)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi - Strategie 4 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 4+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 4+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 4+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 4+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 4)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi - Strategie 4 = "Phi - Strategie 4 Gesamtkosten"+"Phi - Strategie 4 Lieferzeit"+"Phi- Strategie 4 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi - Strategie 5 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 1 über 5+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 2 über 5+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 5+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 5+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 5)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi - Strategie 5 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 5+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 5+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 5+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 5+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 6 über 5)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi - Strategie 5 = "Phi - Strategie 5 Gesamtkosten"+"Phi - Strategie 5 Lieferzeit"+"Phi- Strategie 5 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi - Strategie 6 Gesamtkosten = (Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 1 über 6+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 2 über 6+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 6+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 6+Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl

Phi - Strategie 6 Lieferzeit = (Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 1 über 6+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 2 über 6+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 3 über 6+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 4 über 6+Lieferzeit gewichtete Präferenz Strategie 5 über 6)*Alternativenormierung	Dmnl
Phi - Strategie 6 = "Phi - Strategie 6 Gesamtkosten"+"Phi - Strategie 6 Lieferzeit"+"Phi- Strategie 6 standortabhängige Kriterien"	Dmnl
Phi netto Gesamtkosten Strategie 1 = "Phi + Strategie 1 Gesamtkosten"- "Phi - Strategie 1 Gesamtkosten"	Dmnl
Phi netto Gesamtkosten Strategie 2 = "Phi + Strategie 2 Gesamtkosten"- "Phi - Strategie 2 Gesamtkosten"	Dmnl
Phi netto Gesamtkosten Strategie 3 = "Phi + Strategie 3 Gesamtkosten"- "Phi - Strategie 3 Gesamtkosten"	Dmnl
Phi netto Gesamtkosten Strategie 4 = "Phi + Strategie 4 Gesamtkosten"- "Phi - Strategie 4 Gesamtkosten"	Dmnl
Phi netto Gesamtkosten Strategie 5 = "Phi + Strategie 5 Gesamtkosten"- "Phi - Strategie 5 Gesamtkosten"	Dmnl
Phi netto Gesamtkosten Strategie 6 = "Phi + Strategie 6 Gesamtkosten"- "Phi - Strategie 6 Gesamtkosten"	Dmnl
Phi netto Lieferzeit Strategie 1 = "Phi + Strategie 1 Lieferzeit"- "Phi - Strategie 1 Lieferzeit"	Dmnl
Phi netto Lieferzeit Strategie 2 = "Phi + Strategie 2 Lieferzeit"- "Phi - Strategie 2 Lieferzeit"	Dmnl
Phi netto Lieferzeit Strategie 3 = "Phi + Strategie 3 Lieferzeit"- "Phi - Strategie 3 Lieferzeit"	Dmnl
Phi netto Lieferzeit Strategie 4 = "Phi + Strategie 4 Lieferzeit"- "Phi - Strategie 4 Lieferzeit"	Dmnl
Phi netto Lieferzeit Strategie 5 = "Phi + Strategie 5 Lieferzeit"- "Phi - Strategie 5 Lieferzeit"	Dmnl
Phi netto Lieferzeit Strategie 6 = "Phi + Strategie 6 Lieferzeit"- "Phi - Strategie 6 Lieferzeit"	Dmnl
Phi netto raw Strategie 1 = "Phi + Strategie 1"- "Phi - Strategie 1"	Dmnl
Phi netto raw Strategie 2 = "Phi + Strategie 2"- "Phi - Strategie 2"	Dmnl
Phi netto raw Strategie 3 = "Phi + Strategie 3"- "Phi - Strategie 3"	Dmnl
Phi netto raw Strategie 4 = "Phi + Strategie 4"- "Phi - Strategie 4"	Dmnl
Phi netto raw Strategie 5 = "Phi + Strategie 5"- "Phi - Strategie 5"	Dmnl
Phi netto raw Strategie 6 = "Phi + Strategie 6"- "Phi - Strategie 6"	Dmnl
Phi netto Strategie 1 = SMOOTH(Phi netto raw Strategie 1, smooth Time 1)	Dmnl
Phi netto Strategie 2 = SMOOTH(Phi netto raw Strategie 2, smooth Time 1)	Dmnl
Phi netto Strategie 3 = SMOOTH(Phi netto raw Strategie 3, smooth Time 1)	Dmnl
Phi netto Strategie 4 = SMOOTH(Phi netto raw Strategie 4, smooth Time 1)	Dmnl
Phi netto Strategie 5 = SMOOTH(Phi netto raw Strategie 5, smooth Time 1)	Dmnl
Phi netto Strategie 6 = SMOOTH(Phi netto raw Strategie 6, smooth Time 1)	Dmnl
Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen = Gewichtete Präferenz CN über USA Landesinterne Förderungen*Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien	Dmnl
Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden = Gewichtete Präferenz CN über USA Nähe zu den Kunden*Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien	Dmnl
Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums = Gewichtete Präferenz CN über USA Schutz des geistigen Eigentums*Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien	Dmnl

Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen = Gewichtete Präferenz CN über USA Soziale Produktionsbedingungen*Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien	Dmnl
Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal = Gewichtete Präferenz CN über USA Verfügbarkeit von qual Personal*Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien	Dmnl
Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen = Gewichtete Präferenz USA über CN Landesinterne Förderungen*Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien	Dmnl
Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden = Gewichtete Präferenz USA über CN Nähe zu den Kunden*Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien	Dmnl
Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums = Gewichtete Präferenz USA über CN Schutz des geistigen Eigentums*Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien	Dmnl
Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen = Gewichtete Präferenz USA über CN Soziale Produktionsbedingungen*Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien	Dmnl
Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal = Gewichtete Präferenz USA über CN Verfügbarkeit von qual Personal*Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien	Dmnl
Phi+ Strategie 1 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 1 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen))	Dmnl
Phi+ Strategie 2 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 2 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen))	Dmnl
Phi+ Strategie 3 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 3 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen))	Dmnl
Phi+ Strategie 4 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 4 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz	Dmnl

des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen))	
Phi+ Strategie 5 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 5 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen))	Dmnl
Phi+ Strategie 6 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 6 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen))	Dmnl
Phi- Strategie 1 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 1 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen))	Dmnl
Phi- Strategie 2 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 2 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen))	Dmnl
Phi- Strategie 3 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 3 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen))	Dmnl

Phi- Strategie 4 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 4 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen))	Dmnl
Phi- Strategie 5 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 5 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen))	Dmnl
Phi- Strategie 6 standortabhängige Kriterien = IF THEN ELSE(Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 6 = 0,(Phi Vorteilhaftigkeit CN Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit CN Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit CN Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit CN Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit CN Landesinterne Förderungen), (Phi Vorteilhaftigkeit USA Nähe zu den Kunden+Phi Vorteilhaftigkeit USA Schutz des geistigen Eigentums+Phi Vorteilhaftigkeit USA Soziale Produktionsbedingungen+Phi Vorteilhaftigkeit USA Verfügbarkeit von qual Personal+Phi Vorteilhaftigkeit USA Landesinterne Förderungen))	Dmnl
Präferenz CN über USA Landesinterne Förderungen = IF THEN ELSE(Ausprägungsdifferenz Landesinterne Förderungen>0, 1, 0)	Dmnl
Präferenz CN über USA Nähe zu den Kunden = IF THEN ELSE(Ausprägungsdifferenz Nähe zu den Kunden>0, 1, 0)	Dmnl
Präferenz CN über USA Schutz des geistigen Eigentums = IF THEN ELSE(Ausprägungsdifferenz Schutz des geistigen Eigentums>0, 1, 0)	Dmnl
Präferenz CN über USA Soziale Produktionsbedingungen = IF THEN ELSE(Soziale Produktionsbedingungen>0, 1, 0)	Dmnl
Präferenz CN über USA Verfügbarkeit von qual Personal = IF THEN ELSE(Ausprägungsdifferenz Verfügbarkeit von qual Personal>0, 1, 0)	Dmnl
Präferenz USA über CN Landesinterne Förderungen = IF THEN ELSE(Ausprägungsdifferenz Landesinterne Förderungen<0, 1, 0)	Dmnl
Präferenz USA über CN Nähe zu den Kunden = IF THEN ELSE(Ausprägungsdifferenz Nähe zu den Kunden<0, 1, 0)	Dmnl
Präferenz USA über CN Schutz des geistigen Eigentums = IF THEN ELSE(Ausprägungsdifferenz Schutz des geistigen Eigentums<0, 1, 0)	Dmnl
Präferenz USA über CN Soziale Produktionsbedingungen = IF THEN ELSE(Soziale Produktionsbedingungen<0, 1, 0)	Dmnl
Präferenz USA über CN Verfügbarkeit von qual Personal = IF THEN ELSE(Ausprägungsdifferenz Verfügbarkeit von qual Personal<0, 1, 0)	Dmnl
Präferenztyp für exogene Kriterien 1 = 1	Dmnl
Schutz des geistigen Eigentums Ausprägung CN = 3+IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, RAMP(1/80, 0, 80), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, RAMP(1/63, 0, 63), RAMP(1/48, 0, 48)))	Dmnl
Schutz des geistigen Eigentums Ausprägung USA = 4	Dmnl

smooth Time 1 = 1	Monat
Soziale Produktionsbedingungen = Soziale Produktionsbedingungen CN-Soziale Produktionsbedingungen USA	Dmnl
Soziale Produktionsbedingungen CN = 3+IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0,RAMP(1/60, 0, 60) , IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, RAMP(1/42, 0, 42), RAMP(1/30,0, 30)))	Dmnl
Soziale Produktionsbedingungen USA = 4	Dmnl
Spezifische Kriteriengewichtung Lieferzeit = Kriteriengewichtung Lieferzeit/Summe Kriterien	Dmnl
Spezifische Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien = Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien/Summe Kriterien	Dmnl
Spezifische Kriteriengewichtung Stückkosten = Kriteriengewichtung Stückkosten/Summe Kriterien	Dmnl
Strategie 1 Lieferzeit pro installierter = Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 1*Einheit Transform Lieferzeit	Dmnl
Strategie 1 Stückkostenpro installierter = Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 1*Einheit Transform Stückkosten	Dmnl
Strategie 2 Lieferzeit pro installierter = Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 2*Einheit Transform Lieferzeit	Dmnl
Strategie 2 Stückkostenpro installierter = Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 2*Einheit Transform Stückkosten	Dmnl
Strategie 3 Lieferzeit pro installierter = Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 3*Einheit Transform Lieferzeit	Dmnl
Strategie 3 Stückkostenpro installierter = Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 3*Einheit Transform Stückkosten	Dmnl
Strategie 4 Lieferzeit pro installierter = Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 4*Einheit Transform Lieferzeit	Dmnl
Strategie 4 Stückkostenpro installierter = Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 4*Einheit Transform Stückkosten	Dmnl
Strategie 5 Lieferzeit pro installierter = Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 5*Einheit Transform Lieferzeit	Dmnl
Strategie 5 Stückkostenpro installierter = Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 5*Einheit Transform Stückkosten	Dmnl
Strategie 6 Lieferzeit pro installierter = Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 6*Einheit Transform Lieferzeit	Dmnl
Strategie 6 Stückkostenpro installierter = Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 6*Einheit Transform Stückkosten	Dmnl
Stückkosten EA Strategiebündel 1 LEAD: = GET VDF DA-TA('S1_EA_USA_LEAD_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten EA Strategiebündel 1 MATCH: = GET VDF DA-TA('S1_EA_USA_Match_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten EA Strategiebündel 2 LEAD: = GET VDF DA-TA('S2_EA_USA_Lead_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten EA Strategiebündel 2 MATCH: = GET VDF DA-TA('S2_EA_USA_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten EA Strategiebündel 3 LEAD: = GET VDF DA-TA('S3_EA_CN_LEAD_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten EA Strategiebündel 3 MATCH: = GET VDF DA-TA('S3_EA_CN_Match_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten EA Strategiebündel 4 LEAD: = GET VDF DA-TA('S4_EA_CN_Lead_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Stückkosten EA Strategiebündel 4 MATCH: = GET VDF DA-TA('S4_EA_CN_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten EA Strategiebündel 5 LEAD: = GET VDF DA-TA('S5_EA_USA_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten EA Strategiebündel 5 MATCH: = GET VDF DA-TA('S5_EA_USA_Match_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten EA Strategiebündel 6 LEAD: = GET VDF DA-TA('S6_EA_CN_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten EA Strategiebündel 6 MATCH: = GET VDF DA-TA('S6_EA_CN_Match_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 1 LEAD: = GET VDF DA-TA('S1_OA_USA_LEAD_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 1 MATCH: = GET VDF DA-TA('S1_OA_USA_Match_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 2 LEAD: = GET VDF DA-TA('S2_OA_USA_Lead_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 2 MATCH: = GET VDF DA-TA('S2_OA_USA_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 3 LEAD: = GET VDF DA-TA('S3_OA_CN_LEAD_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 3 MATCH: = GET VDF DA-TA('S3_OA_CN_Match_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 4 LEAD: = GET VDF DA-TA('S4_OA_CN_Lead_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 4 MATCH: = GET VDF DA-TA('S4_OA_CN_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 5 LEAD: = GET VDF DA-TA('S5_OA_USA_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 5 MATCH: = GET VDF DA-TA('S5_OA_USA_Match_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 6 LEAD: = GET VDF DA-TA('S6_OA_CN_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten OA Strategiebündel 6 MATCH: = GET VDF DA-TA('S6_OA_CN_Match_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 1 zu 2 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-2",([(-1000,-1)-(-1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(-50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 1 zu 3 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-3",([(-1000,-1)-(-1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(-50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 1 zu 4 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-4",([(-1000,-1)-(-1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(-50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 1 zu 5 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-5",([(-1000,-1)-(-1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(-50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 1 zu 6 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-6",([(-1000,-1)-(-1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(-50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 2 zu 3 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 2-3",([(-1000,-1)-(-1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(-50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl

Stückkosten Präferenz Typ 5 S 2 zu 4 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungs- differenz Strategie 2-4",([(-1000,-1)-(1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(- 50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 2 zu 5 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungs- differenz Strategie 2-5",([(-1000,-1)-(1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(- 50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 2 zu 6 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungs- differenz Strategie 2-6",([(-1000,-1)-(1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(- 50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 3 zu 4 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungs- differenz Strategie 3-4",([(-1000,-1)-(1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(- 50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 3 zu 5 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungs- differenz Strategie 3-5",([(-1000,-1)-(1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(- 50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 3 zu 6 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungs- differenz Strategie 3-6",([(-1000,-1)-(1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(- 50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 4 zu 5 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungs- differenz Strategie 4-5",([(-1000,-1)-(1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(- 50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 4 zu 6 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungs- differenz Strategie 4-6",([(-1000,-1)-(1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(- 50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Präferenz Typ 5 S 5 zu 6 = WITH LOOKUP ("StückkostenAusprägungs- differenz Strategie 5-6",([(-1000,-1)-(1000,1)],(-1000,1),(-100,0.75),(-75,0.6),(- 50,0.5),(-5,0),(0,0),(5,0),(50,0.5),(75,0.6),(100,0.75),(1000,1)))	Dmnl
Stückkosten Shock Strategiebündel 1 LEAD: = GET VDF DA- TA('S1_Shock_USA_LEAD_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 1 MATCH: = GET VDF DA- TA('S1_Shock_USA_Match_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 2 LEAD: = GET VDF DA- TA('S2_Shock_USA_Lead_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 2 MATCH: = GET VDF DA- TA('S2_Shock_USA_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 3 LEAD: = GET VDF DA- TA('S3_Shock_CN_LEAD_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 3 MATCH: = GET VDF DA- TA('S3_Shock_CN_Match_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 4 LEAD: = GET VDF DA- TA('S4_Shock_CN_Lead_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 4 MATCH: = GET VDF DA- TA('S4_Shock_CN_MATCH_HEV_60_NC.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 5 LEAD: = GET VDF DA- TA('S5_Shock_USA_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 5 MATCH: = GET VDF DA- TA('S5_Shock_USA_Match_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 6 LEAD: = GET VDF DA- TA('S6_Shock_CN_LEAD_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
Stückkosten Shock Strategiebündel 6 MATCH: = GET VDF DA- TA('S6_Shock_CN_Match_No_HEV_72_All.vdf','Stückkosten pro kWh',0, 1)	€/kWh
StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-2 = (Strategie 1 Stückkostenpro	Dmnl

Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 2 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 3 über 2	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 4 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 3 über 4	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 5 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 3 über 5	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 3 über 6 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 3 über 6	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 1 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 4 über 1	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 2 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 4 über 2	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 3 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 4 über 3	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 5 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 4 über 5	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 4 über 6 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 4 über 6	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 1 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 5 über 1	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 2 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 5 über 2	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 3 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 5 über 3	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 4 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 5 über 4	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 5 über 6 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 5 über 6	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 1 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 6 über 1	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 2 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 6 über 2	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 3 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 6 über 3	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 4 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 6 über 4	Dmnl
Stückkostengewichtete Präferenz Strategie 6 über 5 = Normierung Stückkosten*StückkostenPräferenz Strategie 6 über 5	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 1 über 2 = IF THEN ELSE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-2">0, "StückkostenStrategie 1-2 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 1 über 3 = IF THEN ELSE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-3">0, "StückkostenStrategie 1-3 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 1 über 4 = IF THEN ELSE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-4">0, "StückkostenStrategie 1-4 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 1 über 5 = IF THEN ELSE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-5">0, "StückkostenStrategie 1-5 Präferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 1 über 6 = IF THEN ELSE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-6">0, "StückkostenStrategie 1-6	Dmnl

Päferenz Struktur Typ 5", 0)	
StückkostenPräferenz Strategie 2 über 1 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-2"<0, "StückkostenStrategie 1-2 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 2 über 3 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 2-3">0, "StückkostenStrategie 2-3 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 2 über 4 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 2-4">0, "StückkostenStrategie 2-4 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 2 über 5 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 2-5">0, "StückkostenStrategie 2-5 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 2 über 6 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 2-6">0, "StückkostenStrategie 2-6 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 3 über 1 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-3"<0, "StückkostenStrategie 1-3 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 3 über 2 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 2-3"<0, "StückkostenStrategie 2-3 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 3 über 4 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 3-4">0, "StückkostenStrategie 3-4 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 3 über 5 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 3-5">0, "StückkostenStrategie 3-5 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 3 über 6 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 3-6">0, "StückkostenStrategie 3-6 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 4 über 1 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-4"<0, "StückkostenStrategie 1-4 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 4 über 2 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 2-4"<0, "StückkostenStrategie 2-4 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 4 über 3 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 3-4"<0, "StückkostenStrategie 3-4 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 4 über 5 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 4-5">0, "StückkostenStrategie 4-5 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 4 über 6 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 4-6">0, "StückkostenStrategie 4-6 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 5 über 1 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-5"<0, "StückkostenStrategie 1-5 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 5 über 2 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 2-5"<0, "StückkostenStrategie 2-5 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl

StückkostenPräferenz Strategie 5 über 3 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 3-5"<0, "StückkostenStrategie 3-5 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 5 über 4 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 4-5"<0, "StückkostenStrategie 4-5 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 5 über 6 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 5-6">0, "StückkostenStrategie 5-6 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 6 über 1 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 1-6"<0, "StückkostenStrategie 1-6 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 6 über 2 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 2-6"<0, "StückkostenStrategie 2-6 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 6 über 3 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 3-6"<0, "StückkostenStrategie 3-6 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 6 über 4 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 4-6"<0, "StückkostenStrategie 4-6 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenPräferenz Strategie 6 über 5 = IF THEN EL- SE("StückkostenAusprägungsdifferenz Strategie 5-6"<0, "StückkostenStrategie 5-6 Päferenz Struktur Typ 5", 0)	Dmnl
StückkostenStrategie 1-2 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 1 zu 2	Dmnl
StückkostenStrategie 1-3 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 1 zu 3	Dmnl
StückkostenStrategie 1-4 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 1 zu 4	Dmnl
StückkostenStrategie 1-5 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 1 zu 5	Dmnl
StückkostenStrategie 1-6 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 1 zu 6	Dmnl
StückkostenStrategie 2-3 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 2 zu 3	Dmnl
StückkostenStrategie 2-4 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 2 zu 4	Dmnl
StückkostenStrategie 2-5 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 2 zu 5	Dmnl
StückkostenStrategie 2-6 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 2 zu 6	Dmnl
StückkostenStrategie 3-4 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 3 zu 4	Dmnl
StückkostenStrategie 3-5 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 3 zu 5	Dmnl
StückkostenStrategie 3-6 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 3 zu 6	Dmnl
StückkostenStrategie 4-5 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 4 zu 5	Dmnl
StückkostenStrategie 4-6 Päferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 4 zu 6	Dmnl

Stückkostenstrategie 5-6 Präferenz Struktur Typ 5 = Stückkosten Präferenz Typ 5 S 5 zu 6	Dmnl
Summe der Gewichtungen = Gewichtung Landesinterne Förderungen+Gewichtung Nähe zu den Kunden+Gewichtung Schutz des geistigen Eigentums+Gewichtung Soziale Produktionsbedingungen+Gewichtung Verfügbarkeit von qual Personal	Dmnl
Summe Kriterien = Kriteriengewichtung Lieferzeit+Kriteriengewichtung standortabhängige Kriterien+Kriteriengewichtung Stückkosten	Dmnl
Szenariowahl = 2	Dmnl
Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 1: = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 1 = 1, Lieferzeit OA Strategiebündel 1 MATCH, Lieferzeit OA Strategiebündel 1 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 1 = 1, Lieferzeit EA Strategiebündel 1 MATCH, Lieferzeit EA Strategiebündel 1 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 1 = 1, Lieferzeit Shock Strategiebündel 1 MATCH, Lieferzeit Shock Strategiebündel 1 LEAD)))	Monat
Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 2: = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 2 = 1, Lieferzeit OA Strategiebündel 2 MATCH, Lieferzeit OA Strategiebündel 2 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 2 = 1, Lieferzeit EA Strategiebündel 2 MATCH, Lieferzeit EA Strategiebündel 2 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 2 = 1, Lieferzeit Shock Strategiebündel 2 MATCH, Lieferzeit Shock Strategiebündel 2 LEAD)))	Monat
Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 3: = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 3 = 1, Lieferzeit OA Strategiebündel 3 MATCH, Lieferzeit OA Strategiebündel 3 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 3 = 1, Lieferzeit EA Strategiebündel 3 MATCH, Lieferzeit EA Strategiebündel 3 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 3 = 1, Lieferzeit Shock Strategiebündel 3 MATCH, Lieferzeit Shock Strategiebündel 3 LEAD)))	Monat
Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 4: = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 4 = 1, Lieferzeit OA Strategiebündel 4 MATCH, Lieferzeit OA Strategiebündel 4 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 4 = 1, Lieferzeit EA Strategiebündel 4 MATCH, Lieferzeit EA Strategiebündel 4 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 4 = 1, Lieferzeit Shock Strategiebündel 4 MATCH, Lieferzeit Shock Strategiebündel 4 LEAD)))	Monat
Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 5: = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 5 = 1, Lieferzeit OA Strategiebündel 5 MATCH, Lieferzeit OA Strategiebündel 5 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 5 = 1, Lieferzeit EA Strategiebündel 5 MATCH, Lieferzeit EA Strategiebündel 5 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 5 = 1, Lieferzeit Shock Strategiebündel 5 MATCH, Lieferzeit Shock Strategiebündel 5 LEAD)))	Monat
Szenariozuordnung Lieferzeit Strategiebündel 6: = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 6 = 1, Lieferzeit OA Strategiebündel 6 MATCH, Lieferzeit OA Strategiebündel 6 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 6 = 1, Lieferzeit EA Strategiebündel 6 MATCH, Lieferzeit EA Strategiebündel 6 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 6 = 1, Lieferzeit Shock Strategiebündel 6 MATCH, Lieferzeit Shock Strategiebündel 6 LEAD)))	Monat
Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 1 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, Externe Kriterien OA Strategiebündel 1, IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, Externe Kriterien EA Strategiebündel 1, Externe Kriterien Shock	Dmnl

Strategiebündel 1))	
Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 2 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, Externe Kriterien OA Strategiebündel 2,IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, Externe Kriterien EA Strategiebündel 2, Externe Kriterien Shock Strategiebündel 2))	Dmnl
Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 3 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, Externe Kriterien OA Strategiebündel 3,IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, Externe Kriterien EA Strategiebündel 3, Externe Kriterien Shock Strategiebündel 3))	Dmnl
Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 4 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, Externe Kriterien OA Strategiebündel 4,IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, Externe Kriterien EA Strategiebündel 4, Externe Kriterien Shock Strategiebündel 4))	Dmnl
Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 5 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, Externe Kriterien OA Strategiebündel 5,IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, Externe Kriterien EA Strategiebündel 5, Externe Kriterien Shock Strategiebündel 5))	Dmnl
Szenariozuordnung standortabhängige Kriterien Strategiebündel 6 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, Externe Kriterien OA Strategiebündel 6,IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, Externe Kriterien EA Strategiebündel 6, Externe Kriterien Shock Strategiebündel 6))	Dmnl
Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 1 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 1 = 1, Stückkosten OA Strategiebündel 1 MATCH, Stückkosten OA Strategiebündel 1 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 1 = 1, Stückkosten EA Strategiebündel 1 MATCH, Stückkosten EA Strategiebündel 1 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 1 = 1, Stückkosten Shock Strategiebündel 1 MATCH, Stückkosten Shock Strategiebündel 1 LEAD)))	€/kWh
Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 2 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 2 = 1, Stückkosten OA Strategiebündel 2 MATCH, Stückkosten OA Strategiebündel 2 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 2 = 1, Stückkosten EA Strategiebündel 2 MATCH, Stückkosten EA Strategiebündel 2 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 2 = 1, Stückkosten Shock Strategiebündel 2 MATCH, Stückkosten Shock Strategiebündel 2 LEAD)))	€/kWh
Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 3 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 3 = 1, Stückkosten OA Strategiebündel 3 MATCH, Stückkosten OA Strategiebündel 3 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 3 = 1, Stückkosten EA Strategiebündel 3 MATCH, Stückkosten EA Strategiebündel 3 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 3 = 1, Stückkosten Shock Strategiebündel 3 MATCH, Stückkosten Shock Strategiebündel 3 LEAD)))	€/kWh
Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 4 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 4 = 1, Stückkosten OA Strategiebündel 4 MATCH, Stückkosten OA Strategiebündel 4 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 4 = 1, Stückkosten EA Strategiebündel 4 MATCH, Stückkosten EA Strategiebündel 4 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 4 = 1, Stückkosten Shock Strategiebündel 4 MATCH, Stückkosten Shock Strategiebündel 4 LEAD)))	€/kWh

Anhang 4: Mathematische Gleichungen des Simulationsmodells

Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 5 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 5 = 1, Stückkosten OA Strategiebündel 5 MATCH, Stückkosten OA Strategiebündel 5 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 5 = 1, Stückkosten EA Strategiebündel 5 MATCH, Stückkosten EA Strategiebündel 5 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 5 = 1, Stückkosten Shock Strategiebündel 5 MATCH, Stückkosten Shock Strategiebündel 5 LEAD)))	€/kWh
Szenariozuordnung Stückkosten Strategiebündel 6 = IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 6 = 1, Stückkosten OA Strategiebündel 6 MATCH, Stückkosten OA Strategiebündel 6 LEAD), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 6 = 1, Stückkosten EA Strategiebündel 6 MATCH, Stückkosten EA Strategiebündel 6 LEAD), IF THEN ELSE(Inputänderung Kapazitätsstrategie Strategie 6 = 1, Stückkosten Shock Strategiebündel 6 MATCH, Stückkosten Shock Strategiebündel 6 LEAD)))	€/kWh
Verfügbarkeit von qual Personal CN = 3	Dmnl
Verfügbarkeit von qual Personal USA = 3+IF THEN ELSE(Szenariowahl = 0, RAMP(1/120, 0, 120), IF THEN ELSE(Szenariowahl = 1, RAMP(1/84, 0, 84), RAMP(1/63, 0, 63)))	Dmnl

Die strategische Planung der Produktion im Kontext junger Märkte ist in besonderem Maße von hoher Komplexität und Unsicherheiten geprägt. Unter diesen Rahmenbedingungen können strategische Entscheidungen nur noch bedingt rational und systematisch getroffen werden. Mitunter können diese jedoch von existenzieller Bedeutung für Unternehmen sein. Die große Mehrheit bestehender Ansätze und Methoden der strategischen Planung bieten unter den genannten Rahmenbedingungen jedoch keine adäquate Entscheidungshilfe. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Planungsmethodik entwickelt, die es erlaubt, Produktionsstrategien in jungen Märkten ex ante und dynamisch zu bewerten, um so vorteilhafte Produktionsstrategien zu identifizieren. Dies geschieht am Beispiel des Marktes für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (LiB). Wesentlicher Bestandteil der Planungsmethodik bildet ein Entscheidungsunterstützungsinstrument, das die Vorteile von systemdynamischer Simulation, als Methode zur Wirkungsprognose und systemischen Analyse sowie von PROMETHEE als multikriterielle Bewertungsmethode kombiniert.