Johannes Stoldt

Gestaltungsmethodik für Simulationsstudien in Umplanungsprojekten zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken

Johannes Stoldt

Gestaltungsmethodik für Simulationsstudien in Umplanungsprojekten zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Universitätsverlag Chemnitz
2019

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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



Das Werk - ausgenommen Zitate, Cover, Logo TU Chemnitz und Bildmaterial im Text - steht unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licences/by/4.0/deed.de

Titelgrafik: Johannes Stoldt
Satz/Layout: Johannes Stoldt

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
https://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag

readbox unipress
in der readbox publishing GmbH
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
http://unipress.readbox.net

ISBN 978-3-96100-093-7

http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-343579



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Gestaltungsmethodik für Simulationsstudien in Umplanungsprojekten zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von	Dipl.-Ing. Johannes Stoldt	
geboren am	20.01.1988	in Greifswald
eingereicht am	12.04.2018	
verteidigt am	28.05.2019	

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Putz
	Prof. Dr.-Ing. Egon Müller
	Prof. Dr. Prof. h. c. Uwe Götze

Bibliographische Beschreibung

Stoldt, Johannes

Thema
Gestaltungsmethodik für Simulationsstudien in Umplanungsprojekten zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Chemnitz,
Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse,
Chemnitz,
2019

376 Seiten
54 Abbildungen
62 Tabellen
313 Literaturquellen
5 Anhänge

Schlagworte

Effizienzmaßnahme, Energieeffizienz, Entscheidungstheorie, Expertensystem, Fabrik, Lösungsmodul, Materialflusssimulation, Methodik, Simulationsstudie, Vorgehensmodell

Kurzreferat

Die effektive sowie effiziente Planung von Energieeffizienzmaßnahmen hat große Bedeutung für Produktionsunternehmen. Die um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation ist ein in diesem Kontext zunehmend eingesetztes Planungswerkzeug. Es ermöglicht die Analyse komplexer Wechselwirkungen von Material- und Energieflüssen in Fabriken ermöglicht. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie eine Methodik zur Ausgestaltung derartiger Simulationsstudien speziell in Umplanungsprojekten zur Energieeffizienzsteigerung zu konzeptionieren sowie zu systematisieren ist. Unter besonderer Beachtung entscheidungstheoretischer Ansätze soll es Anwendern somit ermöglicht werden, unabhängig von eingesetzten Simulationslösungen projektspezifische Ausprägungen für die relevanten Gestaltungsaspekte einer Simulationsstudie in diesem Problemfeld zu bestimmen (z. B. zur Art und Weise der Modellierung des Energieverbrauchs). Ausgehend von identifizierten Defiziten im Stand von Wissenschaft und Technik werden in der Arbeit zunächst Anforderungen an das Konzeptionierungsergebnis formuliert. Aus diesen wird ein Lösungskonzept abgeleitet, das sich aus einem übergreifendem Vorgehensmodell sowie Lösungsmodulen zur Unterstützung von Entscheidungen hinsichtlich der Ausprägung ausgewählter Gestaltungsaspekte zusammensetzt. Das 13 Schritte umfassende Vorgehensmodell teilt sich in fabrikplanerische Vorarbeiten und Durchführung der Simulationsstudie. Somit wird der gesamte Prozess von der Entwicklung einer Effizienzmaßnahme über die eigentliche Simulationsanwendung in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1:2014 bis hin zur finalen Investitionsentscheidung unterstützt. Mithilfe der neun Lösungsmodule kann der Anwender eine möglichst effiziente Entscheidung hinsichtlich der zu präferierenden Ausprägung für die jeweiligen Gestaltungsaspekte treffen. Hierzu systematisieren diese identifizierte Entscheidungskriterien, Lösungsvarianten, Umwelteinflüsse und Entscheidungsverfahren. Exemplarisch wurde die im Ergebnis der Arbeit stehende Methodik an drei Fallstudien erprobt. Dabei konnten alle eingangs definierten Anforderungen erfolgreich geprüft werden. Im Weiteren kann auf Grundlage der vorliegenden Arbeit u. a. ein Expertensystem implementiert werden. Ein solches kann den Anwender interaktiv bei den verschiedenen zu treffenden Entscheidungen im Verlauf einer Simulationsstudie unterstützen und alle relevanten Daten für die Simulationserstellung sowie -experimente verwalten.

Abstract

Effective and efficient planning of energy efficiency measures is of great importance to manufacturing companies. Material flow simulation that has been extended to also include energy is increasingly used as a planning tool in this context. It allows for the analysis of complex interactions between material flows and energy flows in factories. This thesis investigates, how a methodology for designing such simulation studies specifically in re-planning projects that aim for energy efficiency improvements can be conceived and systematised. Taking basic approaches from decision theory into particular consideration, the methodology is intended to guide users in deciding on the project-specific manifestation for relevant characteristics of a simulation study in this problem area (e.g. the manner to model energy consumption), regardless of the utilised simulation solution. Based on deficits identified in the state of the art, requirements for the conceptional result are initially formulated within the thesis. A solution is derived from these and comprises an overarching process model as well as solution modules to support decisions concerning the choice of manifestation for selected characteristics. The process model consists of 13 steps and is divided into factory-planning-related preparatory work and the execution of a simulation study. Hence, the entire process from the development of an energy efficiency measure through the actual application of simulation following VDI guideline 3633 Part 1:2014 to the eventual investment decision is assisted. The user is supported to take the most efficient decision concerning the preferable manifestation of the respective characteristics by means of nine solution modules. These systematise identified decision criteria, alternatives, environmental influences and decision-making procedures. The results of this thesis were exemplarily tested in three case studies. All initially defined requirements could thereby be positively verified. Subsequently, it will be possible to, inter alia, implement an expert system based on this thesis. Such would allow for supporting the user interactively in taking the various decisions to be made in the course of a simulation study and to manage all data relevant to the creation of the simulation as well as for simulation experiments.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Matthias Putz, Institutsleiter des Fraunhofer IWU, möchte ich für die freundliche Förderung und die intensive Betreuung meiner Arbeit danken. Seine Impulse aus zahlreichen Diskussionen und das mir entgegengebrachte Vertrauen haben maßgeblich zu dem vorliegenden Ergebnis beigetragen.

Univ.-Prof. Dr. Uwe Götze danke ich für die Übernahme eines Gutachtens und seine Bereitschaft, bereits frühzeitig in einen Gedankenaustausch zu meinem Lösungskonzept einzutreten. Unsere gemeinsamen Forschungsarbeiten haben mich an die Entscheidungstheorie herangeführt und sind zugleich eine wichtige Grundlage für diese Arbeit.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Egon Müller danke ich ebenfalls für die Übernahme eines Gutachtens sowie für das meiner Dissertation entgegengebrachte Interesse. In den Lehrveranstaltungen seiner Professur konnte ich mir bereits in der Vertiefung meines Diplomstudiums ein fachliches Fundament für die Promotion erarbeiten.

Mein Dank gilt zudem Dr.-Ing. Andreas Schlegel, der mich in meiner gesamten Zeit am Fraunhofer IWU förderte und dessen kritischen Anmerkungen eine große Hilfe in der Erstellung dieser Arbeit waren. Bei Dipl.-Wirtsch.-Ing. Enrico Franz möchte ich mich für die freundschaftliche Zusammenarbeit am Fraunhofer IWU und seine konstruktiven Hinweise zum Manuskript bedanken. Dipl.-Math. Christin Fanghänel gilt mein Dank für die vertrauensvolle Arbeit an gemeinsamen Projekten, insbesondere zur Simulation des Tagebaus Welzow-Süd. Ebenso möchte ich allen Kollegen und Studenten danken, die mich direkt oder indirekt in meiner Arbeit am Fraunhofer IWU und an der Dissertation unterstützten.

Weiterhin gilt mein Dank den Mitgliedern der ASIM SPL Arbeitsgruppe „Betrachtung energetischer Einflüsse in Simulation in Produktion und Logistik“. Die Ergebnisse der Zusammenarbeit mit ihnen sind in vielfältiger Weise eine Grundlage für diese Arbeit.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Isabel Stoldt, Dr.-Ing. Markus Klemm und Mandy Bernhardt, M.A. für die finale Durchsicht des Manuskripts. Ihr Eifer und ihre unzähligen Hinweise haben unschätzbar zur vorliegenden Arbeit beigetragen.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern Isabel und Joachim für ihren fortwährenden Rückhalt und Rat in allen Lebenslagen bedanken. Meiner Frau Lena Spillecke danke ich aus ganzem Herzen für ihren steten Zuspruch, ihre unerschöpfliche Geduld und ihren Antrieb auch abseits der Wissenschaft. Großer Dank gilt zudem meinem Bruder Paul, meinen Großeltern und all meinen Freunden für ihre andauernde Unterstützung.

Heidelberg, im Juni 2019 Johannes Stoldt

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 15
Tabellenverzeichnis 19
Abkürzungsverzeichnis 23
Kurzzeichenverzeichnis 25
1 Einleitung 27
1.1 Problemstellung 28
1.2 Zielsetzung 30
1.3 Aufbau der Arbeit 32
2 Stand von Wissenschaft und Technik 35
2.1 Energieeffizienz in Fabriken 35
2.1.1 Betrachtungsraum der Fabrikplanung 35
2.1.2 Effizienz als Entwicklungstreiber von Industriebetrieben 38
2.1.3 Planung energieeffizienter Fabriken 44
2.1.4 Handlungsebenen und -ansätze zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken 48
2.2 Entscheidungstheorie 53
2.2.1 Überblick 53
2.2.2 Heuristische Entscheidungsverfahren 58
2.3 Simulation in der Fabrikplanung 62
2.3.1 Digitale Fabrik und Materialflusssimulation 62
2.3.2 Materialflusssimulation mit integrierter Betrachtung von Energie 69
2.3.3 Systematische Literaturanalyse zur Simulation mit Energiebetrachtung 73
2.4 Vorgehensmodelle zur Durchführung von Simulationsstudien 83
2.4.1 Vorgehen nach VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 84
2.4.2 Vorgehen nach Fritz 86
2.4.3 Vorgehen nach Solding 87
2.4.4 Vorgehen nach Khalaf 89
2.4.5 Vorgehen nach Thiede 90
2.4.6 Vorgehen nach Haag 91
2.4.7 Vorgehen nach Sproedt et al 93
2.4.8 Vorgehen nach Beier 94
2.4.9 Diskussion bestehender Vorgehensmodelle 97
3 Handlungsbedarf und Lösungskonzept 99
3.1 Ableitung von Anforderungen an die Gestaltungsmethodik 99
3.1.1 Defizite im Stand von Wissenschaft und Technik 99
3.1.2 Anforderungen für die Konzeptionierung der Gestaltungsmethodik 103

3.2 Vorüberlegungen zum Lösungskonzept....107
3.2.1 Zielsystem des Simulationsanwenders....108
3.2.2 Grundkonzept der Gestaltungsmethodik....110
3.2.3 Planungsfälle und Konkretisierung des Betrachtungsfokus....112
3.2.4 Zur Verwendung des Analytischen Hierarchie Prozesses (AHP)....116
3.3 Struktur und Inhalt des Vorgehensmodells....123
3.3.1 Synthese und Folge der Arbeitsschritte....123
3.3.2 Gestaltungsaspekte der um energetische Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation....128
4 Vorstellung der Arbeitsschritte und Lösungsmodule....135
4.1 Hinweise zum praktischen Einsatz der Gestaltungsmethodik....135
4.2 Fabrikplanerische Vorarbeiten: Planungsbezogene Entscheidungen…137
4.2.1 Festlegung der Restriktionen für das Planungsprojekt....137
4.2.2 Bestimmung des Planungsfalls....139
4.2.3 Auswahl einer möglichen Effizienzmaßnahme....142
4.2.4 Ausarbeitung der Planungslösung....148
4.2.5 Simulationswürdigkeit....149
4.3 Durchführung der Simulationsstudie: Simulationsbezogene Entscheidungen....155
4.3.1 Definition der Simulationsaufgabe....155
4.3.2 Systemanalyse....163
4.3.3 Modellformalisierung....176
4.3.4 Datenbeschaffung....179
4.3.5 Datenaufbereitung....183
4.3.6 Implementierung....186
4.3.7 Experimente und Analyse....187
4.3.8 Investitionsentscheidung und Realisierung....189
4.4 Zwischenfazit....191
5 Exemplarische Erprobung der Gestaltungsmethodik....195
5.1 Methodisches Vorgehen....195
5.2 Kurzvorstellung der generischen Simulationslösung eniBRIC....198
5.3 Ergebnisse der Erprobung....200
5.3.1 Fallstudie 1: Energiesensitive Fertigungssteuerung in einer Karosserieendmontage....201
5.3.2 Fallstudie 2: Energieangebotsorientierte Produktionsplanung und -steuerung in einer Werkstattfertigung....205
5.3.3 Fallstudie 3: Flexibilitätsanalyse in einem Tagebaubetrieb....209
5.4 Diskussion....213

6 Zusammenfassung und Ausblick....219
6.1 Ergebnisse der Arbeit....219
6.2 Ansätze für zukünftige Forschungsarbeiten....222
Literaturverzeichnis....225
Anhänge....257

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Einordnung von relevanten Entscheidungen bezüglich Unternehmen, Planungsprozess und Simulation....31
Abbildung 1.2: Aufbau der vorliegenden Arbeit....33
Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen Kundenwunsch, Wertschöpfungs-, Produktionsprozess sowie Produktions- und Fabriksystem [22, S. 48]....37
Abbildung 2.2: Technologie als „Enabler" der Nachhaltigkeit [30]....39
Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen Energiebedarf und Energieeffizienzpotenzialen (nicht maßstäblich)....41
Abbildung 2.4: Handlungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsanlagen [13, S. 123]....45
Abbildung 2.5: Planungsfokus nach Strukturebenen von Produkten und Fabriken....50
Abbildung 2.6: Vergleich von heuristischen und analytischen Entscheidungsverfahren [63, S. 48]....58
Abbildung 2.7: Grundform des allgemeinen heuristischen Entscheidungsverfahrens in Anlehnung an [63, S. 66]....60
Abbildung 2.8: Digitale Produktion als Verknüpfung von Produktentwicklung, Produktions- und Fabrikplanung [73, S. 94]....63
Abbildung 2.9: Allgemeines Prozessmodell für die Produktentstehung innerhalb der Automobilindustrie nach [76, S. 23]....64
Abbildung 2.10: Einsatzbereiche unterschiedlicher Simulationsmethoden und -techniken....67
Abbildung 2.11: Fragestellungen der Simulation [44, S. 380]....68
Abbildung 2.12: Paradigmen zur Simulation von Energieflüssen in Produktionssystemen mittels DES nach [23, S. 85]....71
Abbildung 2.13: Notwendige Daten, Simulationsgeschwindigkeit und Erhebungsaufwand unterschiedlicher Energieabbildungsfunktionen [114]....72
Abbildung 2.14: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie Simulationsziel....76
Abbildung 2.15: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie Planungsaufgabe....77
Abbildung 2.16: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie Werkzeug....79
Abbildung 2.17: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie Experimentplanung....80

Abbildung 2.18: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie betrachtete Größen....81
Abbildung 2.19: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie Energiemodell....82
Abbildung 2.20: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie nach [19, S. 19]....85
Abbildung 2.21: Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio [143, S. 47]....87
Abbildung 2.22: Hauptschritte der Methodik von Solding nach [86, S. 57]....88
Abbildung 2.23: Vorgehensmodell zur Entwicklung energieeffizienter Fertigungsstrategien für Prozessketten in Anlehnung an [90, S. 60]....90
Abbildung 2.24: Simulationsorientiertes Vorgehensmodell zur Verbesserung von Energie- und Ressourceneffizienz nach [23, S. 131]....91
Abbildung 2.25: Methodik zur Planung, Bewertung und Optimierung der Energieeffizienz nach [93, S. 71]....92
Abbildung 2.26: Vorgehen zur Systemanalyse und -modellierung in Anlehnung an [100]....94
Abbildung 2.27: Vorgehen zur Verbesserung der Energieflexibilität nach [97, S. 162]....96
Abbildung 3.1: Zusammenhang der Lösungsaspekte zur Entwicklung der Gestaltungsmethodik....107
Abbildung 3.2: Beziehung der Effizienz von Maßnahmenrealisierung, Planungsprojekt und Simulationsstudie im Hinblick auf Gleichung (3.1)....109
Abbildung 3.3: Grundlegendes Zielsystem des Simulationsanwenders....110
Abbildung 3.4: Grundkonzept der Gestaltungsmethodik....112
Abbildung 3.5: Assoziation von Planungsfällen mit möglichen Handlungsansätzen (in Anlehnung an Müller et al. [13, S. 123 ff.])....115
Abbildung 3.6: Struktur des Problemlösungszyklus und Einordnung zu treffender Entscheidungen in Anlehnung an [57, S. 18]....124
Abbildung 3.7: Übergeordnetes Vorgehensmodell der Gestaltungsmethodik....126
Abbildung 4.1: Schaubild zum praktischen Einsatz der Gestaltungsmethodik....136

Abbildung 4.2: Beispielhaftes Portfolio zur Auswahl eines Maßnahmenvorschlags....146
Abbildung 4.3: Flussdiagramm zur Prüfung der Simulationswürdigkeit....150
Abbildung 4.4: Zuordnung der relevanten Gruppen von Kennzahlen zu den Aufgabenkategorien....159
Abbildung 4.5: Flussdiagramm zur Auswahl der Experimentplanungsmethode....162
Abbildung 4.6: Flussdiagramm zur Bestimmung der Systemgrenzen der Energieflusssysteme....165
Abbildung 4.7: Zielsystem für die Auswahl des Energiemodells....171
Abbildung 4.8: Zielsystem zur Auswahl eines Ansatzes für die Werkzeugarchitektur....175
Abbildung 4.9: Zielsystem für die Auswahl von Energiedatenakquisemethode....183
Abbildung 5.1: In eniBRIC implementierte Komponentenmodelle nach [201]....199
Abbildung 5.2: Zusammenwirken der eniBRIC-Bausteine [214]....200
Abbildung 5.3: Entwickeltes Simulationsmodell für Fallstudie 1 [214]....203
Abbildung 5.4: Entwickeltes Simulationsmodell für Fallstudie 2 [224]....208
Abbildung 5.5: Entwickeltes Simulationsmodell für Fallstudie 3 [200]....212
Abbildung 6.1: Überblick der Gestaltungsmethodik....221
Abbildung D.1: Vorauswahl von Lösungsvarianten und Ergebnisdarstellung in entwickelter Tabellenkalkulation....314
Abbildung D.2: Variantenvergleich für Kriterium Datenbeschaffungsaufwand in entwickelter Tabellenkalkulation....314
Abbildung D.3: Zwischenergebnisse der Berechnung von Prioritäten und Konsistenzprüfung in entwickelter Tabellenkalkulation....315

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Handlungsansätze für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrikplanung....51
Tabelle 2.2: Dimensionen von Entscheidungsproblemen und ihre Ausprägungen [63, S. 9]....54
Tabelle 2.3: Dimensionen von Entscheidungsverfahren und ihre Ausprägungen [63, S. 45]....56
Tabelle 2.4: Simulationsmethoden in der Digitalen Fabrik nach [16, S. 112 ff.]....65
Tabelle 2.5: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie Simulationsziel....75
Tabelle 2.6: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie Planungsaufgabe....76
Tabelle 2.7: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie Werkzeug....78
Tabelle 2.8: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie Experimentplanung....79
Tabelle 2.9: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie betrachtete Größen....80
Tabelle 2.10: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie Energiemodell....81
Tabelle 2.11: Übersicht zur Einschätzung der bestehenden Vorgehensmodelle....97
Tabelle 3.1: Erkenntnisse aus der systematischen Literaturanalyse....101
Tabelle 3.2: Planungsfälle abgeleitet aus Kombination der Bestimmtheitsgrade....114
Tabelle 3.3: Matrix zum paarweisen Vergleich der Kriterien für effiziente Simulationsanwendung....119
Tabelle 3.4: Skala zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit im Paarvergleich übersetzt nach [155]....119
Tabelle 3.5: Matrixgröße und zugehöriger Zufallsindex RI [156, S. 21]....121
Tabelle 3.6: Übersicht der entwickelten Lösungsmodule....131
Tabelle 3.7: Vorlage für Steckbrief eines Lösungsmoduls....133
Tabelle 4.1: Steckbrief des Lösungsmoduls Planungsfall....140
Tabelle 4.2: Steckbrief des Lösungsmoduls Effizienzmaßnahme....143
Tabelle 4.3: Übersicht abstrahierter Maßnahmen je Handlungsansatz und Planungsfall in Anlehnung an [13, S. 123 ff.]....144
Tabelle 4.4: Steckbrief des Lösungsmoduls Simulationswürdigkeit....149

Tabelle 4.5: Maßnahmenbezogene Bewertungsindikatoren zur Simulationswürdigkeit....154
Tabelle 4.6: Steckbrief des Lösungsmoduls Zielsystem für Simulation....156
Tabelle 4.7: Typische Aufgabenkategorien und Kennzahlen in Simulationsstudien mit iSvMEF....158
Tabelle 4.8: Steckbrief des Lösungsmoduls Experimentplanungsmethode 160
Tabelle 4.9: Steckbrief des Lösungsmoduls Systemgrenzen der Energieflusssysteme....164
Tabelle 4.10: Maßnahmenbezogene Bewertungsindikatoren zu Systemgrenzen....168
Tabelle 4.11: Steckbrief des Lösungsmoduls Energiemodell....170
Tabelle 4.12: Globale Priorität der Entscheidungskriterien zur Auswahl des Energiemodells....172
Tabelle 4.13: Steckbrief des Lösungsmoduls Werkzeug/-architektur....173
Tabelle 4.14: Modellierungsansätze für Energieflusselemente....178
Tabelle 4.15: Steckbrief des Lösungsmoduls Energiedatenakquisemethode.179
Tabelle 4.16: Eignung der Energiedatenakquisemethoden für Rohdatenbeschaffung der Energiemodelle....181
Tabelle 4.17: Typische Eingangsdaten und Verarbeitungsansätze für Energiemodelle....184
Tabelle 5.1: Vergleich der gewählten Ausprägung für Gestaltungsaspekte der Simulationsstudie in Fallstudie 1....204
Tabelle 5.2: Vergleich der gewählten Ausprägung für Gestaltungsaspekte der Simulationsstudie in Fallstudie 2....208
Tabelle 5.3: Vergleich der gewählten Ausprägung für Gestaltungsaspekte der Simulationsstudie in Fallstudie 3....213
Tabelle A.1: Abkürzungen zur Übersicht der Literaturanalyse und Anteil je Ausprägung....259
Tabelle A.2: Ergebnisübersicht der systematischen Literaturanalyse....261
Tabelle B.1: Bewertungsschema für Vorgehensmodelle zur Durchführung von Simulationsstudien....275
Tabelle D.1: Checkliste zur Erfassung planungsbezogener Entscheidungen und Ergebnisse....283
Tabelle D.2: Checkliste zur Erfassung simulationsbezogener Entscheidungen und Ergebnisse....287
Tabelle D.3: Erläuterung der abstrahierten Maßnahmen....297
Tabelle D.4: Literaturgestützte Charakterisierung von Experimentplanungsmethoden....306

Tabelle D.5: Kriterien und Aspekte zur Bewertung für Lösungsmodul Energiemodell....308
Tabelle D.6: Einschätzung der Lösungsvarianten bezüglich der Entscheidungskriterien....310
Tabelle D.7: Gewichtung der Primärkriterien zur Bewertung von Lösungsvarianten für die Auswahl von Energiemodell....311
Tabelle D.8: Aufwandsabschätzung und Rangfolge nach [309, S. 10]....312
Tabelle D.9: Gewichtung der Sekundärkriterien für Aufwand....312
Tabelle D.10: Gewichtung der Sekundärkriterien für Detaillierungsfähigkeit....313
Tabelle D.11: Anforderungen der Energiemodelle an Simulationsumgebung....316
Tabelle D.12: Beschreibung der Architekturansätze....318
Tabelle D.13: Einschätzung der Architekturansätze hinsichtlich ausgewählter Kriterien....322
Tabelle D.14: Eignung der Architekturansätze für Modellierung der Energiemodelle....323
Tabelle D.15: Charakterisierung der Energiedatenakquisemethoden....324
Tabelle E.1: Checkliste fabrikplanerische Vorarbeiten zur Fallstudie 1....329
Tabelle E.2: Checkliste Durchführung der Simulationsstudie zur Fallstudie 1....334
Tabelle E.3: Checkliste fabrikplanerische Vorarbeiten zur Fallstudie 2....345
Tabelle E.4: Checkliste Durchführung der Simulationsstudie zur Fallstudie 2....349
Tabelle E.5: Checkliste fabrikplanerische Vorarbeiten zur Fallstudie 3....360
Tabelle E.6: Checkliste Durchführung der Simulationsstudie zur Fallstudie 3....364

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
iSvMEF	integrierte Simulation von Material- und Energieflüssen
AHP	Analytischer Hierarchie Prozess
ASIM	Arbeitsgemeinschaft Simulation
BZ	Betriebszustand
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DES	Discrete Event Simulation (Ereignisdiskrete Simulation)
DoE	Design of Experiment (Statistische Versuchsplanung)
E400	Elektrizität mit 400 V
EU	Europäische Union
FA	Fertigungsablauf
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
GI	Gesellschaft für Informatik
ITO	Input-Throughput-Output (Eingang-Durchsatz-Ausgang)
IVS	Infrastruktur-/Versorgungssysteme
LCA	Life Cycle Analysis (Ökobilanz)
LCI	Life Cycle Inventory (Lebenszyklusinventar)
MADM	Multi-attribute decision-making (Multi-Attribut-Entscheidungen)
MKS	Mehrkörpersimulation
MODM	Multi-objective decision-making (Multi-Objektiv-Entscheidungen)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PS	Produktionssystem
SCM	Supply Chain Management

SPL	Simulation in Produktion und Logistik
SysPla	Produktionssystemplanung
TCO	Total Costs of Ownership (Lebenszykluskosten)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
n	-	Anzahl der verglichenen Elemente
n_K	-	Anzahl der Kriterien einer Hierarchie
r_i	-	Gewichtung des Kriteriums i gegenüber höherer Ebene
v	-	Eigenvektor einer Matrix zum paarweisen Vergleich
v_i	-	Verglichenes Element i in Eigenvektor v
v_{norm}	-	Prioritäten verglichener Elemente als normierter Eigenvektor (abgeleitet aus v mit Einsnorm)
CI	-	Konsistenzindex (engl.: consistency index)
CI_i	-	Konsistenzindex der Vergleichsmatrix für Kriteriums i
CR	-	Konsistenzverhältnis (engl.: consistency ratio)
CRH	-	Konsistenzverhältnis der Hierarchie (engl.: concistency ratio of hierarchy)
M	-	Summe der Produkte aus Konsistenzindex und Priorität aller Kriterien einer Hierarchie
$\overline{M}$	-	Summe der Produkte aus Zufallsindex und Priorität aller Kriterien einer Hierarchie
RI	-	Zufallsindex (engl.: random index) gemäß Tabelle 3.5
RI_i	-	Zufallsindex der Vergleichsmatrix für Kriterium i
$\eta_{Parallelisierung}$	-	Wirkungsgrad der Parallelisierung
λ_{max}	-	Größter Eigenwert einer Matrix

1 Einleitung

Infolge der von Menschen verursachten Schadstoffemissionen sieht sich die Staatengemeinschaft großen Herausforderungen zur Erhaltung des Weltklimas gegenüber. Die resultierende Notwendigkeit, konkrete Klimaschutzmaßnahmen abzuleiten, wurde bereits 1992 in der „Rahmenkonvention der Vereinten Nationen über Klimaänderung“ dokumentiert [1]. Auf diese folgten 1998 das „Protokoll von Kyoto“ [2] und 2015 das „Übereinkommen von Paris“ [3]. Gerade der lange Zeitraum zwischen der Aushandlung dieser Verträge belegt die Brisanz, die solche internationale Abkommen für Einzelnationen und ihre, oft auch wirtschaftlichen, Interessen sowie in der Folge für die Staatengemeinschaft haben.

Die Europäische Union (EU), einer der größten Wirtschaftsräume weltweit, vertritt dabei eine Vielzahl hochindustrialisierter Staaten. 2007 beschloss diese den „Klima- und Energiepakt 2020“, um den Beitrag der Mitgliedsnationen zur Erfüllung der genannten Abkommen zu lenken [4]. Dieser Pakt sieht die *„Senkung der Treibhausgasemissionen um 20 % (gegenüber dem Stand von 1990)* [, die Erzeugung von] *20 % der Energie in der EU aus erneuerbaren Quellen* [und die] *Verbesserung der Energieeffizienz um 20 %“* vor [4]. In einer weiteren Festlegung aus dem Jahr 2014, dem „Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030“, wurde diese Zielstellung auf mindestens 40 %, 27 % bzw. 27 % bis 2030 erweitert [5]. Die nationalen Parlamente innerhalb der EU sind angehalten, geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um diesen ambitionierten Forderungen nachzukommen.

Es ist festzustellen, dass 42 % des weltweiten Energieverbrauchs[1] auf den industriellen Sektor zurückzuführen ist [6]. In Deutschland entfallen 29 % auf den Bergbau und das verarbeitende Gewerbe [7]. Deshalb zielt eine Vielzahl legislativer Maßnahmen auf eine Effizienzsteigerung im Energieeinsatz dieser Bereiche ab (z. B. [8]–[11]). Dabei reagieren Unternehmen nicht ausschließlich auf politischen Druck, sondern oftmals sind auch wirtschaftliche Überlegungen Ausgangspunkt für die Umsetzung von betrieblichen Energieeffizienzmaßnahmen. So wurden 2013 in der Metallindustrie 52,6 Mio. € und im Maschinenbau 37,9 Mio. € in die Realisierung derartiger Maßnahmen investiert [12].

Für Wirtschaftsunternehmen stellt dabei die Wahrung kurzer Amortisationszeiten und hoher Investitionssicherheit eine zentrale Herausforderung dar, um den angeführten Änderungstreibern zu folgen und gleichzeitig den Stakehol-

1 In der vorliegenden Arbeit wird vereinfachend mit dem allgemein gebräuchlichen Begriff des Energieverbrauchs gearbeitet, auch wenn dies im thermodynamischen Sinne nicht exakt ist.

derwünschen nachzukommen. Ansätze zur energieeffizienten Fabrikplanung bieten hierzu methodische Unterstützung für die grundlegenden Planungsprozesse (z. B. [13]–[15]). Ergänzend können Methoden der Digitalen Fabrik, insbesondere die Simulation, zur Verbesserung des Planungsergebnisses (u. a. durch alternative und prospektive Bewertungsmöglichkeiten oder durchgängige Datenverfügbarkeit) beitragen [16, S. 60 ff.]. Konkret erlaubt es der Einsatz von Simulation, planerische Lösungen zur Effizienzsteigerung frühzeitig auf ihre Effektivität hin zu untersuchen. Mit dieser Untersuchungsmethode lassen sich Wechselwirkungen innerhalb von Materialflüssen, aber auch zwischen Energie- und Materialflüssen in realistischen Modellen von Fabriken und Fertigungsbereichen analysieren [17].

1.1 Problemstellung

Die zentrale Herausforderung beim Einsatz von Simulation ist neben der Datenbeschaffung vor allem die *richtige* Gestaltung der Simulationsstudie[2], die sich durch Effizienz und Validität in der Durchführung auszeichnet. Vorgehensmodelle und andere Hilfestellungen (z. B. Entscheidungsverfahren) können hierzu beitragen, soweit sie die Konkretisierung einzelner Aspekte der Simulationsstudie unmittelbar unterstützen.

Zur Festschreibung allgemeingültiger Grundlagen für die „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen“ wurde die Richtlinienreihe 3633 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) geschaffen. Die zugehörigen Richtlinien erläutern unterschiedliche Aspekte von Simulationsprojekten, wobei u. a. explizit auf Begriffe [18], Grundlagen zur Durchführung [19], Experimentplanung und -auswertung [20] sowie Optimierung [21] eingegangen wird. Dabei ist festzustellen, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Herangehensweisen an die einzelnen (Teil-)Aspekte vorgestellt und ergebnisoffen diskutiert wird. Dies ist nicht zuletzt der Vielseitigkeit von Simulationswerkzeugen und -problemen geschuldet. Wann letztlich welcher Aspekt wie zu gestalten ist, bleibt hingegen weitgehend offen. Zugleich erscheint es schlüssig, dass in einem enger abgegrenzten Problemrahmen und bei geeigneter Abstraktion des Betrachtungsgegenstands die Ableitung genauerer Hilfestellungen für die Gestaltung von Simulationsstudien möglich wird.

2 Nach VDI-Richtlinie 3633 wird „Simulationsstudie“ in der vorliegenden Arbeit als „Projekt zur simulationsgestützten Untersuchung eines Systems“ inklusive aller unmittelbar dazu notwendigen Arbeitsschritte verstanden [18, S. 18]. Sie ist typischerweise Teil eines Planungsprojekts.

Mit Blick auf die eingangs dargestellten klimapolitischen und unternehmerischen Ziele wird eine große Relevanz für Planungsprojekte zur Energieeffizienzsteigerung in Industriebetrieben ersichtlich. Eine weiterführende Konkretisierung von Projekten mit diesem inhaltlichen Fokus kann dabei den Problemrahmen soweit eingrenzen, dass die Ableitung spezifischer Handlungs- und Entscheidungshilfen für die Gestaltung von Simulationsstudien mit gleichzeitiger Betrachtung von Material- und Energieflüssen möglich wird. In dieser Arbeit geschieht dies dahingehend, dass lediglich Umplanungsprojekte einbezogen werden. Dies wird mit der größeren Bedeutung ebendieser begründet, welche wiederum aus der Häufigkeit ihres Vorkommens über den Fabriklebenszyklus (vgl. [22, S. 147 ff.]) hinweg folgt. So wird eine Neuplanung weitaus seltener durchgeführt und dann auch unter anderen Bedingungen als eine Umplanung (vgl. [22, S. 151 bzw. 286]). Letztere ist an strengere Restriktionen hinsichtlich der realisierbaren Veränderungen und ökonomischen Kennzahlen geknüpft ist, wodurch sie den Lösungsraum enger eingrenzt. Zugleich ist ihr Ergebnis oftmals mit kleineren Investitionen (typisch für fortlaufende Anpassungen, vgl. [22, S. 286]) verknüpft, sodass sie für Unternehmen meist vorteilhafter als eine Neuplanung ist, um die eigene Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern.

Für die um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation sind vor allem Effizienzmaßnahmen relevant, die eine Implikation für den Gesamtablauf haben. Wie sich dies genau darstellt, ist wiederum vom in der Modellierung gewählten Abstraktionsgrad abhängig. Da in der Modellbildung eine Verallgemeinerung der realen Prozesse erfolgt [19], wird eine größere Vergleichbarkeit auch sehr unterschiedlicher Fertigungsabläufe oder -systeme erzeugt. Die Modellierung und Untersuchung der Material- und Energieflüsse ebendieser Systeme können daher in der Simulation auf ähnliche Weise geschehen, auch wenn Ähnlichkeit in den realen Systemen auf den ersten Blick nicht ersichtlich ist (vgl. z. B. [23, S. 145 ff.]).

Bezugnehmend auf den definierten Betrachtungsrahmen, so die Hypothese, können geeignete Hilfestellungen für die Gestaltung von Simulationsstudien entwickelt werden. Dem zugrunde liegt ein grundsätzliches entscheidungstheoretisches Problem: Wie genau ist eine Simulationsstudie effizient zu gestalten? Dies impliziert einerseits einen kreativen Prozess und andererseits eine Effizienzbewertung, welche sich aber nicht auf das eigentliche planerische Problem, sondern vielmehr auf die planerische Handlung selbst bezieht.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit hat die Konzeptionierung und die Systematisierung einer Methodik zur Ausgestaltung von Simulationsstudien in Umplanungsprojekten zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken zum Ziel. Diese soll dem Anwender eine entscheidungstheoretisch fundierte Grundlage für den Einsatz von Simulation in einem eng gefassten Problemrahmen bieten. Sie ist geleitet von einem Effizienzgedanken, der eine Aufwandsverringerung dahingehend priorisiert, dass nicht die größtmögliche, sondern die mindestens notwendige Genauigkeit angestrebt wird.

Im Sinne der Problemstellung umfassen Simulationsstudien eine endliche Zahl von **Gestaltungsaspekten**. Diese können sich beispielsweise auf die Modellbildung für Energieflüsse oder auf die eingesetzte Methode zur Energiedatenakquise beziehen. Im Verlauf eines Simulationsprojektes werden Ausprägungen für die Gestaltungsaspekte sukzessiv durch Auswahl einer **Lösungsvariante** (Alternative) aus einer Menge selbiger bestimmt. Die Gesamtheit aller festgelegten Ausprägungen spiegelt somit die anwendungsspezifische Ausprägung der Simulationsstudie wider. Die Gestaltungsmethodik zielt auf die Effizienzsteigerung und die Strukturierung dieses Prozesses ab.

Für die systematische Ableitung geeigneter Handlungshilfen zur Festlegung von Gestaltungsaspekten einer Simulationsstudie ist zunächst das Planungsproblem zu analysieren. Letzteres entstammt wiederum dem Strategieprozess eines Unternehmens und beeinflusst Entscheidungen zu dessen Weiterentwicklung. Dieser verallgemeinerte Zusammenhang ist in Abbildung 1.1 gezeigt: Ein Unternehmen ist gefordert, auf (z. B. marktseitige oder ökonomische) Änderungstreiber unter Beachtung von Stakeholderwünschen (z. B. Rentabilitätsforderungen) und gesellschaftlichen Randbedingungen (z. B. klimapolitische Ziele) zu reagieren. Dazu initiiert es ein Umplanungsprojekt, das sich insbesondere auf das Fabriksystem bezieht. Dieses hat die Vorbereitung einer Entscheidung zur Unternehmensentwicklung (bezüglich des realen Systems) zum Ziel und erfordert zugleich planungsbezogene Entscheidungen, die den Betrachtungsraum oder die eingesetzten Methoden im Planungsprozess eingrenzen. Simulationsstudien stellen wiederum ein mögliches Mittel zur Planungsunterstützung dar, in deren Rahmen simulationsbezogene Entscheidungen zum praktischen Vorgehen in der Simulationsanwendung zu fällen sind. Die vorliegende Arbeit fokussiert vorrangig auf ebendiese, bezieht aber zudem auch planungsbezogene Entscheidungen ein, die eine Simulationsstudie unmittelbar beeinflussen.

Somit ergeben sich im Weiteren nachstehende Forschungsfragen:

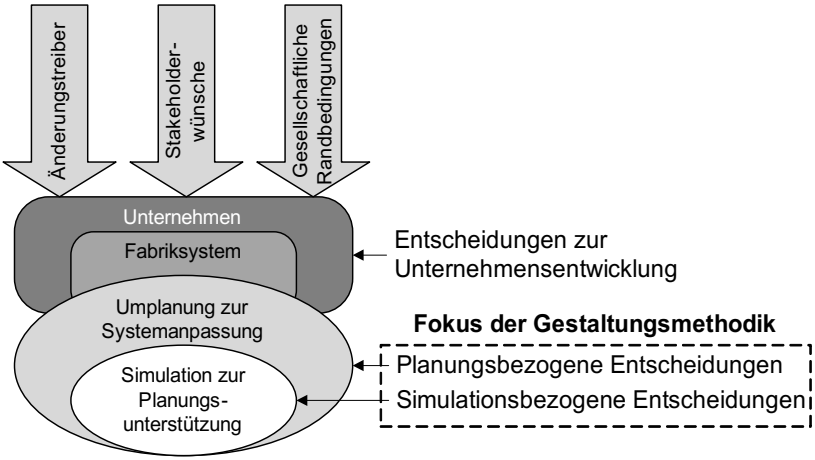


Abbildung 1.1: Einordnung von relevanten Entscheidungen bezüglich Unternehmen, Planungsprozess und Simulation

- Welches **Zielsystem** eignet sich grundsätzlich für einen Entscheidungsprozess zur Bestimmung der anwendungsspezifischen Ausprägung in einer Simulationsstudie?
- Welche **Planungsfälle**[3] sind in der Umplanung von Fabriken (bzw. Fabriksystemen) mit dem Ziel der Energieeffizienzsteigerung relevant?
- Welche abstrakten **Handlungsansätze** zur Effizienzsteigerung bestehen in den relevanten Planungsfällen?
- Wie kann die **Simulationswürdigkeit** für die kombinierte Betrachtung von Material- und Energieflüssen aus den Handlungsansätzen und spezifischen Informationen zum Planungsproblem abgeleitet werden?
- Welche **Gestaltungsaspekte** von Simulationsstudien mit gleichzeitiger Betrachtung von Material- und Energieflüssen sind in der Methodik zu beachten?
- Welche **Lösungsvarianten** bestehen für die einzelnen Gestaltungsaspekte?
- Wie lassen sich **Entscheidungen zur Auswahl** einzelner Lösungsvarianten unter Beachtung des spezifischen Planungsproblems und bestehender Abhängigkeiten mit anderen Gestaltungsaspekten unterstützen?

3 Es sei darauf hingewiesen, dass die in der VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1 [24] benannten Planungsfälle nicht notwendigerweise der Problemlösung dienlich sind und sich der Begriff daher an dieser Stelle nicht an diese Definitionen bindet. Eine Klärung erfolgt in Abschnitt 3.2.3.

Die Beantwortung dieser Fragen erfordert den Einbezug von drei grundlegenden Forschungsrichtungen: Betriebswissenschaft und Fabrikplanung unter besonderer Beachtung von Energieeffizienz, Entscheidungstheorie sowie Digitale Fabrik und Simulationstechnik. Im Ergebnis der vorliegenden Arbeit wird somit ein interdisziplinärer Beitrag zur weiter gefassten Produktionsforschung angestrebt.

Ausgehend von den formulierten Forschungsfragen, aber auch vom Umfang der Richtlinienreihe 3633 des VDI ist anzunehmen, dass die entwickelte Gestaltungsmethodik eine hohe Komplexität aufweist. Die vorliegende Arbeit hat vorrangig die Konzeptionierung und die Systematisierung der grundlegenden Bestandteile zum Ziel. Sie soll als Grundlage für die zukünftige Realisierung eines **Expertensystems** dienen. Bei dieser Klasse von Software handelt es sich um Softwaresysteme, die „Spezialistenwissen menschlicher Fachleute in der Wissensbasis eines Computers [abspeichern] und für eine Vielzahl von Problemlösungen […] nutzen“ [25, S. 61]. Sie lassen sich einsetzen, um praktische Entscheidungsprozesse durch Strukturierung der Aufgabe entsprechend einer konkreten Gestaltungsstrategie zu unterstützen. Im Hinblick darauf sei zugleich angemerkt, dass der Aufwand zur Erlernung und händischen Anwendung der Methodik zunächst keine gesonderte Beachtung findet. Insofern bezieht sich Effizienz im Weiteren, soweit nicht anders angeführt, stets auf die Abwägung von Aufwand und Nutzen innerhalb der Simulationsstudie.

Ein zentraler Anspruch an das Ergebnis der vorliegenden Arbeit, der sich u. a. aus der Analyse früherer Arbeiten in diesem Forschungsgebiet (vgl. Abschnitt 2.4) ergibt, ist, dass die Anwendung der Gestaltungsmethodik unabhängig vom eingesetzten Simulationssystem bzw. von der eingesetzten Simulationslösung alle relevanten Gestaltungsaspekte beachtet und zur Bestimmung problemspezifischer Ausprägungen führt. Im Rahmen der Erprobung ist daher zu zeigen, dass unter Einsatz einer generischen Simulationslösung Simulationsstudien mit unterschiedlichen Ausprägungen hinsichtlich einzelner Gestaltungsaspekte im Ergebnis stehen können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit lehnt sich an das Vorgehen zur Konzeptionierung der Gestaltungsmethodik an (vgl. Abbildung 1.2). Als Ausgangspunkt dient dabei eine kritische und ausführliche Auseinandersetzung mit dem Stand von Wissenschaft und Technik. Dazu wird in **Kapitel 2** zunächst auf die grundlegenden Forschungsrichtungen (siehe oben) eingegangen. Aus planerischer Sicht erfolgt unter Bezug auf Betriebswissenschaft und Fabrikplanung eine

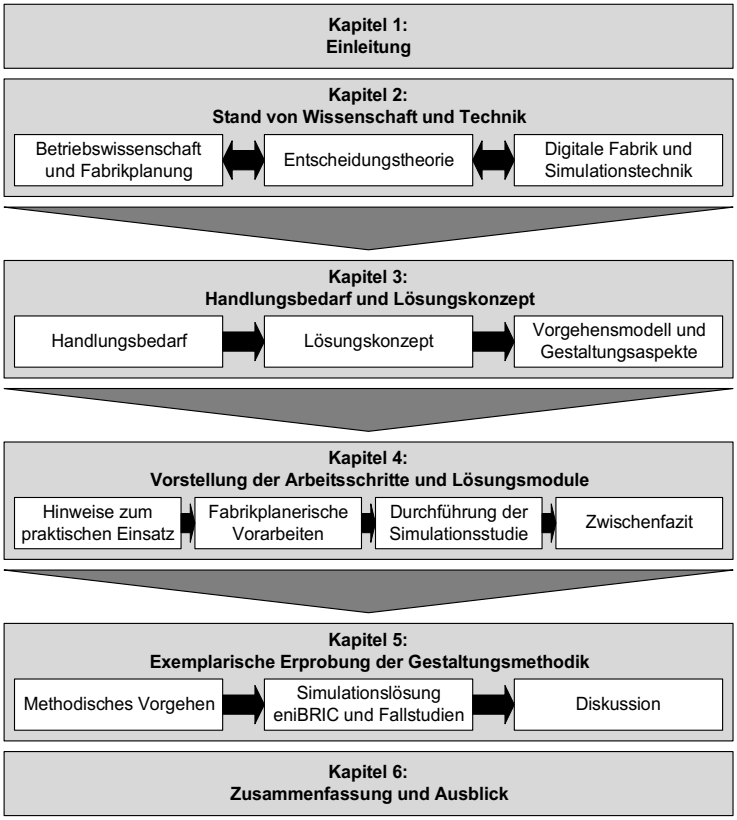


Abbildung 1.2: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Eingrenzung des Betrachtungsraums. Die Entscheidungstheorie liefert Modelle und Methoden zur Verknüpfung von Gestaltungsaspekten und planungs- bzw. simulationsbezogenen Entscheidungen. Mit Bezug zur Digitalen Fabrik und Simulationstechnik werden vor allem die Grundlage zur Identifikation von Gestaltungsaspekten und Lösungsvarianten vorgestellt, aber auch vergleichbare Vorgehensmodelle bzw. Arbeiten untersucht.

In **Kapitel 3** werden eingangs die im Stand von Wissenschaft und Technik identifizierten Defizite zusammengefasst. Davon ausgehend wird der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit weiter konkretisiert und in Anforderungen an die Konzeptionierung und die Systematisierung überführt. Im weiteren Verlauf werden ein Lösungskonzept vorgestellt und ausgewählte methodische Ansätze, die im weiteren Verlauf der Arbeit Anwendung finden,

erläutert. Das der Gestaltungsmethodik zugrundeliegende Vorgehensmodell wird am Ende des Kapitels präsentiert. Zudem werden die identifizierten und in der Arbeit hauptsächlich betrachteten Gestaltungsaspekte, für die Hilfsmittel zur Entscheidungsunterstützung entwickelt wurden, dargestellt.

Als einleitende Vorüberlegungen werden in **Kapitel 4** zunächst einige Hinweise zum praktischen Einsatz der Gestaltungsmethodik zusammengefasst. Daran anschließend werden die einzelnen Arbeitsschritte sowie die sogenannten Lösungsmodule detailliert. Eine Differenzierung der Schritte erfolgt dabei, in Anlehnung an Abbildung 1.1, nach fabrikplanerischen Vorarbeiten (planungsbezogene Entscheidungen) und Durchführung der Simulationsstudie (simulationsbezogene Entscheidungen). Die bis zu diesem Punkt in der Arbeit erzielten Ergebnisse werden in einem Zwischenfazit zusammengefasst.

Die exemplarische Erprobung der Gestaltungsmethodik in **Kapitel 5** dient der Prüfung hinsichtlich der formulierten Anforderungen und zeigt zudem, wie sich unter Verwendung einer generischen Simulationslösung (hier: „eniBRIC“) durchaus unterschiedliche Ausprägungen für die Simulationsstudien realisieren lassen. Dazu wird zunächst auf das methodische Vorgehen eingegangen, bevor die Simulationslösung und die Fallstudien vorgestellt werden. Eine abschließende Diskussion gibt Aufschluss über gewonnene Erkenntnisse.

Im abschließenden **Kapitel 6** werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und reflektiert. Überdies werden Ansätze für weitere Forschung aufgezeigt.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Die Bearbeitung der eingangs aufgeworfenen Problemstellung erfordert zunächst einen Überblick zu angrenzenden Themengebieten. Dieser wird in diesem Kapitel präsentiert, wobei die einzelnen Abschnitte sich an den Forschungsrichtungen orientieren, welche im unmittelbaren Zusammenhang mit der Zielstellung der Arbeit stehen. In Abschnitt 2.1 wird daher zunächst in den Stand der Betriebswissenschaft mit besonderem Fokus auf Fragestellungen der energieeffizienzorientierten Fabrikplanung eingeführt. Als weitere zentrale Grundlage der zu entwickelnden Gestaltungsmethodik fasst Abschnitt 2.2 für die Arbeit relevante Aspekte der Entscheidungstheorie zusammen. Im Anschluss (Abschnitt 2.3) werden Grundlagen zur Digitalen Fabrik sowie der Stand der Forschung zur um energetische Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation zusammengefasst. Abschnitt 2.4 zeigt ergänzend dazu bekannte Vorgehensmodelle zur Anwendung dieser speziellen Art von Simulation.

2.1 Energieeffizienz in Fabriken

Das Streben nach Effizienz in der industriellen Fertigung folgt den ökonomischen Bedingungen, denen ein jedes marktwirtschaftlich operierendes Unternehmen unterliegt. Im Grunde betrifft dies alle Unternehmensbereiche, in denen Kosten anfallen oder Werte geschaffen werden. Um den Betrachtungsrahmen für die vorliegende Arbeit mit besonderem Fokus auf die Umplanung von Fabriken zur Energieeffizienzsteigerung genauer abzugrenzen, erfolgen zunächst allgemeine Begriffsklärungen. Abschnitt 2.1.1 geht dabei auf den Fokus der Fabrikplanung in Industriebetrieben ein, während Abschnitt 2.1.2 den Aspekt der Effizienz als Entwicklungstreiber behandelt. Aufbauend darauf wird in Abschnitt 2.1.3 gezeigt, welche Planungsansätze für die Gestaltung energieeffizienter Fabriken bereits existieren. Abschließend wird in Abschnitt 2.1.4 nochmals abgegrenzt, welche Betrachtungsebenen der Fabrik im Fokus der vorliegenden Arbeit liegen und welche Handlungsansätze zur Energieeffizienzsteigerung existieren.

2.1.1 Betrachtungsraum der Fabrikplanung

Aus der Einleitung sowie den einführenden Bemerkungen dieses Kapitels wird deutlich, dass der in dieser Arbeit betrachtete Handlungsrahmen in Industriebetrieben liegt. Um ein genaueres Verständnis dieser zu entwickeln, wird zunächst eine allgemeine Definition des Begriffs Unternehmen eingeführt:

> *„Ein Unternehmen ist eine von Menschen geschaffene Einrichtung, innerhalb derer betriebliche Produktionsfaktoren – objektbezogene und dispositive Arbeit, Betriebsmittel, Werkstoffe und immaterielle Güter – derart miteinander kombiniert werden, dass dadurch Sachgüter (Produkte) und/oder Dienstleistungen entstehen, die für den fremden Bedarf produziert und auf dem Absatzmarkt abgesetzt werden* […]*." [26, S. 1]*

Aus dieser Definition wird ersichtlich, dass im Ergebnis des Wirkens eines Unternehmens nicht notwendigerweise die Erbringung von materiellen Produkten steht. Der Begriff Industriebetrieb hingegen konkretisiert dies stärker:

> *„Ein Industriebetrieb ist ein Unternehmen, das überwiegend – wenn auch nicht ausschließlich – Sachgüter produziert und vertreibt* […]*, und zwar unter vorherrschendem Einsatz maschineller Anlagen, bei weitgehender Arbeitsteilung und Spezialisierung der Beschäftigten* […]*." [26, S. 3]*

Zur Bewältigung der angeführten Aufgaben müssen Industriebetriebe eine Reihe unterschiedlicher Funktionen erfüllen. Nach Westkämper gehören dazu:

- „Produktplanung, -entwicklung und Konstruktion, Arbeitsplanung" [27, S. 40],
- „Angebotswesen, Auftragsplanung und Auftragssteuerung (Marketing, Vertrieb und Auftragsmanagement)" [27, S. 40],
- „Unternehmensstrategie, Investitionsplanung und Kostenrechnung" [27, S. 40] sowie
- „Physische Produktion mit den technischen Prozessbereichen vom Grundstoff bis zum Recycling" [27, S. 40].

Aus den Bezeichnungen wird ersichtlich, dass es sich primär um Funktionen handelt, welche im direkten Zusammenhang mit der Produktentstehung (d. h. der Wertschöpfung) oder aber mit den Produktionsressourcen stehen. Unterstützend hierzu werden zudem unterschiedliche administrative Funktionen für die Aufrechterhaltung des Betriebs benötigt, beispielsweise Personalwesen oder Umweltschutz [27, S. 40 f.].

Den Zusammenhang zwischen Marktinteraktion und Produktentstehung stellen Schenk et al., wie in Abbildung 2.1 gezeigt und im Folgenden erläutert, dar [22, S. 47 ff.]. Am Anfang (0) steht dabei zunächst ein Prozess, der auf die Produktbestimmung zur Erschließung von Absatzmärkten ausgelegt ist. Im Markt selbst ist dann der Kundenwunsch (a), d. h. dessen Anforderungen an Produkte zu beachten, wobei der Kundennutzen im Fokus steht. Aus diesem folgt idealerweise ein Kundenauftrag (a), also die konkrete Nachfrage nach materiellen oder immateriellen Gütern. Alle zu deren Befriedigung notwendigen Aktivitäten bilden den Wertschöpfungsprozess (b). Ein wichtiger

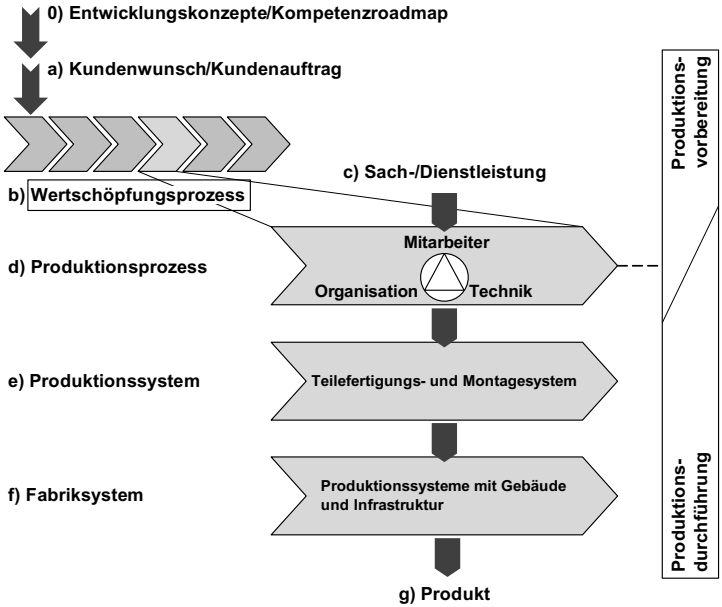


Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen Kundenwunsch, Wertschöpfungs-, Produktionsprozess sowie Produktions- und Fabriksystem [22, S. 48]

Bestandteil der Wertschöpfung sind Sach- und Dienstleistungen (c), die der Herstellung von Produkten (g) gemäß dem Kundenauftrag dienen. Der Produktionsprozess (d) umfasst alle Vorgänge, in denen betriebliche Ressourcen – Personal, Technik und Organisation – für die Leistungserbringung kombiniert werden, wobei die o. g. Funktionen des Industriebetriebs genutzt werden. Seine systemtechnische Umsetzung ist im Produktionssystem (e) realisiert. Das **Fabriksystem** (f) erweitert den Betrachtungsrahmen des Produktionssystems um das Gebäude und bautechnische Anlagen (Infrastruktur).

Ausgehend von dem dargelegten Zusammenhang ist es möglich, den Fokus der Fabrikplanung genauer von der allgemeinen Unternehmensentwicklung abzugrenzen. Die VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1 definiert **Fabrikplanung** als *„[s]ystematische[n], zielorientierte[n], in aufeinander aufbauende Phasen strukturierte[n] und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführte[n] Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“* [24, S. 3]. Fabrik wird dabei als *„Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet“* verstanden [24, S.

3]. Aus diesen Definitionen wird deutlich, dass der Handlungsschwerpunkt fabrikplanerischer Projekte auf dem Produktionsprozess, dem Produktions- und dem Fabriksystem liegt.

Zugleich kann unterschieden werden, welcher grundsätzliche Fall für ein Planungsprojekt vorliegt: Neuplanung, Umplanung, Rückbau oder Revitalisierung [24, S. 4]. Die vorliegende Arbeit fokussiert auf den Fall der Umplanung, bei dem Änderungen in einer bestehenden Fabrik unter Beachtung bestehender Produktionsfaktoren und aus dem laufenden Fabrikbetrieb resultierenden Restriktionen ausgestaltet werden (vgl. [24, S. 4]).

Allen Fabrikplanungsprojekten sind **Investitionsentscheidungen** gemein. Diese These beruht auf dem vermögensorientierten Investitionsbegriff, der eine längerfristige Bindung von Kapital für materielle oder immaterielle Objekte zum Zwecke der Zielverfolgung beschreibt (folgt Götze [28, S. 6 f.]). Dabei stellt das Ergebnis der Fabrikplanung die Frage, ob eine mit Kapitaleinsatz verbundene Maßnahme am physischen Fabriksystem oder am Produktionsprozess (ohne Veränderung der physischen Systemstruktur) durchgeführt werden soll, die langfristig und nicht nur zeitweilig wirkt. Das Ergebnis ist ferner Ausgangspunkt für die Finanzplanung [24, S. 8] und den Entscheidungsprozess, der der eigentlichen Realinvestition (vgl. [28, S. 8 f.]) zugrunde liegt. Entsprechend werden hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Planung erhoben [28, S. 17 f.], denen durch Einsatz geeigneter Methoden (z. B. Simulation) Rechnung zu tragen ist [22, S. 227 ff.].

2.1.2 Effizienz als Entwicklungstreiber von Industriebetrieben

Bereits in der Einleitung wurde auf den großen industriellen Anteil am Energiebedarf eingegangen. Den gesellschaftlichen, ökonomischen, ökologischen und nicht zuletzt auch legislativen Anforderungen folgend, stellt die Analyse der Umweltwirkungen von Produktionsprozessen eine zentrale Herausforderung für diese Industriebetriebe dar. Die damit einhergehenden Erkenntnisse sind letztlich Ausgangspunkt für die im Weiteren betrachteten Fabrikplanungsprojekte. Im Kontext derartiger Analysen findet eine Vielzahl von Begrifflichkeiten und Konzepten Anwendung, welche im Folgenden eingeführt werden.

Zunächst wird das Konzept der „**nachhaltigen Entwicklung**“ zur besseren Einordnung der weiteren Ausführungen vorgestellt. Dieses besteht aus den drei interdependenten und einander verstärkenden Komponenten (Dimensionen) wirtschaftliche Entwicklung, soziale Entwicklung und Umweltschutz [29, S. 9 f.]. Bezogen auf Unternehmen lässt sich feststellen, dass diese die „Gestal-

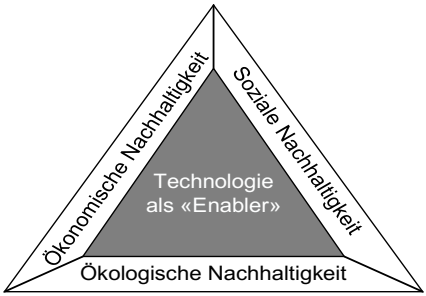


Abbildung 2.2: Technologie als „Enabler" der Nachhaltigkeit [30]

tung ihrer Produktionssysteme [, d. h. Fabriken,] zunehmend am Leitbild der Nachhaltigkeit […] orientieren müssen" [30]. Technologischen Entwicklungen kommt dabei eine elementare Rolle zu; sie dienen als Befähiger („Enabler") für die Realisierung **nachhaltiger Produktion** (siehe Abbildung 2.2) [30].

Dem wissenschaftlichen, aber auch dem gesellschaftlichen Diskurs ist zu entnehmen, dass die Kommunikation über Nachhaltigkeitsmaßnahmen in Industriebetrieben zumeist einen Fokus auf die ökologische Komponente legt. Aus unternehmerischer Sicht stehen bei diesen dennoch zumeist ökonomische Ziele (z. B. in Form von Kostenersparnissen) im Vordergrund (vgl. [31]). Aspekten der Energie- und Ressourceneffizienz bzw. Umweltverträglichkeit wird aus verschiedenen Gründen dennoch in der Unternehmensdarstellung eine größere Bedeutung beigemessen. Soziale Zielstellung oder Bewertungskriterien finden bei Berichten zu derartigen Maßnahmen hingegen zumeist kaum Beachtung. Dem folgend wird „nachhaltige Entwicklung" im industriellen Umfeld häufig auf Aktivitäten zum effizienteren Einsatz von Energie und Ressourcen reduziert.

Aus politischer Sicht bestehen bereits seit den 1970er Jahren Bestrebungen zur Erhöhung der Energieeffizienz, wobei der Fokus zunächst auf dem Bausektor lag [32, S. 19 f.]. Ein Überblick zu geltenden Richtlinien, Gesetzen, Verordnungen etc., welche der Steigerung der Energieeffizienz innerhalb der Europäischen Union und innerhalb Deutschlands zum Ziel haben, findet sich z. B. in Bauernhansl et al. [32, S. 20 ff.]. Festzustellen ist, dass die meisten aufgeführten Instrumente auf Gebäude, Wärmeenergiebedarf oder Konsumentenprodukte (z. B. Kühlschränke oder Waschmaschinen) wirken. Für Industriebetriebe wurden bislang zumeist nur Anreize – wie etwa im Rahmen der Energiemarktliberalisierung – und Emissionsrestriktionen geschaffen. Zu einer ähnlichen Einschätzung kommen auch Müller et al. [13, S. 20].

Auf Grund der Vielseitigkeit der eingesetzten Technologien in Produktionsbetrieben erscheint dies nachvollziehbar, denn legislative Regelungen, analog zu der bei Kühlschränken und ähnlichen Geräten, wären nur mit großem Aufwand zu realisieren. Gleichwohl unterstreicht dieser Umstand die große Bedeutung der **Wirtschaftlichkeit** für industrielle Energieeffizienzmaßnahmen. Folglich stellen Preissteigerungen in den Energiemärkten und (zukünftige) Versorgungssicherheit (vgl. [13, S. 6 ff.]) die bedeutendsten unternehmensexternen Effizienz-, d. h. Entwicklungstreiber, von Industriebetrieben dar, solange keine emmissionsschutzrechtlichen oder baurechtlichen Auflagen von Bedeutung sind.

Eine zentrale Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Planung geeigneter Maßnahmen ist die Einführung eines Maßes für **Energieeffizienz**. Erst mit diesem werden Unternehmen in die Lage versetzt, ihre eigene Leistung zu bewerten und einen möglichen ökonomischen Vorteil abzuschätzen. Müller et al. schreiben dazu:

> *„Energieeffizienz heißt, einen gewünschten Nutzen (Produkte oder Dienstleistungen) mit möglichst wenig Energieeinsatz herzustellen oder aus einem bestimmten Energieeinsatz möglichst viel Nutzen zu ziehen." [13, S. 2]*

Als Formel ausgedrückt, zeigt sich dieser Zusammenhang wie folgt [13, S. 2]:

$$Energieeffizienz = \frac{Nutzen}{Energieeinsatz} \tag{2.1}$$

Wie dieser Nutzen letztlich definiert ist, hängt stark vom betrachteten Objekt bzw. Vorgang und der Abstraktionsebene ab. So kann auf Prozessebene der Nutzen beispielsweise als Volumen des abgetragenen Materials oder ein Bohrlochdurchmesser bzw. auf Maschinenebene als tatsächlich im physischen Bearbeitungsprozess eingesetzte Energie (d. h. unter Ausschluss peripherer Verbräuche) verstanden werden [33]. Auf makroökonomischer Betrachtungsebene kann der Nutzen auch als Bruttoinlandsprodukt dargestellt werden [32, S. 27] (die Autoren sprechen auch von Energieproduktivität).

In Analogie zur Energieeffizienz wird die Ressourceneffizienz als Verhältnis von Nutzen und Ressourceneinsatz definiert [15, S. 17]. Abweichend von der wirtschaftswissenschaftlich geprägten Begriffsbedeutung (die hierunter Kapital, Menschen, Material, Energie, Werkzeuge, Maschinen, Informationen und Wissen versteht [27, S. 5]) wird im umweltwissenschaftlichen Sprachgebrauch enger auf natürliche Ressourcen fokussiert [15, S. 17]. Hierunter fallen insbesondere Stoffe, Energien, Fläche/Raum und Emissionen [15, S. 17]. Die

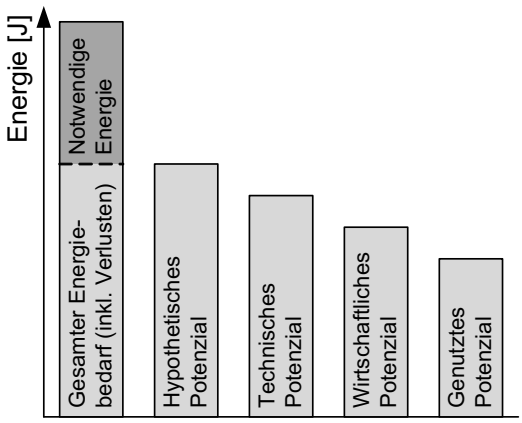


Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen Energiebedarf und Energieeffizienzpotenzialen (nicht maßstäblich)

Bereitstellung von Stoffen und Raum geht auch mit einem Energieeinsatz einher, sodass der effizientere Einsatz ebendieser auch für eine Energieeffizienzsteigerung sorgt. Emissionen sind wiederum eine direkte oder indirekte Konsequenz aus dem Energieeinsatz. Dem folgend findet der Energieeffizienzbegriff in der vorliegenden Arbeit bevorzugt Verwendung, schließt aber auch Ressourceneffizienz ein.

Welches **Potenzial** letztlich in einem Betrachtungsbereich, z. B. in einem Teil der Fabrik, existiert, muss differenziert untersucht werden. Zu unterscheiden sind:

- *genutztes Potenzial:* Gesamteffekt aller bereits realisierten Einsparmaßnahmen;
- *wirtschaftliches Potenzial:* Gesamteffekt aller aus ökonomischer Sicht als sinnvoll zu bewertenden Maßnahmen [32, S. 18];
- *technisches Potenzial:* Gesamteffekt aller Maßnahmen, die sich mit dem heutigen Stand der Technik realisieren lassen [32, S. 18]; sowie
- *hypothetisches Potenzial:* Differenz zwischen perfekten, verlustfreien Prozessen und bisherigen Prozessen [32, S. 18].

Der Zusammenhang zwischen Gesamtenergiebedarf und den o. g. Potenzialen sowie zwischen den unterschiedlichen Potenzialen ist in Abbildung 2.3 nicht maßstäblich gezeigt. Er lässt sich am Beispiel von elektrischen Antrieben verdeutlichen (vgl. [34, S. 38 ff.]). Drehstrom-Asynchronmotoren haben einen typischen Wirkungsgrad zwischen 91 % und 95 % [13, S. 168], d. h. der Gesamtenergiebedarf setzt sich aus 91–95 % notwendiger Energie zuzüglich

Verlusten zusammen. Bei letzteren handelt es sich „insbesondere [um] ohmsche Verluste im Ständer […] und Läufer […], mechanische Reibungsverluste […] sowie Magnetisierungsverluste […]“ [34, S. 39]. Die Summe aller Verluste stellt das hypothetische Potenzial dar. Im technischen Potenzial sind hingegen nur die Teile erfasst, die durch technische Maßnahmen vermeidbar sind. So kann der beste verfügbare Motor beispielsweise immer noch Verluste aufweisen. Weiterhin kann die Auswechslung des aktuellen Motors durch den Bestmöglichen auch unökonomisch sein, wenn die zu realisierende monetär bewertete Energieeinsparung zu niedrig ist – das wirtschaftliche Effizienzpotenzial ist wiederum geringer. Ob das letztlich genutzte Potenzial in der Maßnahmenverwirklichung auch das wirtschaftliche Potenzial erreicht, ist wiederum von weiteren Bedingungen im Entscheidungs- bzw. Realisierungsprozess abhängig (z. B. Liquidität zur Beschaffung des wirtschaftlichsten Motors, Grad des Umsetzungserfolgs o. ä.).

Die **Bilanzierung und Bewertung** unter energetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten stellt in diesem Kontext eine besonders wichtige Aufgabe dar. Neugebauer und Götze führen hierzu die nachstehenden Teilaufgaben an [30]:

- Messen, Analysieren und Prognostizieren von Energieverbräuchen sowie Energieeffizienz von Produkten, Betriebsmitteln, Werkstoffen, Fabrik- und Logistiksystemen;
- Wirtschaftliche Bewertung unter Beachtung aller verbrauchten Produktionsfaktoren inklusive Energie;
- Ableitung von Aussagen zur ökologisch-ökonomischen Vorteilhaftigkeit;
- Ableitung von energieeffizienz- und kostenbezogenen Gestaltungshinweisen sowie Visualisierung und Information zu Energieverbräuchen und Kosten.

Insbesondere bei der **Quantifizierung von Energieverbräuchen** ist zwischen Primär-/Sekundär- und Endenergie zu unterscheiden [35]. Für Fabrikplanungsprojekte ist zumeist der Endenergieverbrauch von Belang, da sich dieser besser nachvollziehen und wirtschaftlich bewerten lässt [13, S. 74]. Aus ökologischer Sicht ist eine Differenzierung aber sehr wohl bedeutsam, da etwa eine Kilowattstunde Erdgas weniger natürliche Ressourcen verbraucht als eine Kilowattstunde elektrische Energie [13, S. 74 f.].

Zur Bewältigung der angeführten Teilaufgaben zur energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung ist eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze bekannt, u. a.:

- *Energiemanagementsysteme:* Vorgaben für Strukturen und Prozesse zur Verbesserung des unternehmensinternen Umgangs mit Energie [36]

- *Energiewertstromanalyse:* ganzheitliche Methodik zur Erhöhung der Energieeffizienz mittels Prozessanalyse [37]
- *Exergieanalyse:* Methodik zur Analyse der Energie- und Materialflüsse in Produktionsprozessen [38]
- *Exergoökonomische Analyse:* Verknüpfung von Exergiebilanz mit wirtschaftlichem Bewertungsmodell [34, S. 26 ff.]
- *Kombinierte ITO[4]-Modellierung mit Flusskostenrechnung:* technische Analyse von Prozessen mit nachgelagerter ökonomischer Bewertung [30]
- *Messkonzepte für In-situ-Messungen:* kurzzeitige oder dauerhafte Verbrauchsmessung auf unterschiedlichen Strukturebenen der Fabrik [13, S. 255 ff.]
- *Ökobilanz (LCA[5])*: Methodik zur Ermittlung von potenziellen Umweltwirkungen von Produkten über deren Lebenszyklus hinweg [39], [40]
- *Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen:* Methodik zur Umweltleistungs- und Nutzenbewertung von Produktsystemen über deren Lebenszyklus hinweg [41]
- *Pinch-Analyse:* Analyse und Auslegung von Wärmeübertragern [34, S. 18 ff.]

Über diese hinaus gibt es beispielsweise auch Werkzeuge, welche sich zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Fabriksystemen nutzen lassen (vgl. [42]). Diese können Chen et al. zufolge aber zumeist nicht unmittelbar für die Ableitung von Verbesserungen beim Energieverbrauch genutzt werden [42]. Dahingegen stellen Duflou et al. einen systematischen Überblick zu verfügbaren **Methoden und Techniken für die Erhöhung der Energieeffizienz** auf unterschiedlichen Strukturebenen der diskreten Fertigung vor [17]. Speziell auf der Ebene mehrerer Maschinen (Fertigungslinien/-bereiche) sowie auf der Fabrikebene zeigt sich, dass die energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung hier große Bedeutung hat [17]. Weiterhin merken Duflou et al. an, dass der **Einsatz von Simulation in der Planung von Effizienzmaßnahmen** für Fertigungslinien ein vielversprechender und im wissenschaftlichen Diskurs etablierter Ansatz ist [17].

Auf Grundlage der Erkenntnisse dieses Abschnitts wird im Weiteren konkreter auf bekannte Ansätze zur Planung energieeffizienter Fabriken und deren methodische Einbindung der zuvor angeführten, vielfältigen Untersuchungsmethoden eingegangen. Der Einsatz von Simulation in diesem Kontext wird ausführlicher in Abschnitt 2.3 thematisiert. Die Kombination beider Aspekte stellen Vorgehensmodelle zum Einsatz von Simulation zur Planung von Effizienzmaßnahmen dar, welche in Abschnitt 2.4 diskutiert werden.

4 aus dem Englischen: Input-Throughput-Output (Eingang-Durchsatz-Ausgang)

5 aus dem Englischen: Life Cycle Assessment

2.1.3 Planung energieeffizienter Fabriken

Das grundsätzliche Streben von Unternehmen zur Erhöhung ihrer Effizienz beim Energieeinsatz spiegelt sich auch in der Betriebswissenschaft und Fabrikplanung wider. Dies zeigt sich u. a. in den Lehr- und Fachbüchern (vgl. [13], [22, S. 543 ff.], [43, S. 362 ff.], [44, S. 137 ff.], [45, S. 511 ff.], [46, S. 269 ff.]), Dissertationen (vgl. [14], [15], [47]–[51]) und anderen wissenschaftlichen Publikationen (vgl. [31], [52]–[56]) aus den Jahren 2003 bis 2017. Im Folgenden werden einige dieser Arbeiten vorgestellt, um aufzuzeigen, welche Ansätze und insbesondere Vorgehensmodelle bislang existieren.

Löffler [47] beschäftigte sich beispielsweise bereits Anfang der 2000er Jahre mit Aspekten des Umweltschutzes in der Produktionsstättenplanung. Diese Arbeit fokussiert zwar nicht explizit auf Energieeffizienz, jedoch stellt die Betrachtung von Energieverbräuchen einen Bestandteil der entwickelten Methode des planungsintegrierten Umweltschutzes dar. Hierzu wurden „(1) die umweltbezogene Analyse und Bewertung [in den] Problemlösungszyklus sowie (2) das Entwerfen umweltverträglicher Lösungen in [die] Planungsaktivitäten“ eingebettet [47, S. 27]. Somit beschreibt diese Arbeit einen methodischen Rahmen für die zielgerichtete Beachtung von Umweltschutzaspekten in der Fabrikplanung, wobei sich Handlungsempfehlungen auf heuristische Prinzipien beschränken. Dies schafft den Rahmen für einen strukturierten Planungsprozess, jedoch bleiben konkrete methodische (z. B. zur Ermittlung des Energiebedarfs in Prozessen) oder inhaltliche (z. B. zu existierenden Lösungsvarianten) Hilfestellungen auf das Anwendungsbeispiel in der spanenden Fertigung beschränkt.

Engelmann fokussiert in seiner Dissertation [48] stärker auf den Aspekt Energieeffizienz. Die von ihm vorgestellte Methode zur Integration von Energieeffizienzfaktoren in den Planungsprozess konkretisiert, wie Informationen aus der Nutzungsphase für zukünftige Planung genutzt werden können [48, S. 98]. Dazu gibt er dezidierte Hinweise, wie zur Einbindung von Energiedaten in den Phasen Systembestimmung, Konzept/Synthese, Auswahl, Realisierung und Nutzung des (im Automobilbau typischen) Produktentstehungsprozesses vorgegangen werden sollte [48, S. 100 ff.]. Für die eigentliche Entwicklung von Planungsalternativen (Phase Konzept/Synthese, vgl. [48, S. 107 f.]) wird jedoch lediglich auf aus der Literatur abgeleitete Heuristiken für die energieeffiziente Planung verwiesen. Eine darüber hinausgehende Unterstützung zum Einsatz von Planungsmethoden findet sich nicht in der Dissertation.

Beide Arbeiten werden in **Müller et al.** [13] zusammengeführt, erweitert und ergänzt. Dazu werden zum einen allgemeine Handlungsansätze (Heuristiken) für die Planung energieeffizienter Fabriken vorgestellt (vgl. Abbildung

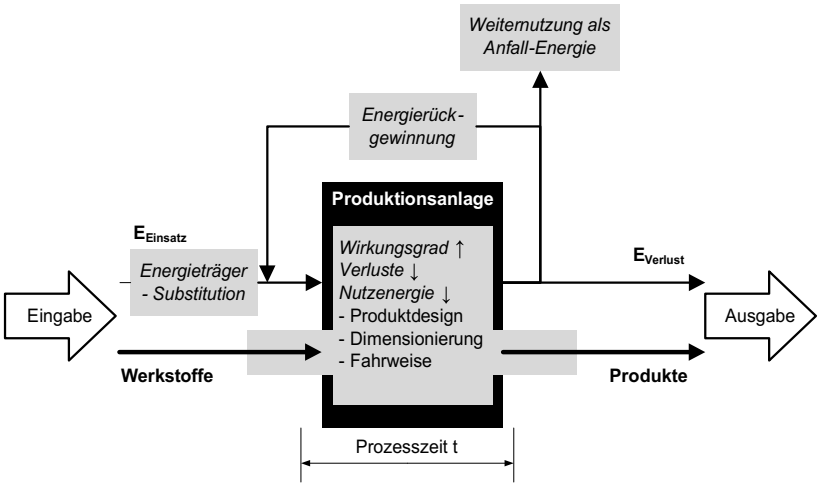


Abbildung 2.4: Handlungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsanlagen [13, S. 123]

2.4), zum anderen konkrete Anweisungen zur Integration von Energieeffizienzaspekten in den Fabrikplanungsphasen gegeben [13, S. 109 ff.]. Darüber hinaus werden Hilfestellungen zur Detailplanung energierelevanter Prozesse und Anlagen (z. B. Prozesswärme/-kälte oder Elektroanlagen) vorgestellt [13, S. 159 ff.]. Somit stellt dieses Werk umfassende methodische Unterstützung für energieeffizienzorientierte Fabrikplanungsprojekte zur Verfügung. Zugleich ist festzustellen, dass Defizite hinsichtlich methodischer Vorgaben zur strukturierten Identifikation geeigneter Effizienzmaßnahmen in einer spezifischen Fabrik sowie bezüglich der Auswahl softwaregestützter Planungswerkzeuge bestehen.

Die Dissertation [15] von **Hopf** stellt einen Beitrag zur modellhaften Abbildung von Fabriken mit dem Ziel der Unterstützung ganzheitlicher und methodischer Planungsprojekte zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz dar. Dazu entwickelte der Autor eine Modellierungsmethodik aufbauend auf der Flusssystemtheorie [15, S. 61 ff.], welche sich gleichwohl für die Umsetzung mittels statischer und dynamischer Modellierungssoftware eignet [15, S. 166 ff.]. Es bleibt festzustellen, dass die vorgestellte Methodik sehr detailliert, aber auch umfangreich ist und selbst bei nur teilweiser Applikation mit einem bedeutenden Umsetzungsaufwand zu rechnen ist. Da die Softwareunterstützung bislang nur prototypisch erfolgt ist und kaum Hinweise zur Einschrän-

kung der Anwendung (z. B. hinsichtlich einzubeziehender Subsysteme) gegeben werden, ist nicht auszuschließen, dass die Planungseffizienz mit dieser Methodik sinkt.

Im Gegensatz dazu versucht der Ansatz von **Krones** den Analyseaufwand durch eine strukturierte Informationsabfrage zur Identifikation von Energieeffizienzmaßnahmen zu minimieren [51, S. 71 ff.]. Dazu werden einerseits Datenbanken und Softwaretools genutzt, andererseits wird aber keine weiterführende, insbesondere softwaregestützte Hilfestellung für die Realisierungsplanung ausgewählter Maßnahmen gegeben [51, S. 131 ff.]. Für die Umsetzung des Lösungskonzepts von Krones ist eine Datenbank zu pflegen, welche letztlich Effizienzmaßnahmen für ausgewählte Elemente in Fabriken liefern kann. Somit lässt sich dieser Ansatz zwar grundsätzlich in andere Vorgehensmodelle integrieren, behandelt in sich jedoch stets nur Teilaspekte von Fabrikplanungsprojekten (Maßnahmenauswahl).

Entgegen der zuvor angeführten Arbeiten orientiert sich die Dissertation von **Imgrund** [14] weniger eng am klassischen Fabrikplanungsprozess. Vielmehr stellt sie verschiedene Hilfsmittel und Methoden zur Planung bzw. Verbesserung von Fabriken unter besonderer Beachtung von Energieeffizienz vor [14, S. 143]. Im Einzelnen wird auf die Standortauswahl, die Werksstrukturplanung und die Gebäudekonstruktion (insbesondere Baumaterialien und Dachkonstruktion) sowie das Energiemanagement und Verbrauchsmonitoring eingegangen [14, S. 7 ff.]. Imgrunds Arbeit diskutiert die voranstehend genannten Aspekte eines Fabrikplanungsprojektes detailliert. Zugleich gibt sie jedoch nur wenig Hilfestellung für andere, nicht unmittelbar im Fokus befindliche Planungsaspekte.

Der Ansatz von **Reinema et al.** [55] ist mit dem von Müller et al. [13] vergleichbar. So sieht das präsentierte Vorgehen ebenfalls zunächst die Identifikation geeigneter Stellhebel bzw. Merkmale vor, von denen ausgehend mittels ganzheitlicher Planung energieeffiziente Lösungen entwickelt werden sollen. Als zentrale Wirkungsbereiche wurden dabei der Standort und das Gebäude, die Haustechnik sowie die Prozesse und die Organisation identifiziert. Ergänzend zu den von Engelmann identifizierten Handlungsansätzen (vgl. [48, S. 93 ff.]) wurde noch der Aspekt „Sensibilisierung“ in [55] aufgegriffen.

Aus dem Forschungsprojekt **EMC²-Factory** heraus wurde ebenfalls eine Planungssystematik für „Grüne Fabriken“ entwickelt [53], [54]. Hauptargumente für diese Systematik sind, dass die alleinige Aufnahme von Energieeffizienz als Planungsziel ungenügend sei und zugleich Fabriken unterschiedlicher Wirtschaftszweige (etwa aus dem Automobil- und Schienenfahrzeugbau) zu unterschiedlich seien, um sie auf gleiche Weise zu behandeln [53]. Stattdessen

wird ein modularer Planungsbausteinkasten, bestehend aus konventionellen und energieeffizienzorientierten („grünen“) Modulen unter expliziter Einbeziehung geeigneter Planungswerkzeuge, vorgeschlagen [53]. In Planungsprojekten werden die relevanten Module entsprechend der eingangs definierten Ziele ausgewählt und eingesetzt [54]. Dieser Ansatz ist als holistisch zu bewerten, wobei die Modularität zugleich die Planungs- und Ergebniseffizienz fördert. Dennoch ist zu erwarten, dass die Komplexität in der Erstellung und Wartung sowie im Einsatz des Bausteinkastens bedeutend ist.

Chen et al. [52] zeigen ebenfalls, wie ein datenbankbasierter Ansatz zur nachhaltigen Fabrikplanung gestaltet werden kann. Grundannahme dabei ist, dass sich Fabrikplanungsschritte, Fabrikelemente und Nachhaltigkeitsaspekte über Schnittstellen in Verbindung setzen lassen, sodass auf Grundlage erkannter Beeinflussungen genaue Hilfestellung zum Planungsprozess gegeben werden kann [52]. Dieser Ansatz hebt sich von den vorangehend diskutierten primär dadurch ab, dass explizit alle Nachhaltigkeitsdimensionen adressiert werden und kein neues, allgemeines Planungsmodell zugrunde gelegt wird. Zugleich lenkt die entwickelte Software vor allem den Planungsfokus, ohne dass detaillierte Hilfestellungen für die effiziente Planungsdurchführung gegeben werden.

Ein Ansatz zur nachhaltigen Gestaltung modularer, flexibler Fertigungssysteme wurde von **AlGeddawy und ElMaraghy** [56] publiziert. Bei dem präsentierten Vorgehen wird untersucht, welcher Segmentierungsgrad für ein definiertes Produktionssystem den geringsten Energieverbrauch aufweist, wobei insbesondere Schnittstellenverluste einbezogen werden [56]. Diese Methodik fokussiert stark auf eine bestimmte Art von Fertigungssystemen und, so notieren es auch die Autoren, ist durch weitere Ansätze zu ergänzen.

Die Dissertation von **Schnellbach** [50] behandelt die Entwicklung eines Vorgehens zur Energieeffizienzsteigerung in Produktionssystemen, die nach den Prinzipien „Ganzheitlicher Produktionssysteme“ gestaltet sind [50, S. 6]. Der Autor fokussiert dabei stark auf Unternehmen mit Serien-Fließfertigung, die nach dem Build-to-Order-Ansatz arbeiten [50, S. 5]. Analog zur Zielstellung der vorliegenden Arbeit finden vorrangig Umplanungsprojekte für Produktionssysteme in der Betriebsphase Beachtung [50, S. 5]. In seiner Methodik integriert Schnellbach dabei bestehende Methoden, u. a. energieorientierte Wertstromanalyse, System-Dynamics-Simulation und den Analytischen Hierarchie Prozess [50, S. 61 ff.]. Festzustellen ist jedoch, dass der Fokus der Bewertungsansätze auf statischen Methoden bzw. Annahmen liegt. So kann insbesondere die System-Dynamics-Simulation nicht zur Untersuchung des

detaillierten dynamischen Verhaltens herangezogen werden. Insofern ist zwar stringente Methodenunterstützung gegeben, jedoch nur für einen Teil möglicher Umplanungsfälle zulänglich.

Neben den hier ausführlicher dargestellten Ansätzen enthalten auch andere Lehrbücher und Publikationen Hinweise zur energieeffizienten Gestaltung von Fabriken. **Pawellek** gibt eine Einführung in die Thematik der Energiemanagementsysteme und verweist für die energieeffiziente Fabrikplanung auf sekundäre Literatur [44, S. 137 ff.]. Auch **Wiendahl et al.** weisen auf wichtige Aspekte sowie mögliche Zertifizierungssysteme (z. B. DGNB und ecoFabrik) hin [45, S. 511 ff.]. **Schenk et al.** geben ebenfalls in Anlehnung an Müller et al. [13] Hinweise zum Einbezug von Energieeffizienz in den Fabrikplanungsprozess [22, S. 543 ff.]. All diesen Werken ist gemein, dass Energie- und Ressourceneffizienz als weiterer Teilaspekt in die jeweils vorgeschlagene Fabrikplanungsmethodik aufgenommen werden, zugleich aber nicht durchweg in allen Ausführungen auch Beachtung finden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es in der Betriebswissenschaft und der Fabrikplanung eine Vielzahl von Ansätzen zur integralen Betrachtung von Energieeffizienz im Planungsvorgehen gibt. Diese geben zumeist jedoch keine oder nur exemplarisch Hinweise zum Einsatz einzelner Planungsmethoden (z. B. Berechnungsvorschriften, Simulation o. ä.). Mit Blick auf die um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation, als einer häufig genutzten Planungsmethode in diesem Bereich, wurden dazu bereits mehr Ergebnisse erzielt und publiziert (vgl. Abschnitt 2.4).

Um genauer einzugrenzen, welche Planungsgegenstände typischerweise in Energieeffizienzplanungsprojekten relevant sind, diskutiert der folgende Abschnitt zunächst aus der Literatur bekannte Handlungsebenen und -ansätze. Hieraus können im Nachgang Anforderungen an und Randbedingungen für den Einsatz von Planungsmethoden, insbesondere der Simulation, abgeleitet werden.

2.1.4 Handlungsebenen und -ansätze zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken

Die VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1 sieht vier unterschiedliche Planungsbereiche für **Fabrikplanungsprojekte** vor: „Ziele“, „Standort“, „Externe Logistik“ sowie „Fabrik und Produktionslogistik“ [24, S. 5 f.]. Der Betrachtungsfokus der vorliegenden Arbeit liegt auf „Fabrik und Produktionslogistik“, welcher auch als „Bereich der Fabrikplanung im engeren Sinn“ bezeichnet wird [24, S. 6]. Nach Förster und Wirth steht im Ergebnis derartiger Projekte ein hohes Maß an qualitativer und quantitativer Bestimmtheit der

- „Elementmengen (Subsysteme, Fertigungsplätze, Ausrüstungen, Personal),
- Strukturen (Hierarchien, räumliche und zeitliche Struktur) und
- Fertigungsauftragsmengen einschließlich der zu ihrer Fertigung erforderlichen Mengen der Fertigungsvorgangsfolgen“ [57, S. 11].

Schenk et al. definieren darauf aufbauend, dass sich ein Produktionssystem systemtheoretisch als $\sum = (P, M, S)$ darstellen lässt (P – Produktionsprozesse; M – Elementmengen; S – Strukturen) [22, S. 283]. Dessen Planung umfasst vier hauptsächliche **Projektierungsschritte**, wobei die ersten drei P, M und S konkretisieren:

1. *Funktions- und Prozessbestimmung:* Festlegung der Prozessmenge P, die zur Produktion benötigt werden [22, S. 301]
2. *Dimensionierung:* Festlegung der Elementmenge M von Produktionsfaktoren (Betriebsmittel, Personal und Material) sowie Flächen- und Finanzbedarfe [22, S. 306]
3. *Strukturierung:* Festlegung der Strukturen S hinsichtlich zeitlicher und räumlicher Beziehungen von Flusssystemelementen bzw. Produktionsfaktoren [22, S. 320]
4. *Gestaltung:* Festlegung der umzusetzenden räumlich-funktionellen Einordnung der Flusssysteme unter Beachtung aller Restriktionen (Detaillierung) [22, S. 330 f.]

Anders ausgedrückt beschäftigt sich die Fabrikplanung (im engeren Sinne) vorrangig mit der Festlegung der räumlichen bzw. organisatorischen Aufbaustrukturen sowie der Ablaufstrukturen für die spätere Betriebsphase in den unterschiedlichen Flusssystemen. Zu diesen zählen beispielsweise Informationsflüsse, Stoff-/Materialflüsse, Energieflüsse, Kapitalflüsse und Personenflüsse [22, S. 168].

Zur Verdeutlichung von Ansatzpunkten der Fabrikplanung zeigt Abbildung 2.5 typische **Strukturebenen** von Produkten nach Grundig [58, S. 82] und von Fabriken nach VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1 [24, S. 7] sowie den jeweiligen Fabrikplanungsfokus. Dabei wird die Produktstruktur in diesem Falle auf die Fertigungsanlagen und -maschinen (Betriebsmittel) bezogen. Der Arbeitsplatz fasst diese mit weiteren Nebeneinrichtungen zu einer elementaren Produktionseinheit zusammen [24, S. 7]. Dargestellt ist ebenfalls, dass der Abstraktionsgrad bei der Systemanalyse zunimmt, während der technische Detailgrad bezogen auf die Einzelprozesse abnimmt. Obwohl beispielsweise für die Bauteilfertigung noch physikalische Prozesse – wie etwa der Spanabhub – bedeutsam sind, ist für die isolierte Betrachtung der Hauptbaugruppe Motorspindel in erster Linie die einwirkende Kraft unabhängig der Quelle relevant.

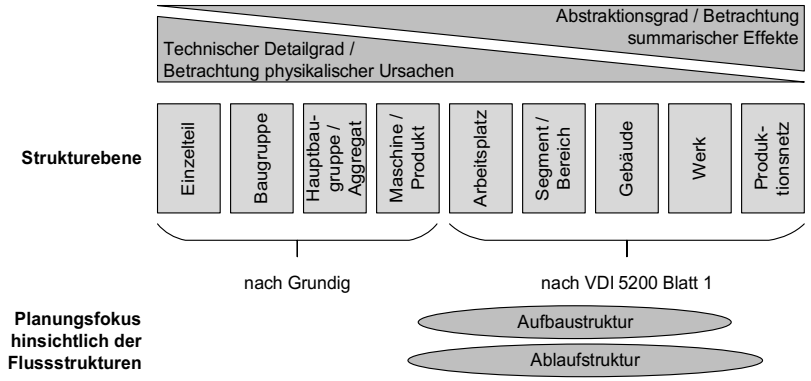


Abbildung 2.5: Planungsfokus nach Strukturebenen von Produkten und Fabriken

Bezogen auf die Fabrikplanung (im engeren Sinne) ist festzustellen, dass die **Aufbaustruktur** nur noch wenig Bezug zur Maschine hat und an der Werksgrenze (wenn nicht bereits auf niedrigerer Ebene) endet. Ein Fabrikplaner wird auf Grundlage der Prozessmenge P Maschinen auswählen oder Anforderungen für neue Maschinen für potenzielle Lieferanten zusammenstellen, nicht aber unmittelbar in die Feinstruktur der Maschine oder gar in die physikalischen Bearbeitungsprozesse eingreifen.

Mit Blick auf die **Ablaufstruktur**, also der Nutzung der verschiedenen Elemente, erweitert sich der Fokus etwas. So kann die Prozessbeschreibung für einzelne Arbeitsplätze durchaus weiterführende Implikationen auf den Maschinenbetrieb haben. Zugleich ergeben sich aus der Gesamtorganisation des Fertigungsbetriebs auch Konsequenzen über die Werksgrenzen hinaus. Wie einzelne Aggregate oder Bauteile innerhalb der Maschine gesteuert werden, ist jedoch kein fabrikplanerisch relevanter Aspekt und daher vornehmlich durch andere Spezialisten (z. B. Automatisierungsexperten) zu bearbeiten.

Konkreter auf die energieeffizienzorientierte Fabrikplanung bezogen, lässt sich somit konstatieren, dass vor allem solche Maßnahmen im Planungsfokus sind, die auf die Effizienzsteigerung im Zusammenwirken mehrerer Flusssystemelemente bzw. mehrerer Flusssysteme abzielen. Technologische und technische Verbesserungen werden vom Fabrikplaner zwar ggf. angestoßen und durch ihn hinsichtlich ihrer Auswirkungen untersucht, jedoch wird dieser nicht die technischen Feinheiten in der Maßnahmenausgestaltung festlegen. Diese Abgrenzung zeigt sich auch im oberen Bereich von Abbildung 2.5. In den für die Fabrikplanung relevanten Ebenen werden weniger technische

Details und physikalische Ursachen genau analysiert bzw. gestaltet. Viel mehr geht es um die Betrachtung von summarischen Effekten für das gesamte Produktionssystem auf höherer Abstraktionsebene.

Als Hilfestellung für die Identifikation geeigneter Effizienzmaßnahmen wurden in der Vergangenheit verschiedentlich Kataloge möglicher Einsparpotenziale branchentypischer Anlagen oder allgemeiner Querschnitttechnologien zusammengestellt (vgl. [34, S. 35 ff.], [59, S. 9 ff.], [60, S. 101 ff.]) oder auch die Umsetzung einzelner Effizienzmaßnahmen dokumentiert (vgl. Übersicht in [17]). Diese lassen sich wiederum abstrahieren und zu allgemeinen Handlungsansätzen oder auch Heuristiken zusammenfassen. Tabelle 2.1 zeigt dazu fünf in der gegenwärtigen Literatur zu findende Systematisierungen, welche wiederum entsprechenden Literaturrecherchen entstammen. Bei der gezeigten Aufstellung wurden ähnliche Ansätze unterschiedlicher Autoren zeilenweise zugeordnet. Dabei zeigt sich, dass signifikante Überschneidungen zwischen den Systematisierungen bestehen. Dies unterstreicht, dass es auf einem in der Fabrikplanung typischerweise herangezogenen höheren Abstraktionsniveau möglich wird, verschiedene Maßnahmen vergleichbar zu behandeln.

Tabelle 2.1: Handlungsansätze für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrikplanung

Engelmann [48, S. 93 ff.]	**Müller et al. [13, S. 121 ff.]**	**Reinema et al. [55]**	**Schlund et al. [61, S. 104 ff.]**	**Schnellbach [50, S. 85 ff.]**
Substitution	Substitution der eingesetzten Energieträger	Substitution	Substitution von Ressourcen	bedarfsgerechte Energieversorgung
	Minderung des Bedarfs an Nutzenergie (durch energetisch optimierte Produktgestaltung)		Verlängerung der Lebensdauer	
Dimensionierung	Minderung des Bedarfs an Nutzenergie (durch energetisch optimierte Dimensionierung)	Dimensionierung	Vermeidung des Ressourceneinsatzes	energetisch optimaler Betriebspunkt

Tabelle 2.1: (Fortsetzung)

Engelmann [48, S. 93 ff.]	**Müller et al. [13, S. 121 ff.]**	**Reinema et al. [55]**	**Schlund et al. [61, S. 104 ff.]**	**Schnellbach [50, S. 85 ff.]**
Fahrweise	Minderung des Bedarfs an Nutzenergie (durch energiesparende Fahrweisen)	Fahrweise	Strategische Maßnahmen	energieorientierte Auslastung
Wirkungsgrad	Steigerung des Wirkungsgrads	Wirkungsgrad		Prozessschritt-integration/ -substitution
Reduzierung Verluste	Reduktion der Verlustenergie	Verlustreduzierung	Optimierung von Produktionsprozessen	Komponenten-addition/ -substitution/ -reduktion
Rückgewinnung	Energierückgewinnung	Rückgewinnung		Rückgewinnung / Weiterverwendung
	Weiternutzung von Verlustenergie als Anfall-Energie			
		Sensibilisierung		energieorientierte Instandhaltung
			Optimierung der Kreislauffähigkeit	
				energieorientierte Transporte und Wege

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Simulationsstudien (als Anwendung der Planungsmethode Simulation) beziehen sich, den vorangehenden Ausführungen folgend, auf die für die Fabrikplanung relevanten Strukturebenen. Aufgrund ihrer Einbettung in Energieeffizienzprojekte verfolgen sie primär die in Tabelle 2.1 zusammengefassten Handlungsansätze zur Gestaltung der unterschiedlichen Flusssysteme. Ausgehend von der einlei-

tend beschriebenen Problemstellung (vgl. Abschnitt 1.1) kann konkretisiert werden, dass im Weiteren nur die Planung energieeffizienzbezogener Veränderungsmaßnahmen für bestehende Fabriksysteme im Sinne eines Umplanungsprojekts zu beachten ist. In dieser Art von Projekt werden typischerweise nur einzelne Flusssystemelemente oder Subsysteme der Fabrik, nicht aber das System in Gänze verändert.

2.2 Entscheidungstheorie

Bereits in der Einleitung wurde auf die Relevanz der Entscheidungstheorie für die aufgeworfene Problemstellung hingewiesen. Der vorangehende Abschnitt hat zudem gezeigt, dass die Planung von Energieeffizienzmaßnahmen letztlich eng verbunden mit einer Investitionsentscheidung ist (vgl. Abschnitt 2.1.1). Zur Konkretisierung der theoretischen Grundlagen wird im Weiteren ein Überblick der Entscheidungstheorie präsentiert. Anschließend wird konkreter auf heuristische Vorgehensmodelle zur Lösung von Entscheidungsproblemen eingegangen, die einen probaten Ansatz für die Konzeptionierung und die Systematisierung der Gestaltungsmethodik liefern können.

2.2.1 Überblick

Auch wenn Entscheiden ein ganz alltäglicher Vorgang ist, soll zunächst der Begriff „**Entscheidung**“ formal definiert werden. Nach Laux et al. versteht man unter diesem die *„Auswahl einer von mehreren Handlungsalternativen“* [62, S. 3]. Allen Entscheidungen liegen **Entscheidungsprobleme** zugrunde. Diese ergeben sich zum einen aus der Identifikation einer Diskrepanz zwischen Ist-Zustand und angestrebtem Zustand, zum anderen aus der Möglichkeit, eine bestehende Soll-Ist-Differenz auf verschiedenen Wegen zu reduzieren [63, S. 7]. Diesen Definitionen folgend, stellt sich die effiziente Gestaltung einer Simulationsstudie nicht als eine einzige Entscheidung, sondern vielmehr als Reihe von Entscheidungen (bezüglich einzelner Gestaltungsaspekte) dar, welche auf mehrere Probleme im Verlauf der Projektdurchführung zurückzuführen sind.

Um den Inhalt von Entscheidungsproblemen besser zu verstehen, bietet sich ihre Charakterisierung entsprechend bestimmter Kriterien bzw. Dimensionen an. Tabelle 2.2 zeigt beispielhaft eine Auswahl, wobei an dieser Stelle auf [63, S. 8 ff.] verwiesen und auf eine detaillierte Darstellung der einzelnen Dimensionen und Ausprägungen verzichtet wird. Das grundlegende Entscheidungs-

problem der Ausprägungsbestimmung[6] für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien ist u. a. als komplexes, mehrwertiges Metaproblem einzuordnen. Auf eine darüber hinausgehende Einordnung wird an dieser Stelle verzichtet.

Tabelle 2.2: Dimensionen von Entscheidungsproblemen und ihre Ausprägungen [63, S. 9]

Dimension	**Ausprägung**		
(1) Schwierigkeitsgrad	Einfach	Komplex	
(2) Problemstruktur	Gut strukturiert	Schlecht strukturiert	
(3) Problemcharakter I	Wahlproblem	Gestaltungsproblem	
(4) Problemcharakter II	Gefahrenproblem	Chancenproblem	
(5) Verknüpfung mit anderen Entscheidungsproblemen	Unabhängiges Entscheidungsproblem	Entscheidungsproblem in einer Entscheidungssequenz	
(6) Problemebene	Originäres Entscheidungsproblem	Metaproblem	
(7) Art des Aktors	Entscheidungen von Einzelpersonen	Entscheidung von Kollektiven	
(8) Zahl der verfolgten Ziele	Einwertig	Mehrwertig	
(9) Prognostizierbarkeit der Konsequenzen	Mit Sicherheit prognostizierbare Konsequenzen	Mehrere mögliche Konsequenzen mit prognostizierbaren Eintretenswahrscheinlichkeiten	Mehrere mögliche Konsequenzen ohne prognostizierbare Eintretenswahrscheinlichkeiten

Ein Ziel der Entscheidungstheorie ist die Beschreibung von Entscheidungen, die in der Realität getroffen werden, auf empirischer Grundlage (**deskriptive Entscheidungstheorie**) [62, S. 3 f.]. Sie erforscht u. a., welche Mechanismen in der Praxis zur Anwendung gelangen. Dazu zählen nach Grünig und Kühn beispielsweise: die intuitive Auswahl einer Lösung, der Rückgriff auf vormals realisierte Lösung, die ungeprüfte Übernahme einer

6 Unter „Ausprägungsbestimmung“ wird in der vorliegenden Arbeit die Auswahl einer problemspezifischen Ausprägung aus einer Menge von verfügbaren Alternativen für einen konkreten Gestaltungsaspekt von Simulationsstudien verstanden.

Expertenentscheidung, der Rückgriff auf Zufallsmechanismus zur Lösungsauswahl und die Entscheidung auf Grundlage eines systematischen, rationalen Denkprozesses [63, S. 15].

Ein alternatives Ziel der Entscheidungstheorie ist das Vorschreiben von Entscheidungsprozessen, um so rationale Entscheidungen zu unterstützen und herbeizuführen (**präskriptive oder normative Entscheidungstheorie**) [62, S. 3 f.]. Dabei vermeidet sie dogmatische Vorschriften und versucht vielmehr, eine rationale Entscheidungsfindung herbeizuführen [62, S. 42]. Die weiteren Ausführungen beschränken sich auf die präskriptive Entscheidungstheorie, da insbesondere diese im Kontext der vorliegenden Arbeit von Belang ist. Diese Disziplin zielt auf die Entwicklung von Entscheidungshilfen für derartige Probleme ab, wie sie bei der Ausgestaltung von Simulationsstudien relevant sind.

Eine zentrale Grundannahme dieser Theorie ist, dass komplizierte Entscheidungsprobleme sich durch Dekomposition (vgl. [64, S. 10]) besser lösen lassen [64, S. 20]. Die relevanten Komponenten sind dabei laut Eisenführ et al.:

- *Handlungsalternativen:* eine Menge von Alternativen, aus der eine zu wählen ist;
- *Umwelteinflüsse:* von der Umwelt geschaffene Bedingungen, die Auswirkungen auf eine Entscheidung haben, aber nicht oder nur teilweise beeinflussen lassen;
- *Konsequenzen:* die Wirkung der ausgewählten Alternative unter Eintreten bestimmter Umwelteinflüsse;
- *Ziele und Präferenzen:* die Orientierung des Entscheiders und seine persönlichen Vorlieben, welche in die Bewertung der Konsequenzen eingehen [64, S. 20].

In vergleichbarer Weise nennen Laux et al. Handlungsalternativen, Umweltzustände, Ergebnisse und Entscheidungsregeln als Bestandteile der allgemeinen Struktur von Entscheidungsproblemen [62, S. 29]. Grünig und Kühn verwenden wiederum die Begrifflichkeiten Lösungsvarianten, Umfeldszenarien, Entscheidungskriterien, Konsequenzen und Entscheidungsmaximen in diesem Kontext [63, S. 64 ff.].

Die Struktur von Entscheidungsproblemen bildet zugleich die Grundstruktur von **Entscheidungsmodellen**, welche wiederum der logischen Ableitung [62, S. 29] bzw. Vorbereitung von Entscheidungen [62, S. 53] dienen. Dabei ist festzustellen, dass die Modellierung durch Dekomposition nicht eindeutig ist und sich ein Problem mitunter auf unterschiedliche Weise abbilden lässt [64, S. 20]. Ferner gibt die Lösung des Modells nicht zwangsläufig die zu wählende Alternative vor, vielmehr ist zu prüfen, ob das Ergebnis unmittelbar umgesetzt werden kann oder in bestimmter Weise zu revidieren ist [62, S. 53].

Abhängig davon, wie sich Entscheidungsprobleme darstellen, lassen sich **Entscheidungsverfahren** zur deren Bewältigung unter Einbezug von Regeln zur Informationsbeschaffung und -verarbeitung entwickeln (vgl. [63, S. 43]). Derartige Verfahren lassen sich gemäß der in Tabelle 2.3 gezeigten Dimensionen und Ausprägungen kategorisieren.

Tabelle 2.3: Dimensionen von Entscheidungsverfahren und ihre Ausprägungen [63, S. 45]

Dimensionen	**Ausprägungen**	
(1) Inhaltliche Breite der zugrunde gelegten Problemstellung	Allgemeine Entscheidungsverfahren	Spezielle Entscheidungsverfahren
(2) Formale Anwendungsbedingungen	Entscheidungsverfahren mit restriktiven formalen Anwendungsbedingungen	Entscheidungsverfahren ohne wesentliche einschränkende formale Anwendungsbedingungen
(3) Qualität der produzierten Lösung	Entscheidungsverfahren, die eine optimale Problemlösung anstreben	Entscheidungsverfahren, die eine befriedigende Problemlösung ermöglichen

Aus dieser Charakterisierung kann gefolgert werden, dass es eine Vielzahl von Entscheidungsverfahren gibt, was sich auch in der einschlägigen Literatur bestätigt (vgl. [28, S. 55 ff.], [62, S. 57 ff.], [64, S. 109 ff.], [65, S. 143 ff.]). Folglich existiert für fast jedes Entscheidungsproblem auch das Metaproblem der Verfahrensauswahl, welches wiederum die Notwendigkeit zur **Bewertung der Entscheidungsmodelle** bzw. -verfahren begründet. Dazu stellt Schmidt fest, dass dies ein nicht triviales Problem darstellt [65, S. 30]. Um dennoch eine vergleichende Einschätzung von Entscheidungsmodellen vornehmen zu können, führt Schmidt die vier nachstehenden Anforderungen an:

- *Rationalität:* Nach diesem Kriterium ist ein Modell bzw. ein Verfahren als rational (im Sinne der ökonomischen Theorie) zu betrachten, wenn es „optimale, d. h. im Hinblick auf die angestrebten Ziele und unter Beachtung der Präferenzen des [Entscheiders] bestmögliche Entscheidungsempfehlungen generier[t]“ [65, S. 213].
- *Realitätsnähe:* Dieses Kriterium teilt sich in zwei Subkriterien, die die Übereinstimmung vom Modell zur Realität und vice versa untersuchen [65, S. 46 ff.]. Dazu wird die Forderung gestellt, dass „die Modellannahmen in der Realität entsprechend gegeben sein (Existenz) und wesentliche Merkmale der realen Entscheidungssituation im Modell adäquat abgebildet werden (Vollständigkeit)“ [65, S. 244] müssen.

- *Anwendbarkeit:* Die Anwendbarkeit kann wiederum auf Grundlage von fünf Subkriterien beurteilt werden, wobei letztlich eine Wahrscheinlichkeitsaussage bezüglich der mit einem Modell „theoretisch zu gewinnenden optimalen Ergebnisse“ [65, S. 52] gesucht wird. Dazu sind die Bewältigbarkeit, die Robustheit, die Durchsetzbarkeit, die Flexibilität und die Kontrollierbarkeit zu prüfen [65, S. 54 ff.].
- *Wirtschaftlichkeit:* Grundlage dieses Kriteriums ist das Verhältnis von Nutzen und Kosten. Nutzen wird dazu „durch eine Verbesserung des Entscheidungsprozesses respektive durch den Zuwachs an Entscheidungsqualität charakterisiert“ [65, S. 61]. Kosten beziehen sich dabei wiederum auf alle anfallenden Kosten zur Anwendung des Modells, insbesondere Personalkosten [65, S. 61 f.]. Das Verhältnis dieser ist jedoch nur situationsspezifisch, d. h. bezogen auf eine konkrete Anwendung, bestimmbar und kann andernfalls nur unter Bildung von Surrogaten ermittelt werden [65, S. 310 ff.].

Bezüglich der in Tabelle 2.3 angeführten Dimensionen *„Anwendungsbedingungen“* und *„Lösungsqualität“* merken Grünig und Kühn an, dass diese miteinander verknüpft sind und unterschiedliche Betrachtungsweisen desselben Phänomens darstellen [63, S. 45 f.]. Daher führen sie die Kategorisierung in **heuristische und analytische Entscheidungsverfahren** ein [63, S. 46 ff.]. Abbildung 2.6 fasst die zentralen Unterschiede ebendieser zusammen. In der Literatur der Entscheidungstheorie hat die Betrachtung analytischer Ansätze einen großen Stellenwert (z. B. [62], [64], [66], [67]). Damit diese jedoch Anwendung finden können, müssen nach Grünig und Kühn drei Bedingungen gegeben sein:

1. nur quantitative Aspekte sind in der Problemstellung enthalten;
2. klare Regeln können bezüglich der Annehmbarkeit von Lösungen definiert werden;
3. eine optimale Lösung lässt sich in angemessener Zeit und unter vertretbaren Kosten ermitteln [63, S. 48 f.].

Mit Blick auf die in Kapitel 1 formulierte Problemstellung erscheint der mögliche Nutzen analytischer Entscheidungsverfahren für die vorliegende Arbeit von untergeordneter Rolle. Für Simulationsprojekte sind mitunter auch lediglich qualitativ erfassbare Aspekte von Belang. Zudem können infolge mangelnder Informationen im Bearbeitungsverlauf nicht immer eindeutige Regeln für die Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien definiert werden. Eine Optimierung zu diesem Zwecke lässt sich ebenfalls nicht zweckmäßig realisieren, da die mögliche Kombinatorik, abhängig vom untersuchten Planungsproblem, sehr groß ist.

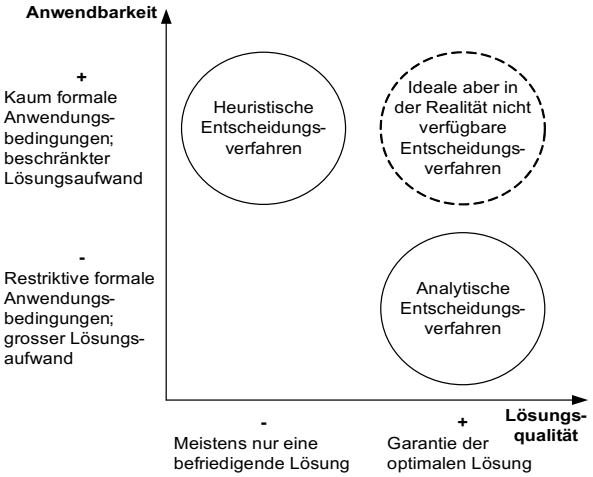


Abbildung 2.6: Vergleich von heuristischen und analytischen Entscheidungsverfahren [63, S. 48]

Folglich können heuristische Verfahren eher für die Unterstützung von Entscheidungsprozessen im Rahmen der in dieser Arbeit näher betrachteten Simulationsprojekte dienen. Der folgende Abschnitt stellt diese Verfahrensart genauer dar.

2.2.2 Heuristische Entscheidungsverfahren

Eingangs wird zunächst der Begriff „**Heuristik**“ genauer definiert. Dieser entstammt dem Griechischen und meint „dienend zum Herausfinden oder Entdecken“ (original: „serving to find out or discover“) [68, S. 25]. Gemeint ist damit u. a. eine

> *„Vorgehensweise zur Lösung von allg. Problemen, für die keine eindeutigen Lösungsstrategien bekannt sind oder aufgrund des erforderlichen Aufwands nicht sinnvoll erscheinen;* [sie] *beinhaltet in erster Linie «Daumenregeln» auf der Grundlage subjektiver Erfahrungen und überlieferter Verhaltensweisen.“ [69]*

Aus dieser Definition heraus wird ersichtlich, dass es sich um eine Art **Lösungsverfahren** handelt. Streim konkretisiert für diese, dass nur solche auch als heuristisch bezeichnet werden sollten, „die mit Hilfe (1) nichtwillkürlicher Entscheidungsoperatoren (2) potenzielle Lösungen vom Suchprozeß *[sic]* ausschließen und für die (3) kein Konvergenzbeweis geführt werden kann“ [70]. Heuristiken nutzen zumeist bekannte Problemeigenschaften zur schnel-

leren Lösungsfindung – d. h. sie sind problembasiert –, garantieren jedoch nicht die Identifikation optimaler Lösungen und erlauben auch keine Abschätzung über die Qualität einer Lösung, genauer den Abstand zum Optimum [71].

Konkreter auf heuristische Entscheidungsverfahren bezogen, stellen Grünig und Kühn fest, dass sich diese nach der inhaltlichen Breite der zugrunde gelegten Problemstellung unterscheiden lassen (vgl. auch Tabelle 2.3). In diesem Zusammenhang sprechen die Autoren von **allgemeinen bzw. speziellen heuristischen Entscheidungsverfahren** [63, S. 46]. Diesen gemein ist, dass sie kaum formale Anwendungsbedingungen haben und den notwendigen Aufwand verringern, zugleich aber auch keine Garantie bezüglich des Findens überhaupt einer bzw. einer optimalen Lösung geben können [63, S. 47]. Sie unterscheiden sich dahingehend, dass die Lösungsqualität zunehmen wird, je mehr die betrachtete Problemstellung mit dem Fokus des entwickelten speziellen Entscheidungsverfahren übereinstimmt und vice versa [63, S. 64].

Bezüglich der Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien wurde bereits festgestellt, dass heuristische Entscheidungsverfahren einen Mehrwert bieten können. Im Sinne einer möglichst effizienten Realisierung scheint es dabei naheliegend, dass ein dezidiert auf die Problemstellung abgestimmtes Vorgehen erarbeitet wird – ein spezielles Verfahren. Als Grundlage dafür kann ein bestehendes allgemeines heuristisches Entscheidungsverfahren, wie das von Grünig und Kühn [63, S. 63 ff.], dienen. Dieses ist in Abbildung 2.7 gezeigt und wird im Weiteren überblicksweise vorgestellt. Die Schritte 3 bis 7 sind für jedes Teilproblem sequentiell oder auch parallel auszuführen.

Grundannahme dieses Verfahrens ist, dass eine „identifizierte Soll-Ist-Abweichung auf verschiedene Weise reduziert werden kann“ [63, S. 7]. Die gezeigten Schritte lassen sich in Anlehnung an [63, S. 69 ff.] wie folgt zusammenfassen:

1. Eine Soll-Ist-Abweichung wird mit Blick auf die Verlässlichkeit der zur Verfügung stehenden Informationen geprüft und dahingehend verifiziert, dass ihre Bearbeitung lohnenswert ist. Für korrekt erkannte Probleme wird der kapazitive und zeitliche Rahmen für ihre Lösung bestimmt.
2. Im Rahmen der Analyse wird das Problem abgegrenzt und strukturiert, sodass notwendige Informationen beschafft und Problemursachen ermittelt werden können. Die Zergliederung in Teilprobleme und ein Konzept für deren Bearbeitung sind weitere Ergebnisse dieses Schrittes.

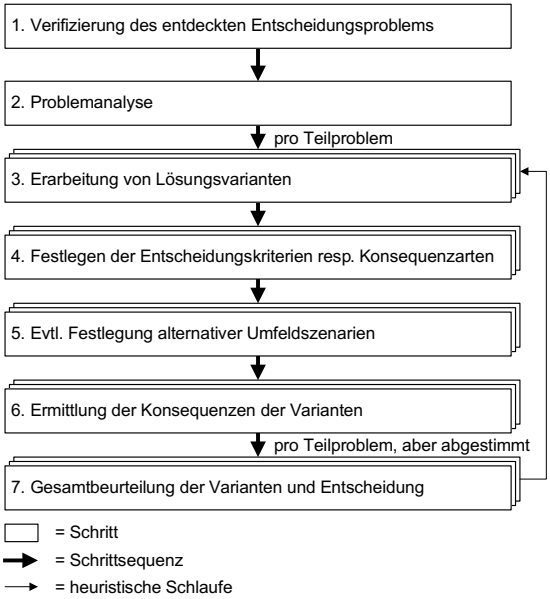


Abbildung 2.7: Grundform des allgemeinen heuristischen Entscheidungsverfahrens in Anlehnung an [63, S. 66]

3. Es werden zumindest zwei signifikant unterschiedliche, d. h. nicht nur im Detail zu differenzierende, Lösungsvarianten erarbeitet. Gelingt dies nicht, so sollte der Lösungsprozess abgebrochen werden, da kein Entscheidungsproblem besteht.
4. Für die Bewertung der identifizierten Lösungsvarianten sind Entscheidungskriterien zu definieren, welche konkrete Maßstäbe zur Beurteilung darstellen.
5. Ausgehend von einer Prüfung der Umwelteinflüsse ist zumindest ein Umfeldszenario abzuleiten, welches die äußeren Bedingungen in der Entscheidungsfindung beschreibt. Überdies kann es notwendig sein, auch mehrere alternative Umfeldszenarien zu definieren, die zur Konsequenzermittlung herangezogen werden.
6. Auf Grundlage der definierten Kriterien und Umfeldszenarien werden die Konsequenzen der jeweiligen Varianten quantifiziert.
7. Eine abschließende analytische oder summarische Beurteilung der Lösungsvarianten bereitet die eigentliche Entscheidung vor. Im Falle einer analytischen Beurteilung dienen methodische Regeln, auch Entscheidungsmaximen, der Bildung der Gesamtkonsequenz.

Innerhalb dieses Verfahrens kommen unterschiedliche heuristische Prinzipien zum Einsatz. Nach Grünig und Kühn (vgl. [63, S. 74 ff.]) zählen hierzu:

- *Problemfaktorisierung:* Sehr komplexe Probleme lassen sich besser lösen, indem sie in ein System von leichter zu bewältigenden Teilproblemen strukturiert werden. Auf diesem Wege wird jeder einzelne Bestandteil parallel oder sequenziell zu den anderen, aber für sich genommen, behandelt.
- *Modellbildung:* Identifizierte Teilprobleme werden dahingehend abgegrenzt, dass sie mittels erprobter Lösungsverfahren behandelt werden können.
- *Unterzielreduktion (Sub-goal-Reduction):* Um Varianten auch hinsichtlich genereller und schwer beurteilbarer Ziele einschätzen zu können, wird eine Menge von Unterzielen entwickelt, welche als Maßstäbe für die Bewertung einzelner Lösungsvorschläge fungieren.
- *Generate-and-Test:* Für ein Problem sind solange neue Lösungsvarianten zu entwickeln, bis eine befriedigende Lösung gefunden wurde oder keine bessere mehr gefunden werden kann.
- *Beschränkte Rationalität (Bounded Rationality):* Statt einer optimalen wird eine befriedigende Lösung gesucht, wobei Annehmbarkeit mittels eines zu definierenden Anspruchsniveaus bestimmt wird. Abhängig von den gefundenen Lösungen kann es notwendig sein, das Niveau während der Lösungssuche anzupassen.

Ausgehend von diesem allgemeinen Vorgehen und den darin eingesetzten heuristischen Prinzipien lässt sich ein Entscheidungsverfahren speziell zur Ausprägungsbestimmung für zu identifizierende Gestaltungsaspekten von Simulationsstudien entwickeln. Das zugrundeliegende Entscheidungsproblem besteht dabei aus einer Vielzahl interdependenter Teilproblemen. Gründe hierfür sind, dass Entscheidungen bezüglich einzelner Gestaltungsaspekte im Restriktionsverbund stehen und der Erfolg der Simulationsanwendung insgesamt u. a. von der Gesamtheit aller Aspekte abhängig ist [62, S. 270 f.].

Bereits in der Konzeptionsphase muss der zu erwartenden Komplexität durch geeignete Modellvereinfachungen begegnet werden (vgl. [62, S. 570 f.]). Diese kann bei der Erfassung von Lösungsvarianten, Konsequenzen oder Umwelteinflüssen sowie bei den Regeln zur Entscheidungsfindung ansetzen [62, S. 570 ff.]. Abschnitt 2.3.3 zeigt im Weiteren, dass mitunter eine Vielzahl von Lösungsvarianten für einzelne Gestaltungsaspekte einer Simulationsstudie existiert. Daher stellt insbesondere die Reduktion der einzubeziehenden Lösungsvarianten (vgl. [62, S. 571 f.]) einen zielführenden Ansatz zur Komplexitätsbeherrschung dar. Dies kann beispielsweise durch Abstraktion auf allgemeinere oder durch Ausschluss praktisch bislang nicht realisierter bzw. nicht realisierbarer Lösungsvarianten geschehen.

2.3 Simulation in der Fabrikplanung

In Abschnitt 2.1 wurde u. a. darauf hingewiesen, dass der Einsatz von Planungsmethoden ein wichtiger Aspekt in der Fabrikplanung ist. Erst durch die korrekte Auswahl und Anwendung geeigneter Methoden und Werkzeuge kann ein Planungsprozess wirklich effizient durchgeführt werden. Die Digitale Fabrik stellt in diesem Kontext eine Sammlung von Ansätzen für die durchgängige softwaregestützte Planung von Fabriksystemen zur Verfügung. Abschnitt 2.3.1 erläutert dies näher und gibt einen allgemeinen Überblick zur Materialflusssimulation. Darauf aufbauend wird der Stand von Wissenschaft und Technik zur gleichzeitigen Simulation von Material- und Energieflüssen in Abschnitt 2.3.2 dargestellt. Im Anschluss wird eine systematische Literaturanalyse zur Diversität in der Anwendung der vorangehend genannten Art von Simulation präsentiert (Abschnitt 2.3.3).

2.3.1 Digitale Fabrik und Materialflusssimulation

Eine Einordnung des Begriffs „Digitale Fabrik" kann über das Konzept der „**Digitalen Produktion**" erfolgen. Dazu schreibt Lentes:

> *„Die Digitale Produktion befasst sich mit der durchgängigen Gestaltung und Unterstützung produkt- und produktionsbezogener Prozesse unter Nutzung innovativer Informationstechnologien. Ziel der Digitalen Produktion ist die möglichst frühzeitige Absicherung von Produkt- und Produktionsentstehungsprozessen." [72]*

Mit diesem Ansatz wird u. a. die Beschleunigung, die Qualitätssteigerung und die Kostensenkung der Hauptprozesse von Industriebetrieben angestrebt [72]. Die Digitale Produktion stellt somit die „softwaregestützte Verzahnung von Produktentwicklung, Produktions- und Fabrikplanung" [73, S. 94] dar. Aus diesem Zusammenhang (vgl. auch Abbildung 2.8) lässt sich zugleich die Abgrenzung zwischen Digitalem Produkt und **Digitaler Fabrik** ableiten. Ersteres beschäftigt sich mit der eigentlichen Produktentwicklung, während letztere auf alle Aspekte zur späteren Herstellung des Produktes abzielt. Diese Abgrenzung ist restriktiver, als jene der VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1, die den Begriff wie folgt definiert:

> *„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.*

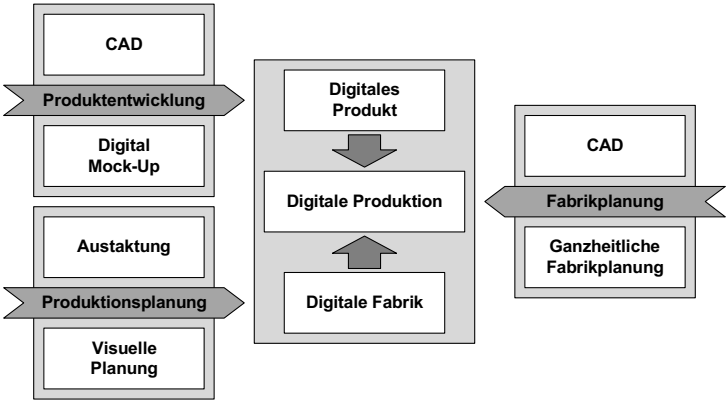


Abbildung 2.8: Digitale Produktion als Verknüpfung von Produktentwicklung, Produktions- und Fabrikplanung [73, S. 94]

> *Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt." [74, S. 3]*

Gemäß dieser Definition ist das Produkt ein Bestandteil des Konzepts „Digitale Fabrik", was auch in den ergänzenden Erläuterungen der VDI-Richtlinie deutlich gemacht wird (vgl. [74, S. 3 f.]). Zugleich bemerken Landherr et al., dass die Entwicklung des Begriffs als solches nicht als vollendet zu betrachten ist, da bisher eine große Fülle von Definitionen und Sichtweisen existiert [75, S. 111]. Da die vorliegende Arbeit auf Fabriken und Produktionssysteme fokussiert, wird Aspekten der Produktentwicklung im Weiteren eine untergeordnete Rolle beigemessen und vornehmlich das Verständnis in Anlehnung an Lentes (s. o.) zur Grundlage genommen.

Die Fabrikplanung und die Produktionsplanung sind generell auf Daten und Informationen aus der Produktentwicklung angewiesen. Folglich kann eine ganzheitliche Planung dieser Komplexe nur mittels durchgängiger Datenintegration erfolgen. Zugleich ist eine zu weitreichende Vermengung auch der Abgrenzung von Verantwortlichkeiten abträglich und zugleich unüblich. Beispielhaft dazu sei das allgemeine Prozessmodell für die Produktentstehung innerhalb der Automobilindustrie von Kerber (vgl. Abbildung 2.9) angeführt, in welchem auch zwischen Produkt- und Produktionsplanung differenziert wird [76, S. 23].

Dieses Verständnis spiegelt sich auch in den von Bracht et al. vorgeschlagenen **Anwendungsfeldern der Digitalen Fabrik** wider, welche alle zumindest mittelbar auf die Gestaltung der Produktion abzielen. Hierunter fallen:

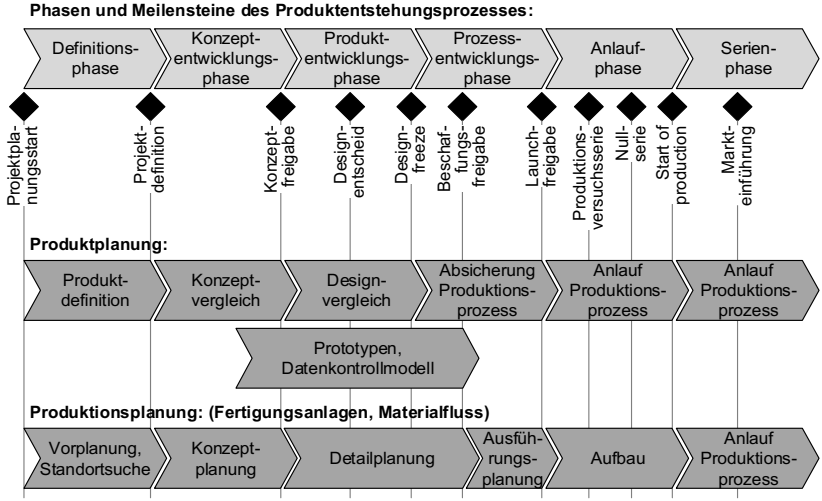


Abbildung 2.9: Allgemeines Prozessmodell für die Produktentstehung innerhalb der Automobilindustrie nach [76, S. 23]

- Fabrik-, Gebäude- und Ausrüstungsplanung [16, S. 26 ff.]
- Produktionsplanung (Planung von Fertigungs-, Lackier- und Montageprozessen sowie Produktionslayoutplanung) [16, S. 33 ff.]
- Logistikplanung [16, S. 43 ff.]
- Produktions- und logistikgerechte Produktgestaltung [16, S. 45 ff.]
- Anlagenanlauf und -betrieb [16, S. 48 f.]

Simulation stellt eine Kerntechnologie der Digitalen Fabrik dar, welche in der Projektierung, Auslegung, Planung und Programmierung von Produktionsanlagen zum Einsatz kommt [77, S. 19]. Nach VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 ist Simulation wie folgt definiert:

> *„Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt." [19, S. 3]*

In der zitierten Richtlinie wird angemerkt, dass unter diesem Begriff allgemein auch „das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell" [19, S. 3] zu verstehen ist. Simulation ermöglicht es, das zeitliche Verhalten modellierter Systeme zu untersuchen und somit Aussagen über ebendiese zu treffen [16, S. 112]. Kühn stellt übereinstimmend mit der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (vgl. [19, S. 6 ff.]) fest, dass Simulation „die Möglichkeit zur:

- Untersuchung real (noch) nicht existierender Systeme[,]
- Optimierung existierender Systeme, ohne deren Betrieb zu stören oder zu gefährden[,]
- Vergleichenden Analyse mehrerer alternativer Varianten[,]
- Simulation des Systemverhaltens über lange Zeiträume im Zeitraffer [und]
- [Erprobung] von Anlaufvorgängen und Übergängen zwischen unterschiedlichen Betriebszuständen“ bietet [77, S. 19 f.].

Grundsätzlich lassen sich in der Digitalen Fabrik unterschiedliche **Simulationsmethoden bzw. -techniken** hinsichtlich der Abbildung (d. h. Modellierung) des Zeitverhaltens unterscheiden (vgl. [78, S. 52 ff.]). Tabelle 2.4 zeigt dazu eine Zusammenfassung nach Bracht et al. [16, S. 112 ff.].

Tabelle 2.4: Simulationsmethoden in der Digitalen Fabrik nach [16, S. 112 ff.]

Abbildung des Zeitverhaltens / Methoden	Erklärung	Beispiele
Kontinuierliche Simulation	Abbildung des realen Systems in Raum und/ oder Zeit zur Untersuchung im physikalisch-technischen Bereich; Annahme, dass sich Systemzustand stetig mit der Zeit oder über den Raum hinweg verändert	
Finite-Elemente-Methode (FEM) / Finite-Differenzen-Methode (FDM) / Finite-Volumen-Methode (FVM)	Modellierung mittels nicht überlappender Zerlegung des Systems in einfache Teilgebiete unter Definition derer relevanten physikalischen Eigenschaften; Simulation des Verhaltens aller verbundener Teilgebiete infolge wirkender Randbedingungen (z. B. äußere Kräfte) über Zeit	Simulation von Tiefzieh-Prozessen, Gießprozessen, spanenden Bearbeitungsprozessen, Lackierverfahren
Mehrkörpersimulation (MKS)	Modellierung mittels durch mechanische Gelenke verbundener starrer und elastischer Körper bzw. mit Kräften beaufschlagten Komponenten (z. B. Federn, Dämpfer, Motoren); Verhalten der translatorischen und rotatorischen Bewegungsabläufe einzelner Körper infolge ihrer Freiheitsgrade wird untersucht	Simulation von Maschinen, Fahrzeugen, Flugzeugen, Roboterbewegungen (z. B. hinsichtlich Erreichbarkeit)

Tabelle 2.4: (Fortsetzung)

Abbildung des Zeitverhaltens / Methoden	Erklärung	Beispiele
Ergonomie-simulation	Spezialfall der Mehrkörpersimulation, bei der speziell der Mensch in Arbeitsprozessen zur Untersuchung ergonomischer Bedingungen abgebildet wird	Simulation von körperlichen Belastungen, problematischen Bewegungsabläufen (z. B. hinsichtlich Erreichbarkeit), Abläufen zur Dokumentation
Kontinuierliche Systeme	Abbildung kontinuierlicher Systeme ohne räumliche Dynamik, insbesondere für flussorientierte Fragestellungen	Wärmesimulation (z. B. Heizungen), thermisch-energetische Gebäudesimulation, Geräuschsimulation
Zeitgesteuerte (zeitdiskrete) Simulation	Modellierung zeitlicher Systemdynamik mittels konstanter Zeitinkremente, nach deren Verstreichen alle Zustandsänderungen rückwirkend um einen vom Intervall abhängigen Betrag angepasst werden	Simulation von volkswirtschaftlichen Fragestellungen, logistischen Stoff- und Energieströmen, (energieeffizienten) Produktionsprozessen
Ereignisdiskrete (Ablauf-)Simulation[7]	Abbildung des zeitlichen Verhaltens mittels atomarer Ereignisse, zu denen Zustandswechsel eintreten; Abarbeitung der Einzelergebnisse entsprechend ihres Eintretens in Abarbeitungsliste (variable Zeitintervalle)	Simulation von inner- und überbetrieblichen logistischen Prozesse, Produktionsprozessen, Fabriken

Alternativ zu dieser Systematisierung unterscheidet Kühn beispielsweise in ereignisdiskrete Simulation, 3D-Kinematik-Simulation, Mehrkörpersimulation (MKS) und Prozesssimulation [77, S. 46 ff.]. Nach Landherr et al. differenziert Westkämper hingegen lediglich nach numerischer und diskreter Simulation [75, S. 114 f.].

7 Bracht et al. weisen darauf hin, dass die Begriffe ereignisdiskrete Simulation (engl.: Discrete Event Simulation; DES) und Ablaufsimulation synonym verwendet werden [16, S. 122]. Materialflusssimulation ist eine Konkretisierung für jene Anwendungen, die auf den Materialfluss abzielen [16, S. 122]. Da die vorliegende Arbeit sich mit dieser speziellen Art von Simulation beschäftigt, findet der Term Materialflusssimulation im Weiteren bevorzugt Anwendung.

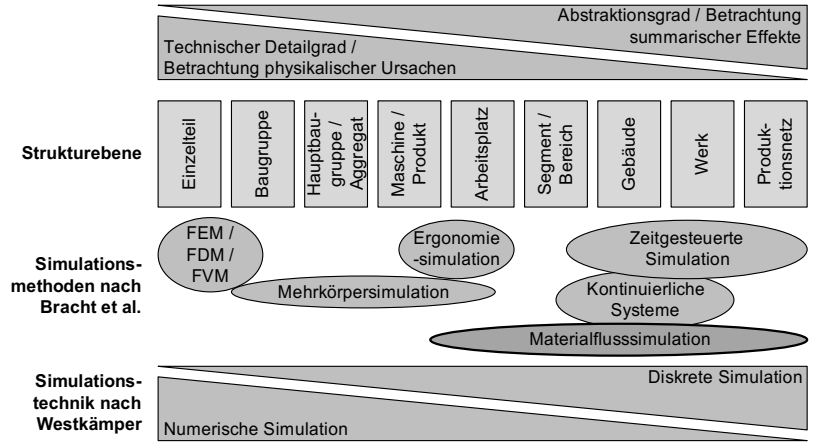


Abbildung 2.10: Einsatzbereiche unterschiedlicher Simulationsmethoden und -techniken

In Anlehnung an Abbildung 2.5 zeigt Abbildung 2.10, in welchen Strukturebenen welche dieser Simulationsmethoden vorrangig zum Einsatz kommen. Hervorgehoben wurde dabei die Materialflusssimulation, welche in der Fabrikplanung vor allem zur Untersuchung ganzer Segmente bzw. Bereiche, Gebäude, Werke oder auch Produktionsnetze zum Einsatz kommt. Diese Simulationsmethode eignet sich auch zur Anwendung auf Maschinen- oder Arbeitsplatzebene, dient dort jedoch zumeist der Anlagen- bzw. Maschinenentwicklung durch die bzw. zur Unterstützung der entsprechenden Lieferanten (z. B. zur virtuellen Inbetriebnahme, vgl. [79, S. 11 ff.]).

Simulation lässt sich grundsätzlich in der Planungs-, Realisierungs- und Betriebsphase von Fabriken und Produktionssystemen einsetzen [19, S. 6 ff.]. Pawellek fasst dazu Fragestellungen, die sich mittels Simulation beantworten lassen, für die Systemprojektierung (Planung und Realisierung) und den Betrieb am Beispiel eines Automobilbauunternehmens zusammen (vgl. Abbildung 2.11) [44, S. 380]. **Einsatzmöglichkeiten** sind demnach:

- *Systemauswahl vor Realisierung:* Modellierung, Untersuchung und Bewertung[8] unterschiedlicher Systemvarianten und -vorschläge oder auch Bestimmung optimaler Systemparameter (z. B. Lagergröße) [44, S. 381 ff.]

8 Pawellek weist darauf hin, dass die eigentliche Planung, d. h. der gestalterische Prozess zur Entwicklung eines Lösungsvorschlags, nicht Bestandteil der Simulation ist [44, S. 381].

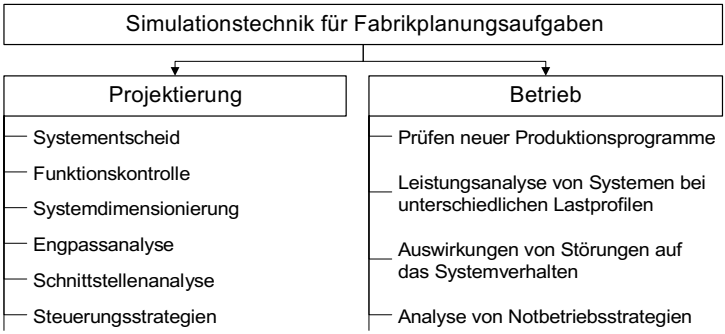


Abbildung 2.11: Fragestellungen der Simulation [44, S. 380]

- *Softwareentwicklung und Inbetriebnahme während der Realisierung:* vorbereitende Überprüfung kundenindividueller Automatisierungs- und Softwarelösungen zur Vermeidung von Fehlern und Gewährung effizienter Steuerung [44, S. 383 ff.]
- *Operative Tagesplanung/Entscheidungen im laufenden Betrieb:* Absicherung des Systemverhaltens bei veränderten Rahmenbedingungen (z. B. infolge saisonaler Auftragsschwankungen) und Prognose des Systemverhaltens [44, S. 385 ff.]

In allen genannten Bereichen geht es schlussendlich (direkt oder indirekt) um die Identifikation von Lösungen, die bestimmten Zielen bestmöglich genügen. Der Anspruch, optimale Lösungen zu finden, wird dabei zumeist in der Betriebsphase verfolgt, etwa zur Bestimmung von Auftragssequenzen mit möglichst hoher Zielerfüllung. So kennt etwa die Wissenschaftsdisziplin Operations Research eine Vielzahl von (Optimierungs-)Modellen bzw. (Optimierungs-)Ansätzen, mit denen sich unternehmerische Entscheidungsprozesse unterstützen lassen (vgl. z. B. [80]). Infolge der Fortschritte bei der Weiterentwicklung von Simulationstechnik, besteht unterdes die Möglichkeit zur **Verknüpfung von Optimierungslösungen und Simulationssoftware** [21, S. 2]. Dabei lassen sich nach VDI-Richtlinie 3633 Blatt 12 grundsätzlich folgende Arten von Kopplung unterscheiden [21, S. 3 f.]:

- *Simulation folgt Optimierung:* Lösung eines einfachen Optimierungsmodells zur Vorauswahl von Eingangsparametern für ein realistischeres Simulationsmodell zur anschließenden manuellen Bestimmung der besten Werte für reales System
- *Optimierung folgt Simulation:* Erzeugung anderweitig nicht zu beschaffender Eingangsparameter für ein exaktes Optimierungsmodell durch vorherige Simulation

- *Optimierung in Simulation integriert:* Nutzung von Optimierungsmodellen zur Auswahl von Alternativen innerhalb des Simulationsverlaufs zur Bestimmung des weiteren Fortschritts
- *Simulation in Optimierung integriert:* Verwendung der Simulation zur Bestimmung von Zielfunktionswerten für Optimierungsablauf, wenn keine geschlossene Definition der Zielfunktion für Optimierung gefunden werden kann

Somit stehen für die verschiedenen Aufgaben der Fabrikplanung und des Fabrikbetriebs nicht nur Softwarelösungen für Materialflusssimulation zur Verfügung, sondern zugleich können diese auch mit Optimierungslösungen kombiniert werden. Die zugrundeliegenden Technologien erlauben dabei eine breitgefächerte Anwendung auf unterschiedlichste Planungsaspekte. Für den Kontext der vorliegenden Arbeit stellt die um Energiebetrachtungen erweiterte Materialflusssimulation einen zentralen Fokus dar. Der folgende Abschnitt stellt die dazu verwendeten Ansätze und Technologien genauer dar.

2.3.2 Materialflusssimulation mit integrierter Betrachtung von Energie

Die Verwendung von Simulation zum Zwecke der gleichzeitigen Untersuchung von Materialflüssen und Energieverbräuchen bzw. Umweltwirkungen findet seit Mitte der 2000er Jahre größere Beachtung im wissenschaftlichen Diskurs. So wurden erste Arbeiten zum Thema bereits im Jahr 2000 [81] und vermehrt dann ab 2005 publiziert (z. B. [82], [83]). Seither wurden zumindest 15 Dissertationen bzw. vergleichbare Arbeiten fertiggestellt [23], [84]–[97], die diese Art von Simulation nutzen oder thematisieren, und noch deutlich mehr wissenschaftliche Beiträge in Zeitschriften, bei Konferenzen usw. veröffentlicht.

Aufgrund dieses beachtlichen Interesses ist es naheliegend, dass bereits erste **Literaturanalysen** zum Stand von Wissenschaft und Technik in diesem Bereich angefertigt wurden. Zumindest neun Arbeiten mit unterschiedlichem Untersuchungsfokus und -vorgehen konnten hierzu identifiziert werden [23], [98]–[105]. Weniger formell bzw. weniger konkret auf diese spezielle Simulationsanwendung fokussierend finden sich z. T. auch in den anderen referenzierten Dissertationen derartige Literaturübersichten. Mit Blick auf die Problemstellung der vorliegenden Arbeit und bereits existierenden Veröffentlichungen wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung aller identifizierten Arbeiten verzichtet. Vielmehr wird im Folgenden ein Überblick zu dieser Art von Simulation gegeben, wobei Literaturbelege lediglich exemplarisch und ohne Anspruch auf Vollständigkeit angegeben sind.

Die Erweiterung der Materialflusssimulation um die Betrachtung von Energieflüssen oder anderen Umweltwirkungen erfolgt aus verschiedenen Gründen. Dabei lässt sich grob in solche Arbeiten unterteilen, die energiebezogene Kenngrößen lediglich als **Ergebnisdaten** generieren (z. B. [106]), und solche, in denen ebendiese als **Simulationsdaten** den Verlauf der Simulation beeinflussen (z. B. [84]). Bei ersterem Ansatz wird also lediglich eine weitere Kennzahl zur Bewertung des Systemverhaltens ermittelt. Dem entgegen bezieht letzterer Ansatz das dynamische Verhalten der Energieflusssysteme direkt mit ein.

Welche **Kennzahlen** dabei im Einzelnen berücksichtigt werden, ist vor allem abhängig von der Fragestellung der Simulationsstudie. In der Literatur finden sich Beispiele, welche sich den nachstehenden Kategorien zuordnen lassen[9]:

- Wertschöpfungsanteil beim Energieverbrauch, z. B. [107]
- Absoluter oder anteiliger Energieverbrauch einzelner Produkte, Varianten oder Transporteinheiten, z. B. [108]
- Absoluter oder anteiliger Energieverbrauch von Maschinen, Anlagen, Teilsystemen oder Systemen über die Zeit, z. B. [90]
- Energieverbrauch nach Anlagenzuständen, z. B. [109]
- Emissionen, Umweltwirkungen bzw. Ökobilanz (insbesondere in Form von LCA) o. ä., z. B. [110]
- Abgeleitete Leistungskennzahlen von Maschinen, Anlagen, Teilsystemen oder Systemen (Spitzenlast o. ä.), z. B. [85]
- Energiekosten (je Zeiteinheit, Bauteil, Energieart o. ä.), z. B. [111]

Abhängig davon, ob lediglich Ergebnisdaten generiert oder energiebezogene Größen als Simulationsdaten Beachtung finden, bestehen unterschiedliche Anforderungen an den Aufbau der Simulationsumgebung. Bislang, so stellt Thiede [23] fest, wurden vor allem drei Paradigmen für die **Werkzeugarchitektur** realisiert (vgl. Abbildung 2.12):

- Paradigma A: Simulation mit kommerziellen Werkzeugen, die keine Energiebetrachtung erlauben; Export der relevanten Ergebnisdaten für nachgelagerte Auswertungslösung, welche dann die energiebezogenen Kennzahlen berechnet [23, S. 84] (z. B. [106])
- Paradigma B: Simulation unterschiedlicher Aspekte (Flusssysteme) in unterschiedlichen Werkzeugen, welche miteinander gekoppelt werden und Informationen miteinander austauschen, um Simulation des Gesamtsystems zu ermöglichen [23, S. 84] (z. B. [112])

9 Diese Kategorisierung wurde in der ASIM (Arbeitsgemeinschaft Simulation) Arbeitsgruppe „Betrachtung energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik“ entwickelt (vgl. [103]).

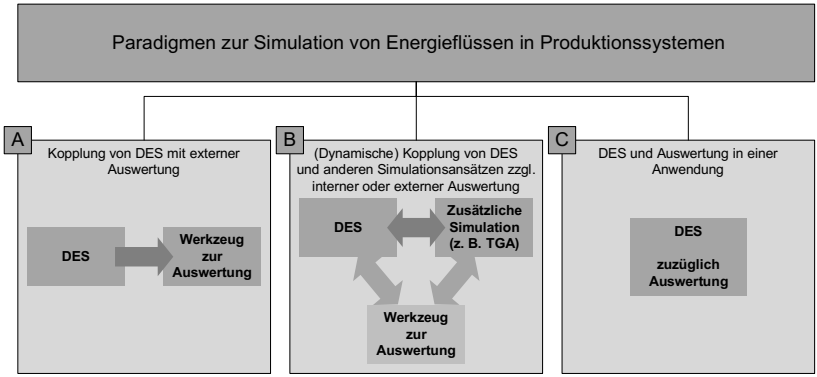


Abbildung 2.12: Paradigmen zur Simulation von Energieflüssen in Produktionssystemen mittels DES nach [23, S. 85]

- Paradigma C: Unmittelbare Erweiterung eines bestehenden Simulationswerkzeugs, damit energiebezogene Simulations- und Ergebnisdaten generiert und genutzt werden können [23, S. 85] (z. B. [113])

Unterschiedliche Architekturansätze haben u. a. Auswirkungen auf den Aufwand bei der Simulationserstellung und das Laufzeitverhalten der Simulation (z. B. das von Junge genutzte Paradigma B – vgl. [84] – sorgt für eine quasi zeitdiskrete Simulation [16, S. 122]). Zugleich bedingen die verschiedenen Ansätze aber auch unterschiedliche Genauigkeiten in der Abbildung, da beispielsweise kontinuierliche Energieflüsse bei der Modellierung in einem gesonderten Werkzeug nicht notwendigerweise diskretisiert werden müssen.

Krückhans und Meier zeigen, wie die Energieflüsse einzelner Systemelemente in unterschiedlicher Granularität, d. h. mit unterschiedlichen Energieabbildungsfunktionen oder **Energiemodellen**, abgebildet werden können und welche Daten dafür notwendig sind (vgl. Abbildung 2.13). Dabei differenzieren sie in einen detaillierten Verbrauchsverlauf, einen kumulierten Verbrauch während kürzerer Zeitintervalle und einen gemittelten Verbrauch über einen ganzen Zyklus hinweg. Die Autoren stellen hierbei fest, dass bei höherer Genauigkeit die Simulationsgeschwindigkeit niedriger sowie der Erhebungsaufwand größer sind und vice versa. [114].

Diese Feststellung beschreibt ein grundsätzliches Problem in der Simulationstechnik und bei der um energetischen Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation im Speziellen. Die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 merkt dazu an: „Die Abbildungsgenauigkeit ist nicht so detailliert wie möglich, sondern so

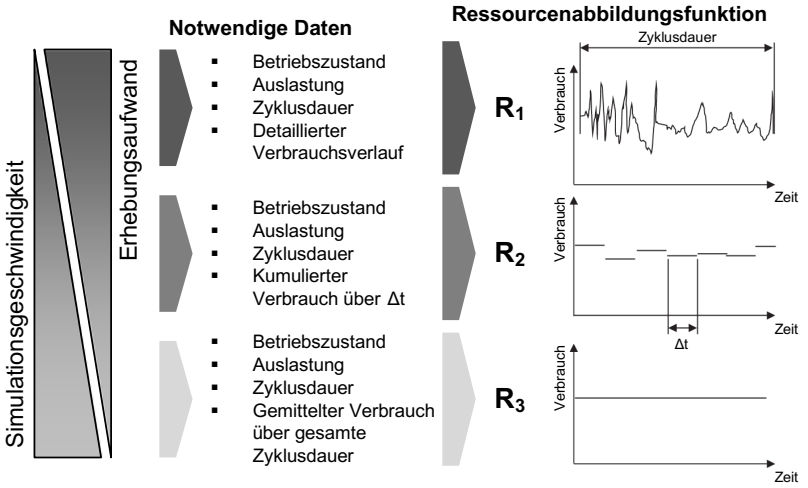


Abbildung 2.13: Notwendige Daten, Simulationsgeschwindigkeit und Erhebungsaufwand unterschiedlicher Energieabbildungsfunktionen [114]

detailliert wie zur Zielerfüllung erforderlich“ [19, S. 6]. Folglich ist mit Bedacht auf **Aufwand und Nutzen** stets zu prüfen, wie die einzelnen Flusssysteme modelliert werden sollten.

Die bislang publizierten Arbeiten zeigen weiterhin, dass die um energetische Betrachtungen erweiterte Simulation in diversen Industriezweigen eingesetzt wird. So lassen sich Anwendungsbeispiele aus den **Branchen**[10] Automobilbau [106], Berg-/Tagebau [115], chemische Industrie [116], Elektronik-/Energietechnikproduktion [113], Entsorgung und Recycling [117], Glas- und Keramikindustrie [118], Halbleiterfertigung [119], Handel [120], Hoch-/Tiefbau [121], Holzindustrie [122], Logistik [123], Konsumgüterindustrie [100], Kosmetik- und Pharmaindustrie [100], kunststoffverarbeitende Industrie [84], Lebensmittelindustrie [124], Maschinen- und Anlagenbau/Werkzeugbau [125], Medizintechnik [126], Metallbearbeitung und -erzeugung [23, S. 145 ff.], Stahl-/Metallbau [100] Schiffbau/Bootsbau u. ä. [127], Textilindustrie [85] sowie Verkehrslogistik-/Verkehrsinfrastrukturplanung finden.

10 Diese Auflistung wurden in der ASIM Arbeitsgruppe „Betrachtung energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik“ entwickelt, in [103] weitgehend publiziert und hier um beispielhafte Zitierungen ergänzt.

Diese Fülle belegt, wie vielseitig die um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation einsetzbar ist. Zugleich dokumentieren einige Arbeiten, dass sich einzelne **Simulationslösungen** auch in (sehr) unterschiedlichen Anwendungsfällen nutzen lassen (vgl. [23, S. 145 ff.], [100] sowie eniBRIC in [115] und [128]).

Die vorangehenden Ausführungen unterstreichen die Relevanz der Materialflusssimulation mit integrierter Betrachtung von Energie oder anderen Umweltwirkungen. Sie wird auf sehr unterschiedliche Weise sowie in sehr unterschiedlichen Anwendungsfällen eingesetzt. Dies suggeriert eine grundsätzliche Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Anwendungen bzw. Übertragbarkeit der zugrundeliegenden Softwarelösungen. Um die Diversität von derartigen Simulationsstudien weiter zu konkretisieren, wurde eine systematische Literaturanalyse durchgeführt, welche im folgenden Abschnitt näher erörtert wird.

2.3.3 Systematische Literaturanalyse zur Simulation mit Energiebetrachtung

Obwohl Simulation in vielen Unternehmen Anwendung findet, werden nur verhältnismäßig wenige und zumeist im Rahmen von Forschungskooperationen durchgeführte Simulationsprojekte auch publiziert. Dennoch existiert eine größere Zahl dokumentierter Untersuchungen, welche für eine Analyse ausgewählter Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien herangezogen werden können. Im Folgenden wird zunächst auf das methodische Vorgehen dazu eingegangen, bevor die Ergebnisse dargestellt werden.

Systematische Literaturanalysen sind in anderen Wissenschaftszweigen, insbesondere in der Medizin- und Gesundheitsforschung, eine wichtige Forschungsmethode. Dabei wird in eine Vielzahl verschiedener Vorgehensweisen (Arten von „Reviews“) unterteilt, welche sich hinsichtlich ihrer Durchführung und Zielstellung unterscheiden [129, S. 209]. Das in dieser Arbeit eingesetzte Vorgehen folgt aus der im Weiteren formulierten Fragestellung und lässt sich als „Scoping Review“ (vgl. [129, S. 209 f.]) bzw. „Metaempirisches Review“ (vgl. [129, S. 211 f.]) einordnen.

Das allgemeine **Vorgehen für systematische Literaturanalyse** umfasst nach Sturma et al. die fünf nachfolgenden Schritte [129, S. 212 ff.]. Eingangs ist eine geeignete Problem- und Fragestellung zu identifizieren und zu formulieren. Schritt 2 dient der Identifikation potentiell relevanter Literatur mittels einer umfassenden Literaturrecherche. An diese anschließend ist tatsächlich relevante Literatur auszuwählen und kritisch zu bewerten. In Schritt 4 ist die Literatur darzustellen, zu analysieren und zusammenzufassen. Abschließend erfolgt die Ergebnisinterpretation und -präsentation.

Die vordringliche **Fragestellung** der durchgeführten und im Weiteren vorgestellten systematischen Literaturanalyse lautet: Wie unterschiedlich stellen sich Anwendungen von um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation bislang dar? Eine jede dokumentierte Simulationsstudie weist eine anwendungsspezifische Ausprägung bezüglich diverser Aspekte auf. Während der Konkretisierung der Fragestellung wurden zur Eingrenzung letztgenannter sechs Kategorien bestimmt, die einerseits einen initialen Eindruck zur Ausprägung bieten und andererseits auch in zuvor bekannten Quellen dokumentiert waren. Für jede Kategorie wurden in einer vorbereitenden Recherche zunächst relevante Ausprägungen bestimmt und festgelegt. Diese wurden im Verlauf der systematischen Literaturanalyse auf ihre Vollständigkeit und Auftretenshäufigkeit hin untersucht; Ergänzungen wurden bei Bedarf vorgenommen.

Die **Kategorien** beziehen sich auf einzelne Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien, aber auch auf allgemeine Untersuchungsziele. In die Analyse einbezogen wurden:

- *Simulationsziel:* Welches grundsätzliche Ziel wurde mit dem Einsatz von Simulation verfolgt?
- *Planungsaufgabe:* Welche fabrikplanerische Aufgabe war zu lösen?
- *Werkzeug:* Welche Simulationsmethode bzw. welche Art von Simulationssoftware wurde eingesetzt?
- *Experimentplanung:* Welche methodischen Ansätze wurden zum Entwurf der Experimentpläne eingesetzt?
- *Betrachtete Größe:* Welche Kenngrößen mit Bezug auf Energie oder Umweltauswirkungen wurden mittels Simulation ermittelt oder in dieser betrachtet?
- *Energiemodell:* Welches Modell zur Abbildung bzw. Diskretisierung des Energieflusses wurde eingesetzt?

Als Konkretisierung der Simulationsanwendung wird für die systematische Literaturanalyse das Konstrukt der **Einzeluntersuchung** eingeführt. Dieses meint die Anwendung der Simulation zur Beantwortung einer einzigen Fragestellung. Diese Betrachtungsweise ist nicht üblich, da Simulationsstudien zumeist mehrere Fragestellungen beinhalten und die wiederholte Verwendung eines Simulationsmodells auch ein wichtiges Kriterium zur Bestimmung der grundsätzlichen Simulationswürdigkeit darstellt (vgl. [74, S. 20]). Die Reduktion auf Einzeluntersuchungen wurde in der Durchführung dennoch vorgenommen, um den Untersuchungsfokus und -ansatz je nach Einzelfrage zu differenzieren. Entsprechend wurden einbezogene Arbeiten und Publikationen zum Zwecke der Analyse „zergliedert“.

Die eigentliche **Literaturrecherche** erfolgte durch gezielte Datenbanksuchen sowie die Sichtung von relevanten Tagungsbänden (insbesondere, aber nicht ausschließlich im Umfeld der Internationalen Akademie der Produktionswissenschaften CIRP) und Literaturverzeichnissen anderer bereits identifizierter Publikationen. Auf diese Weise wurden über 200 potenziell relevante Veröffentlichungen zwischen 2000 und 2017 identifiziert, die sich mit der Simulation von Material- und Energieflüssen beschäftigen. Während der **Selektion und Bewertung** dieser wurden alle dokumentierten Einzeluntersuchungen hinsichtlich ihrer Einzigartigkeit geprüft und ihre Ausprägungen hinsichtlich o. g. Kategorien analysiert. Wiederholte Veröffentlichungen von Einzeluntersuchungen wurden somit gefiltert. Im Ergebnis wurden 197 Einzeluntersuchungen aus 128 Veröffentlichungen einbezogen.

Im Folgenden sind die jeweiligen Ausprägungen der o. g. Kategorien und die Ergebnisse der Literaturanalyse überblicksweise zusammengestellt. Dabei ist an dieser Stelle nicht für jede Ausprägung angeführt, welche Veröffentlichungen bzw. Einzeluntersuchungen dazu identifiziert wurden. Diese detaillierten Ergebnisse sowie die ermittelten Häufigkeiten je Ausprägung finden sich in Anhang A. Angeführte Quellenangaben dienen folglich als exemplarische Belege. Die Anzahl der je Ausprägung identifizierten Arbeiten ist in Abbildung 2.14 bis Abbildung 2.19 jeweils an den entsprechenden Bereich angetragen.

Die Analyse anhand der ersten Kategorie **Simulationsziel** soll Aufschluss geben, welche grundlegende Intention hinter bisherigen Simulationsanwendungen stand. Dazu wurden die in Tabelle 2.5 gezeigten Ausprägungen erfasst.

Tabelle 2.5: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie Simulationsziel

Ausprägung	Erläuterung mit beispielhafter Quellenangabe
Optimierung	Suche nach einer (in Näherung) mathematisch optimalen Lösung für eine Planungsaufgabe [84, S. 92 ff.]
Quantifizierung	Quantifizierung energiebezogener Kennzahlen zur Unterstützung des Planungsprozesses [93, S. 119 ff.]
Verifikation bzw. Validierung	Verifikation bzw. Validierung von energieorientierter Planungslösungen über Ersatzgrößen (z. B. Zeitanteile von Betriebszuständen) [109]

Es zeigt sich, dass die Quantifizierung energiebezogener Kennzahlen ein Hauptanliegen war (vgl. Abbildung 2.14). Weiterhin ist festzustellen, dass zu etwa gleichen Teilen auch versucht wurde, eine tatsächlich optimale Lösung zu finden bzw. eine Planungslösung qualitativ zu bestätigen. Daraus kann geschlossen werden, dass eine exakte oder näherungsweise Bestimmung der

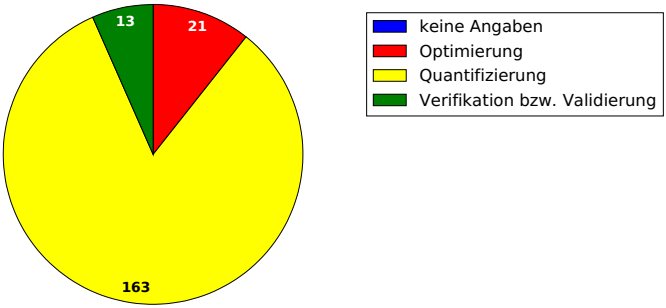


Abbildung 2.14: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie Simulationsziel

erwarteten energetischen Konsequenzen nicht in jedem Falle Anspruch in den hier betrachteten Simulationsanwendungen ist. Weiterhin ist festzustellen, dass Optimierung ein im Weiteren zu beachtender Untersuchungsansatz ist.

Die Fülle der in Abschnitt 2.3.2 angeführten Branchen, in denen die um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation bislang Anwendung fand, legt nahe, dass auch sehr unterschiedliche **Planungsaufgaben** bearbeitet wurden. Dazu konnten zunächst drei Hauptgruppen identifiziert werden: die Produktionssystemplanung (SysPla), das Supply Chain Management (SCM) und die Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Die beiden Erstgenannten lassen sich weiter differenzieren, sodass letztlich die in Tabelle 2.6 angeführten Ausprägungen analysiert wurden.

Tabelle 2.6: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie Planungsaufgabe

Ausprägung	Erläuterung mit beispielhafter Quellenangabe
PPS: Kapazitätsplanung	Planung von Produktionskapazitäten zur Beeinflussung des Energieverbrauchs (z. B. mittels Schichtplanung) [100]
PPS: Losgrößenplanung	Untersuchung energieeffizienter Losgrößen [23, S. 145 ff.]
PPS: Reihenfolge-planung/Terminierung	Erstellung oder Bewertung von energieorientierten Produktionsplänen [88, S. 101 ff.]
PPS: Steuerungs-strategie	Untersuchung energieorientierter Strategien zur Beeinflussung des Materialflusses bzw. Produktionsbetriebs [90]
Supply Chain Management	Untersuchung von Ansätzen zum energieorientierten Supply Chain Management [127]
SysPla: Betriebs-optimierung	Verbesserung des Betriebsverhaltens durch Maßnahmen, welche unmittelbar auf das Maschinen-/Anlagenverhalten wirken [94, S. 103 ff.]

Tabelle 2.6: (Fortsetzung)

Ausprägung	Erläuterung mit beispielhafter Quellenangabe
SysPla: Infrastruktur-planung	(Um-)Gestaltung bzw. Betrieb von Energie- und Medien-versorgung (Infrastruktur) [23, S. 153 ff.]
SysPla: Prozess-/ Systemgestaltung	Energieorientierte Auswahl, Dimensionierung und Struktu-rierung von Prozessen und Materialflusssystemen [100]
SysPla: Umwelt-wirkung/TCO	Evaluation der Umweltwirkung direkt oder über Kosten (z. B. TCO[11]) zur Systemanalyse oder -planung [87]

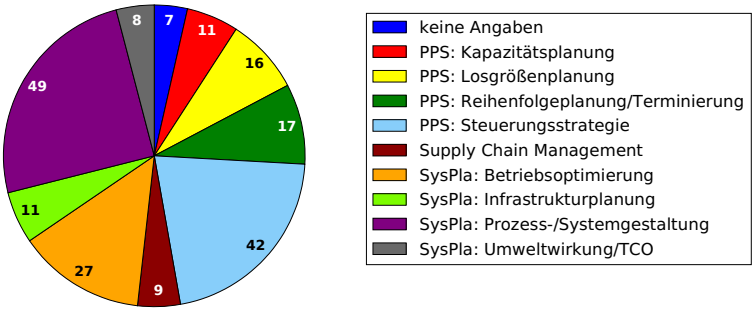


Abbildung 2.15: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie Planungsaufgabe

Der Analyse zufolge wurden Fragestellungen im Bereich des Supply Chain Managements seltener untersucht. Der Fokus lag deutlich auf der Planung der Flusssysteme einer Fabrik bzw. auf dem Fabrikbetrieb (PPS-orientierte Ansätze). Die meisten Einzeluntersuchungen weist die Gruppe der System-planung auf (vgl. Abbildung 2.15). Es ist zudem ersichtlich, dass die Mehrzahl der Untersuchungen zwischen den Strukturebenen Maschine und Gebäude angesiedelt waren (vgl. Abbildung 2.10). Die unmittelbare Betrachtung von Infrastrukturanlagen war nur selten zur Bearbeitung der Planungsaufgabe notwendig, wie sich auch an der niedrigen Anzahl von Einzeluntersuchungen zur Infrastrukturplanung zeigt. Insgesamt stellt sich die Verteilung der einzelnen Ausprägung eher heterogen dar.

Aus der zu bearbeitenden Planungsaufgabe heraus ergeben sich mitunter sehr unterschiedliche Anforderungen an die einzusetzende Simulationssoft-ware. Die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 gibt Hilfestellung für die Auswahl eines geeigneten Simulationswerkzeugs (vgl. [130]). Zugleich zeigen die von Thiede identifizierten Paradigmen für die Simulation von Energieflüssen in Produk-tionssystemen (vgl. Abbildung 2.12), dass auch eine gewisse Diversität in der

11 aus dem Englischen: Total Cost of Ownership (Lebenszykluskosten)

grundsätzlichen Simulationsinfrastruktur existiert. Die Kategorie **Werkzeug** hat daher die Erfassung der grundlegenden Softwarearten bzw. -architekturen zum Ziel, welche bislang Anwendung fanden. Dabei wurde nur nach der Simulationsmethode differenziert (vgl. Tabelle 2.7), um insbesondere die Bedeutung nicht ereignisdiskreter Simulation abzuschätzen.

Tabelle 2.7: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie Werkzeug

Ausprägung	Erläuterung mit beispielhafter Quellenangabe
Andere Simulationswerkzeuge	Nutzung (ausschließlich) nicht ereignisdiskreter Simulationswerkzeuge [127]
Materialflusssimulation	Einsatz vornehmlich materialflussorientierter ereignisdiskreter Simulationswerkzeuge [85, S. 101 ff.]
Kombinierte Simulation	Verwendung mehrerer unterschiedlicher Simulationswerkzeuge nach Paradigma B (vgl. Abbildung 2.12) [84, S. 94 ff.]

Die Ergebnisse der Literaturanalyse (vgl. Abbildung 2.16) zeigen, dass der Einsatz von – auf verschiedene Arten erweiterte – Materialflusssimulation den größten Anteil ausmacht. Mit nur etwa einem Fünftel so vielen Einzeluntersuchungen ist die kombinierte Simulation der zweitbedeutendste Lösungsansatz in bestehenden Arbeiten. Der Einsatz von ausschließlich anderen Simulationswerkzeugen stellt eher die Ausnahme dar. Aus diesen Erkenntnissen kann abgeleitet werden, dass eine Methodik zum effizienten Einsatz der um energetische Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation sich weitgehend auf die ereignisdiskrete Simulation konzentrieren sollte.

Für die effiziente Durchführung von Simulationsstudien stellt die **Experimentplanung** eine zentrale Herausforderung dar. Sie bestimmt, wie groß der Aufwand in der Nutzung des Modells ist und welche Handlungsalternativen untersucht werden. Nach VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 findet zumeist „ein systematisches Probieren [Anwendung], bei dem sich das folgende Simulationsexperiment erst aus den Simulationsergebnisdaten vorangegangener Experimente ergibt“ [19, S. 36]. Dieses Vorgehen kann auch als Szenarioanalyse verstanden werden. Zugleich wird dort auf die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 3 [20] verwiesen, welche Methoden zur statistischen Experimentplanung erörtert. Um einen Eindruck über die in den Einzeluntersuchungen angewandten methodischen Ansätze zur Ableitung der Experimente zu gewinnen, wurden die in Tabelle 2.8 aufgeführten Ausprägungen identifiziert. Diese sind vornehmlich aus den voranstehend genannten Quellen abgeleitet.

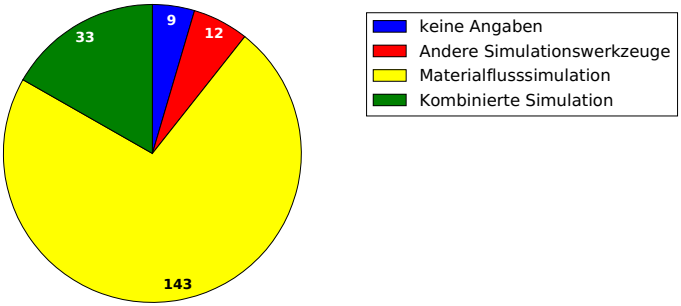


Abbildung 2.16: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie Werkzeug

Tabelle 2.8: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie Experimentplanung

Ausprägung	Erläuterung mit beispielhafter Quellenangabe
Optimierung	Optimierungsalgorithmus bestimmt Experimentplan bzw. beeinflusst singuläres Experiment (vgl. [21]) [84, S. 92 ff.]
Sensitivitätsanalyse	Variation einzelner Faktoren zur Bestimmung des jeweiligen Einflusses [87]
Shainin-/Taguchi-Methode	In VDI-Richtlinie 3633 Blatt 3 [20] erwähnte spezielle Methoden der statistischen Experimentplanung (keine Anwendung bekannt)
Statistische Versuchsplanung[12]	Methode zur Erstellung und Auswertung möglichst kleiner Experimentpläne mittels statistischer Methoden (vgl. [131]) [132]
Szenarioanalyse	Definition von Experimenten auf Grundlage von Vorschlägen des Planers („Was-Wäre-Wenn-Experimente“) [88, S. 101 ff.]
Teil-/Faktorielle Methode	Gleichzeitige Variation aller Parameter zur Untersuchung von Wechselwirkungen (teilweise oder vollständige Kombinationsmöglichkeiten) [133]

Bezeichnend ist, dass mehr als die Hälfte aller Einzeluntersuchungen Szenarioanalysen nutzten (vgl. Abbildung 2.17), also einen erfahrungsorientierten Ansatz verfolgen. Zugleich stellen Formen des „systematischen Probierens“ (Faktorielle Methode, Optimierung und Sensitivitätsanalyse) die am häufigsten genutzten Alternativen dar. Andere Methoden der statistischen Versuchsplanung mittels optimierter Experimentpläne fanden fast keine Anwendung.

12 Mitunter auch aus dem Englischen als Design of Experiments (DoE) bezeichnet.

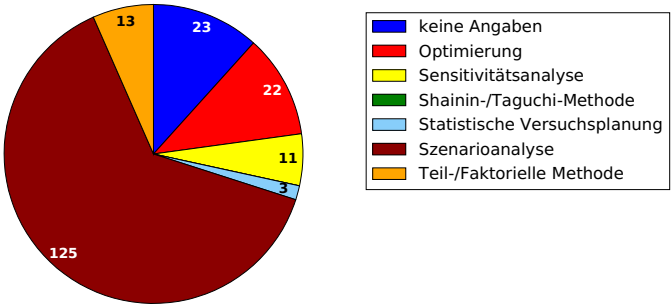


Abbildung 2.17: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie Experimentplanung

Worin dies begründet ist, kann auf Grundlage der durchgeführten Literaturanalyse nicht zweifelsfrei geklärt werden. Gleichwohl liegt der Verdacht nahe, dass durch eine gezieltere methodische Unterstützung die Auswahl des am besten geeigneten Ansatzes zur Experimentplanung befördert werden kann.

Die **betrachteten energiebezogenen Größen** stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der zugrundeliegenden Planungsaufgabe und der Art des verwendeten Simulationswerkzeugs. Tabelle 2.9 zeigt, welche Ausprägungen in Bezug auf diese Kategorie in den Einzeluntersuchungen identifiziert werden konnten.

Tabelle 2.9: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie betrachtete Größen

Ausprägung	Erläuterung mit beispielhafter Quellenangabe
CO_2- oder anderes Äquivalent für Umweltwirkungen	Äquivalent für Umweltwirkungen auf Grundlage von Kohlenstoffdioxid-(CO_2-)Emissionen, Öko-Indikator-Punkten o. ä. [87]
Elektrizität bzw. nur ein Energieträger	Lediglich Simulation von Elektrizitätsflüssen oder eines alternativen Energieflusses (z. B. Kühlwasser) [88, S. 101 ff.]
Gesamtenergie bzw. Energieäquivalent	Rechnerische Aggregation unterschiedlicher Energieträger bzw. Äquivalent als Ersatzgröße für simulierte Energieflüsse (z. B. Primärenergie) [108]
Kosten	Kostenmäßige Bewertung von Energieverbrauch [111]
Mehrere Energieträger parallel	Zeitgleiche Simulation mehrerer Energieflüsse [23, S. 102 ff.]

Den größten Anteil macht der Einbezug von einem oder mehreren Energieträgern aus (vgl. Abbildung 2.18). Elektrizität nimmt dabei eine Sonderrolle ein, da die Mehrzahl der Einzeluntersuchungen diesen speziellen Energieträger

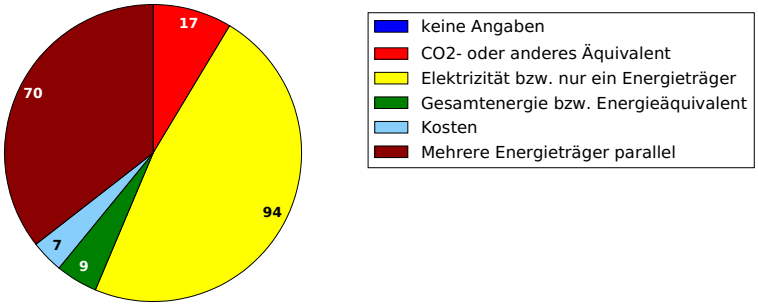


Abbildung 2.18: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie betrachtete Größen

einbezog. Diese explizite Abbildung von Energieströmen steht einer indirekten Betrachtung von Umweltwirkungen in Form von Emissions-, Kosten- oder Energieäquivalenten gegenüber. Letztere machen jedoch nur einen kleinen Anteil der identifizierten Einzeluntersuchungen aus. Es wird daher gefolgert, dass die reine Modellierung von Umweltwirkungen für die meisten mit Simulation bearbeiteten Fragestellungen nur eine untergeordnete Bedeutung hat. Zugleich ist zu konstatieren, dass die Abbildung eines einzigen oder mehrerer Energieträger eine vergleichbare Bedeutung hat und stets für jede Untersuchung zu klären ist, welche Energieversorgungssysteme zu modellieren sind.

Ein zentraler Unterschied zwischen bekannten Simulationsstudien besteht bei der Modellierung von Energieverbräuchen. Wie bereits gezeigt, stellt die ereignisdiskrete Simulation das am häufigsten genutzte Werkzeug dar, verfügt zugleich aber – entgegen realer Energieflüsse – nicht über ein kontinuierliches Verhalten. Folglich muss für die Abbildung von Energieflüssen stets eine Modellbildung zur Diskretisierung erfolgen (**Energiemodell**). In den Einzeluntersuchungen haben sich dabei die in Tabelle 2.10 aufgeführten Ansätze als relevant herausgestellt.

Tabelle 2.10: Ausprägungen von Einzeluntersuchungen in der Kategorie Energiemodell

Ausprägung	Erläuterung mit beispielhafter Quellenangabe
Äquivalent	Auf Zeit (z. B. in $kJ_{Primärenergie}/h$), Entfernung (z. B. in kg_{CO2}/km) o. ä. bezogenes Äquivalent für Energieverbrauch bzw. Umweltwirkungen [127]
Betriebszustand-basiert Durchschnitt	Durchschnittsverbrauch für Betriebszustände [23, S. 102 ff.]
Betriebszustand-basiert Leistungsverlauf	Linearisierter bzw. diskretisierter Leistungsverlauf in Betriebszuständen [84, S. 75]

Tabelle 2.10: (Fortsetzung)

Ausprägung	Erläuterung mit beispielhafter Quellenangabe
Betriebszustand-basiert Ersatzmodell	Approximierendes mathematisches Ersatzmodell für diskretisierten Leistungsverlauf in Betriebszuständen [134]
Kontinuierliches/ physikalisches Modell	Kontinuierliche Simulation mittels physikalischem oder empirisch ermitteltem Modell des Leistungsverlaufs [112]
Rein Betriebszustände	Ausschließliche Betrachtung von Zeitanteilen von Betriebszuständen als Indikator für Energieverbrauch [109]

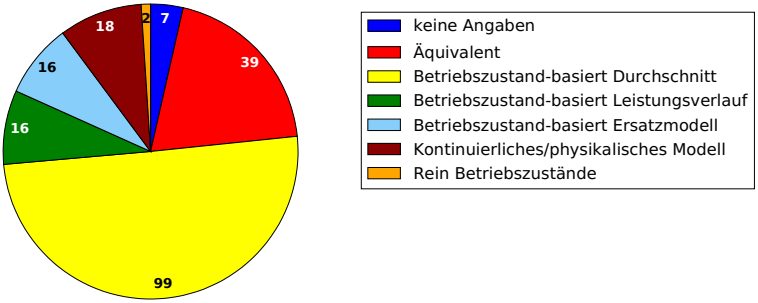


Abbildung 2.19: Ergebnisse der Literaturanalyse für Kategorie Energiemodell

Diese Aufgliederung sowie die in Abbildung 2.19 gezeigten Häufigkeiten lassen die große Bedeutung Betriebszustand-basierter Ansätze erkennen. Die Nutzung von energiebezogenen Betriebszuständen stellt somit einen etablierten Konsens für die Modellierung von Energieflüssen in der Materialflusssimulation dar. Die Untersuchung von Wirkungen (s. o.) wird auch unter alleiniger Nutzung von Äquivalenten möglich. Komplexere physikalische Prozesse lassen sich unter Nutzung kombinierter Simulationsansätze (vgl. Tabelle 2.7) realitätsnah abbilden. Für eine geringe Zahl von Problemen genügte auch die ausschließliche Betrachtung von Betriebszuständen als Ersatzgröße, um z. B. die Wirksamkeit einer Effizienzmaßnahme zu untersuchen (vgl. „Verifikation bzw. Validierung“ in Tabelle 2.5). Welches Energiemodell schlussendlich am geeignetsten ist, muss spezifisch für jedes Planungsproblem unter Abwägung von Aufwand und Nutzen entschieden werden.

Die vorliegende Literaturanalyse zeigt, dass durchaus substanzielle Unterschiede in der Anwendung von um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulationen bestehen. Anhand der Häufigkeiten, mit der einzelne Ausprägungen der sechs untersuchten Kategorien in bisherigen Arbeiten auftraten, können erste Erkenntnisse abgeleitet werden, die für die Konzeptionierung einer Methodik zum effizienten Einsatz von um energetische

Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation heranzuziehen sind. Aufgrund der großen Datenbasis ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse repräsentativ für derartige Simulationsstudien sowie belastbar sind. Hervorzuheben ist dabei die Analyse zur Kategorie Planungsaufgabe. Diese zeigt, dass Simulation gleichsam zur Untersuchung von Änderungen in der Struktur der Flusssysteme (inklusive der Abläufe innerhalb einzelner Elemente) sowie in den elementübergreifenden Abläufe innerhalb von Flusssystemen genutzt wird. Die Heterogenität der dokumentierten Planungsprobleme legt die Frage nahe, wie der Planer zu effektiven Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz kommt und inwieweit diese alle weiteren Gestaltungsaspekte einer Simulationsstudie beeinflussen.

2.4 Vorgehensmodelle zur Durchführung von Simulationsstudien

Im vorangehenden Abschnitt wurde bereits auf die Vielfältigkeit im Einsatz von um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation eingegangen. In der Vergangenheit wurden bereits unterschiedliche Vorgehensmodelle entwickelt, um die Effizienz in der Durchführung von Simulationsstudien sicherzustellen. Dies ist u. a. auf eine einleitende Bemerkung der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 zurückzuführen. Dort heißt es, „die Effizienz der Simulationsstudie [leidet] erfahrungsgemäß häufig unter Missverständnissen, unterschiedlichem Know-how und verschiedenartigen Interessen“ [19, S. 3]. Vorgehensmodelle sind geeignet dies zu verbessern, indem sie den Beteiligten ein gemeinsames Verständnis ermöglichen und Ausgangspunkt für eine reproduzierbare Bearbeitung sein können.

Konkreter auf die um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation bezogen, argumentiert Thiede, dass eine jede Simulationslösung um ein geeignetes Vorgehensmodell ergänzt sein sollte, damit die korrekte und zielorientierte Anwendung gesichert wird [23, S. 55]. Dem folgend bezieht seine Literaturanalyse [23, S. 51 ff.], ebenso wie die von Sproedt et al. [100], ein entsprechendes Bewertungskriterium für andere Arbeiten mit ein. Beide kommen zu dem Ergebnis, dass nur ausgewählte Simulationsansätze überhaupt um methodische Unterstützung ergänzt wurden. Andersson et al. [98] kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass ein standardisiertes Vorgehen notwendig ist, welches auf Grundlage der bislang bekannten Fallstudien entwickelt werden kann.

Eine Kernthese der vorliegenden Arbeit ist, dass bislang keine ausreichende Unterstützung zur Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien existiert. Um diese Annahme genauer zu untersuchen, wurden

Vorgehensmodelle für die Durchführung von Simulationsstudien recherchiert und geprüft. Im Folgenden werden acht Arbeiten vorgestellt, welche sich auf Materialflusssimulation mit und ohne Einbezug von Energieflüssen beziehen. Unbeachtet blieben dabei Ansätze, die auf andere Simulationsmethoden fokussieren (z. B. [135]) oder vorrangig auf die Bewertung einzelner Maschinen bzw. Anlagen abzielen (z. B. [91]).

Die Analyse der im Weiteren diskutierten Vorgehensmodelle erfolgt unter Beachtung von Kriterien hinsichtlich des Einbezugs von energetischen Betrachtungen, Gestaltungsaspekten, Entscheidungskriterien, Lösungsvarianten, Umwelteinflüssen und Entscheidungsverfahren in das jeweilige Vorgehensmodell. Zudem wird die Übertragbarkeit auf alternative Softwarelösungen bzw. Modellierungsansätze der Vorgehensmodelle untersucht. Anhang B enthält eine überblicksweise Darstellung dieser Kriterien. Am Ende dieses Abschnitts erfolgt zudem eine zusammenfassende Diskussion der analysierten Arbeiten.

2.4.1 Vorgehen nach VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1

Die VDI-Richtlinienreihe 3633 behandelt bereits seit den 1980er Jahren[13] Fragestellungen der Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Insbesondere im deutschsprachigen Bereich fassen die darin enthaltenen Richtlinien den gemeinhin akzeptierten Stand der Technik zusammen. Dies rührt nicht zuletzt aus der engen Verbindung des verantwortlichen VDI-Fachausschusses mit der ASIM[14] Fachgruppe Simulation in Produktion und Logistik (SPL), dem größten akademisch-industriellen Gremium für diese Thematik in Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Das in der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 vorgeschlagene Vorgehensmodell für Simulationsstudien wurde in den vergangenen Jahren kontinuierlich weiterentwickelt. So beziehen sich etwa die im Weiteren noch diskutierten Arbeiten von Khalaf [90, S. 70 f.] und Thiede [23, S. 130 f.] noch auf eine mittlerweile ersetzte Ausgabe der Richtlinie, welche ein rein sequentielles, iteratives Vorgehen vorschlug. Mit der aktuellen Ausgabe von 2014 wurde ein weiter parallelisierter Ansatz von Rabe et al. (vgl. [138, S. 4 ff.]) adaptiert bzw. übernommen [19, S. 18 ff.]. Dieser sieht zum einen die durchgängige Verifikation und Validierung aller Teilergebnisse vor. Zum anderen etabliert er eine Gleichzeitigkeit bei der Entwicklung des eigentlichen Simulationsmodells (Modellierung) und der Datenbeschaffung sowie -aufbereitung (vgl. Abbildung 2.20).

13 VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 wurde 1981 erstmals als VDI-Richtlinie 3633 veröffentlicht [136] und löste damit die zuvor seit 1971 geltende VDI 2696 ab [137].

14 Arbeitsgemeinschaft Simulation, Fachausschuss 4.5 der Gesellschaft für Informatik (GI)

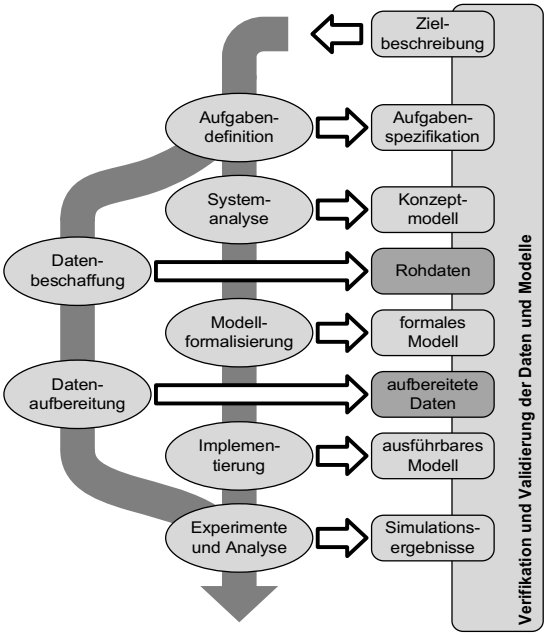


Abbildung 2.20: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie nach [19, S. 19]

In der Richtlinie werden die Schritte des Vorgehensmodells einzeln, zum Teil aber auch zusammenhängend, erläutert. Dabei beschränken sich die Ausführungen auf das prinzipielle Vorgehen sowie ausgewählte Paradigmen für die Bearbeitung ausgewählter Teilaufgaben (z. B. Vorgehen in der Systemanalyse nach Top-down oder Bottom-up). Explizite Handlungsempfehlungen, in welchem Fall welche Herangehensweise am geeignetsten für gewisse Problemfälle ist, werden nicht gegeben. Dadurch wird zwar die Universalität der Richtlinie gewahrt, zugleich kann jedoch eine Minderung der Planungseffizienz bei ihrer alleinigen Anwendung durch einen weniger erfahrenen Bearbeiter eintreten. Analog trifft dies auch für andere Richtlinien der Reihe zu (vgl. [20], [21], [130], [139]–[142]).

Zur konkreten Unterstützung der anwendungsspezifischen Bewertung der Simulationswürdigkeit eines Planungsproblems definiert die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 eine Reihe von Gesichtspunkten, die im Vorfeld einer Simulationsstudie zu beurteilen sind. Diese lassen sich auf beliebige Simulationsanwendungen übertragen. Angeführt werden dazu:

- *„erwarteter Nutzen aus der Simulation, günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis*

- *Komplexität der Aufgabe (Unüberschaubarkeit, Vielzahl der Einflüsse, Abhängigkeiten und nebenläufige Prozesse, große Datenmengen)*
- *Unsicherheit bezüglich der Daten oder der mathematischen Verteilung streuender Werte und ihres Einflusses auf die Ergebnisgrößen*
- *Fehlen analytischer mathematischer Modelle bzw. ungerechtfertigt hoher Aufwand (Zeit/Kosten) für derartige Modelle*
- *Abhängigkeit zwischen vorliegender Datenqualität und erwarteter Ergebnisqualität*
- *Sicherheitsbedürfnis bei unscharfen Vorgaben, Ausloten von Grenzen, Beweisnot*
- *wiederholte Verwendung des Simulationsmodells"* [19, S. 19 f.]

Weiterhin ist zu konstatieren, dass sich derzeit in der gesamten VDI-Richtlinienreihe 3633 keine genaueren Hinweisen für die gleichzeitige Simulation von Material- und Energieflüssen finden. Als Reaktion darauf hat die ASIM Fachgruppe SPL bereits 2014 eine Arbeitsgruppe zur Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in SPL gegründet, der auch Mitglieder des VDI-Fachausschusses angehören. Ein Ziel dieser Arbeitsgruppe ist es, den tatsächlichen Standardisierungsbedarf näher zu bestimmen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 viele Grundlagen für die grundsätzliche Durchführung beliebiger Simulationsstudien beschreibt und in Kontext setzt. Zugleich ist die methodische Unterstützung zur Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien gering.

2.4.2 Vorgehen nach Fritz

In seiner Dissertation [143] stellt Fritz fest, dass der hohe Aufwand im Einsatz von Simulation ihrer konsequenten Anwendung entgegensteht [143, S. 1 f.]. Dabei weist er auch darauf hin, dass der Einsatz detaillierter Simulationsmodelle nicht immer zielführend ist und sich das Untersuchungsvorgehen am erforderlichen Detaillierungsgrad und der Untersuchungshäufigkeit orientieren sollte [143, S. 3]. Dazu schlägt er eine Heuristik vor, mit der es dem Anwender ermöglicht wird, gezielter die Materialflusssimulation oder auch alternative Methoden und Werkzeuge einzusetzen [143, S. 45 ff.]. Das in Abbildung 2.21 gezeigte Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio bildet die Grundlage dieser Heuristik. Davon ausgehend schlägt Fritz Flussdiagramme mit definierten Entscheidungspunkten vor, die den Anwender zur Auswahl einer der in Abbildung 2.21 angeführten Untersuchungsmethoden leiten [143, S. 47 ff.]. Dabei greift er zum einen auf bekannte Ansätze zurück, leitet zum anderen aber auch den Forschungsbedarf hinsichtlich ergänzender Methoden und Werkzeuge ab, den er sich in seiner Arbeit widmet.

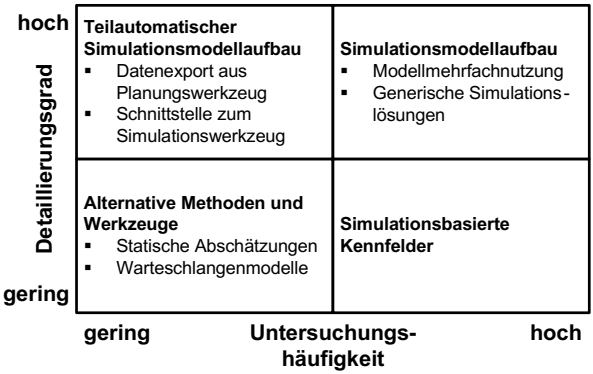


Abbildung 2.21: Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio [143, S. 47]

Obwohl das von Fritz beschriebene Vorgehen keinen unmittelbaren Bezug zur um energetische Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation hat, beinhaltet sie methodische Ansätze, welche für die Konzeptionierung und die Systematisierung der Gestaltungsmethodik von Interesse sind. Insbesondere die Verwendung von Flussdiagrammen zur Anleitung von Anwendern unter Zuhilfenahme vereinfachter Fragen (an Entscheidungspunkten) bezüglich des Untersuchungsgegenstands erscheint praktikabel.

2.4.3 Vorgehen nach Solding

Zentrales Ziel der Dissertation Soldings [86] ist die Entwicklung einer simulationsgestützten Methodik zur Verbesserung des Energiemanagements in schwedischen Gießereien [86, S. 4]. Dazu entwickelte der Autor, ausgehend von einer umfassenden Literaturstudie, ein sechs Schritte umfassendes Vorgehensmodell (vgl. Abbildung 2.22) [86, S. 56 ff.]. Dieses lehnt sich an das von Banks et al. vorgeschlagene Vorgehensmodell für Simulationsstudien an (vgl. [144, S. 12 ff.]) und ergänzt explizit Aspekte zur Beachtung elektrischer Energie. Eine Übertragung des Vorgehens auf Erdgas (o. ä.) ist denkbar und wurde bereits prototypisch untersucht, bedarf jedoch noch weiterer Forschung [86, S. 56].

Ausgehend von den Spezifika von Gießereibetrieben zeigt Solding ein strukturiertes Vorgehen zur Simulation von Produktionssystemen unter Einbezug von Energieflüssen. Dabei liegt sein Hauptaugenmerk auf der Diskussion der Energiedatenaufnahme und der Modellierung von Energieverbräuchen (auf Grundlage von Betriebszuständen). Nicht zuletzt aufgrund dieser starken Fokussierung finden weitere relevante Aspekte von Simulationsstudien (z. B. Bestimmung einer geeigneten Abstraktionsebene, Definition von System-



Abbildung 2.22: Hauptschritte der Methodik von Solding nach [86, S. 57]

grenzen usw.) kaum Beachtung. Bezüglich der Energiedatenaufnahme werden unterschiedliche Optionen diskutiert, eine faktische Entscheidungsunterstützung zur Auswahl eines projektspezifisch geeigneten Ansatzes wird jedoch nicht gegeben. Die Darstellungen zur Kategorisierung von Eingangsdaten und zur Modellierung von Energieverbräuchen zeigen ebenfalls unterschiedliche Lösungsvarianten auf, geben jedoch ebenso wenig strukturierte Unterstützung zur Auswahl des jeweils zu verfolgenden Ansatzes.

Das von Solding vorgeschlagene Vorgehen gibt grundsätzliche Hilfestellungen für die Integration von energetischen Betrachtungen in die Materialflusssimulation. Zugleich findet Effizienz jedoch nur hinsichtlich des konkret entwickelten Modellierungsansatzes (speziell der Berechnung des Energieverbrauchs) Beachtung. Effizienzabwägungen zu einzusetzenden Modellierungsansätzen oder zum Methodeneinsatz im Rahmen der Simulationsstudie werden nicht berücksichtigt und somit bleiben potenzielle Lösungsvarianten sowie relevante Aspekte zur Entscheidungsfindung weitgehend unbeachtet.

2.4.4 Vorgehen nach Khalaf

Zur Unterstützung der Entwicklung von energieeffizienten Fertigungsstrategien für Prozessketten[15] entwickelte Khalaf ein simulationsgestütztes Vorgehensmodell. Dieses umfasst sechs Schritten, welche z. T. weiter untergliedert sind (vgl. Abbildung 2.23) [90, S. 60 ff.]. In seinen Ausführungen stellt der Autor die einzelnen Schritte und die darin vorzunehmenden Abwägungen bzw. Überlegungen ausführlich vor. Dabei orientiert er sich insbesondere an der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 in der Ausgabe von 2000 sowie an Kühn [77].

Auffällig ist, dass die im vierten Schritt des Vorgehensmodells diskutierten „Schritte für den Fabriksimulationsprozess“ [90, S. 70] zum Teil Überschneidungen mit anderen Schritten des Modells aufweisen (z. B. bezüglich der Datenakquise). Weiterhin ist festzustellen, dass kaum Hilfestellungen zur Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien gegeben werden, die über die grundsätzliche Beschreibung des Vorgehens bzw. möglicher Handlungsalternativen hinausgehen. So weist Khalaf mit Bezug auf die von ihm vorgestellten Optimierungsverfahren auch explizit darauf hin, dass „die Wahl […] stark von der jeweiligen Problemstellung abhängig [ist] und […] dem entsprechenden Anwender bzw. Planer obliegt“ [90, S. 81]. Aus diesem Grunde beschränkt er sich auf die Vorstellung unterschiedlicher Ansätze. Das entwickelte Vorgehensmodell stellt folglich im Kern eine Erweiterung bzw. Konkretisierung des Vorgehens nach VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1:2000 zur Planung energieeffizienter Fertigungssteuerungsstrategien für Fabriken dar.

15 Unter Prozessketten werden „verkettete[…] Fertigungssysteme im Bereich der industriellen Fertigung“ [90, S. 1] verstanden und ordnen sich in die Strukturebene Segment/Bereich nach Abbildung 2.5 ein.

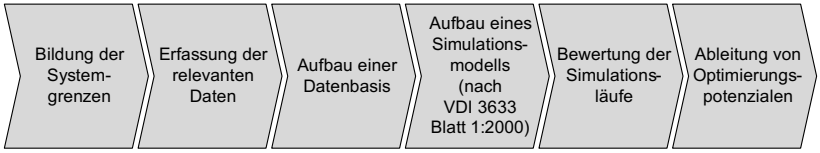


Abbildung 2.23: Vorgehensmodell zur Entwicklung energieeffizienter Fertigungsstrategien für Prozessketten in Anlehnung an [90, S. 60]

2.4.5 Vorgehen nach Thiede

Das von Thiede entwickelte Vorgehensmodell integriert die Grundstruktur systematischer Prozeduren zur Energieeffizienzmessung und -maßnahmenableitung, die typischen Zyklusphasen von Energiemanagementsystemen sowie einen Standardablauf für Simulationsstudien[16] [23, S. 130]. Hierzu synthetisierte der Autor zehn Schritte, die weitgehend sequentiell, mit nur wenigen iterativen Schleifen zu durchlaufen sind [23, S. 131 f.]. Der in Abbildung 2.24 gezeigte Ablauf selbst orientiert sich vornehmlich an dem Standardablauf für Simulationsstudien, wobei die einzelnen Schritte jedoch besonders mit Blick auf die Untersuchung energiebezogener Aspekte untersetzt werden [23, S. 132 ff.].

In seinen Ausführungen zeigt Thiede verschiedene Entscheidungsmöglichkeiten bzw. Alternativen hinsichtlich der zu bestimmenden Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien auf. Dabei diskutiert er das Für und Wider verschiedener Alternativen, z. B. mit Bezug auf die Festlegung der Systemgrenzen [23, S. 132 f.]. An ausgewählten Stellen werden zudem methodische Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, die es dem Anwender erlauben, anhand definierter Kriterien eine Entscheidung über die Ausgestaltung seiner Simulationsstudie zu treffen. Beispielhaft dafür sei das „Energie-Portfolio“ genannt, welches bei der Identifikation zu betrachtender Energieverbraucher sowie der Notwendigkeit ihrer detaillierten Abbildung unterstützt [23, S. 135 ff.]. Durch die enge Integration mit einem ebenfalls vom Autor entwickelten Ansatz für die gleichzeitige Simulation von Material- und Energieflüssen werden zudem weitere relevante Gestaltungsaspekte (z. B. die Verwendung von Betriebszustandsbasierten Durchschnittsleistungen als Energiemodell) von vornherein festgelegt und bedürfen keiner weiteren Entscheidungen. Aus dieser Eigenheit folgt jedoch auch, dass die eingeschränkte Wahlfreiheit im Einsatz von Thiedes Vorgehensmodell im Vergleich mit einem von der Softwarelösung unabhängigen Vorgehensmodell potenziell zulasten der Ergebnisgüte gehen kann.

16 Thiede zitiert hier das von Banks et al. vorgeschlagene Vorgehen (vgl. [144, S. 12 ff.]) in einer neueren Auflage des gleichen Werks [23, S. 47 f.].

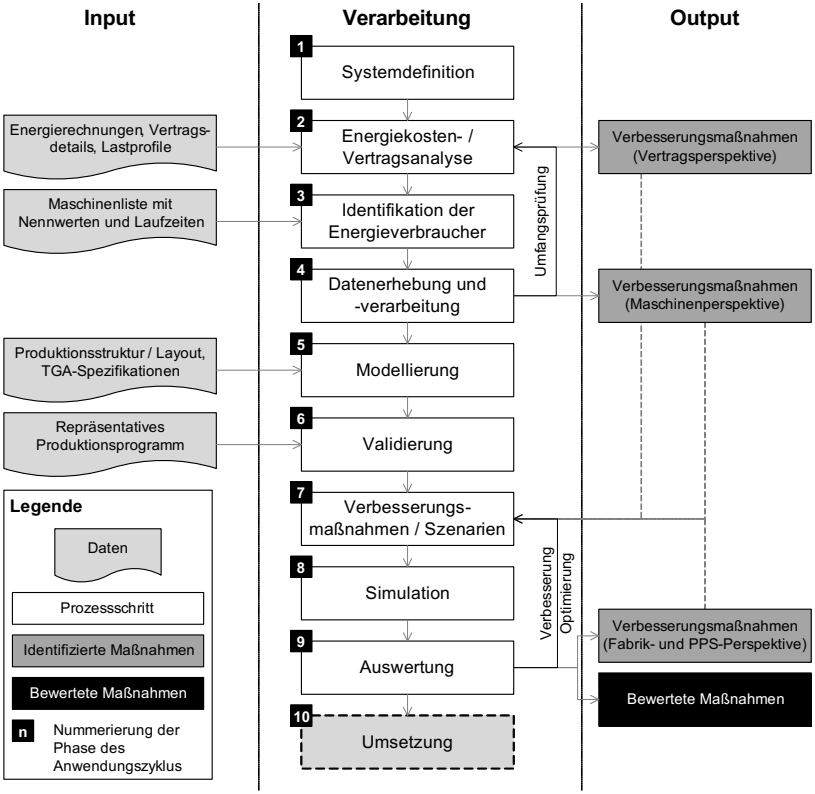


Abbildung 2.24: Simulationsorientiertes Vorgehensmodell zur Verbesserung von Energie- und Ressourceneffizienz nach [23, S. 131]

Insgesamt stellt sich das vorgeschlagene Vorgehensmodell als sehr umfassend angelegt dar. Umfängliche, strukturierte Unterstützung wird jedoch nicht für alle relevanten Entscheidungen hinsichtlich der Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien gegeben. Auch bei der Ableitung von durchzuführenden Simulationsexperimenten, erscheint es möglich, durch weitere Systematisierung geeignete Hilfestellungen geben zu können.

2.4.6 Vorgehen nach Haag

Ziel der Dissertation von Haag ist es, Fabrikplanern und -betreibern eine Methodik bereitzustellen, mit der sie die Produktion einerseits energieorientiert planen sowie bewerten und andererseits energieorientiert optimieren können [93, S. 7]. Die in Abbildung 2.25 gezeigte Methodik besteht aus vier Haupt-

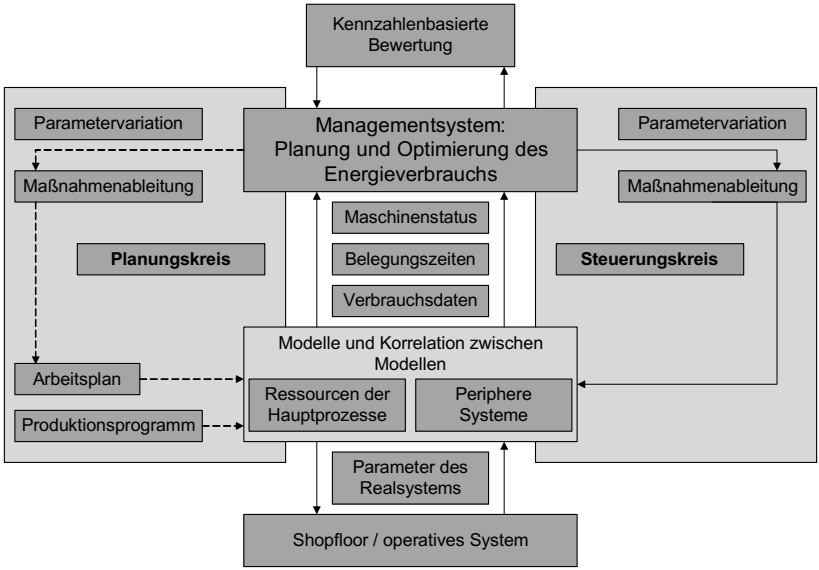


Abbildung 2.25: Methodik zur Planung, Bewertung und Optimierung der Energieeffizienz nach [93, S. 71]

bestandteilen: Modellierung, Erweiterung und Integration der Arbeitsvorbereitung (im Planungs- und Steuerungskreis), Kennzahlensystem zur Bewertung sowie Optimierung und Maßnahmenableitung [93, S. 66 ff.]. Dabei baut der Autor wiederholt auf Forschungsergebnisse der DFG-Forschergruppe ECOMATION auf (vgl. [93, S. 75], [93, S. 87]).

In der Darstellung der Modellierung geht Haag dezidiert auf die vorzusehenden Modellcharakteristika für Hauptprozesse (d. h. Produktionsmaschinen) und Peripherien (speziell Kühl- und Schmierstoffversorgung, Druckluftversorgung, Beleuchtung sowie Heizung, Lüftung und Klimatisierung ein) ein [93, S. 73 ff.]. Dabei wird jedoch eine durchgängige Einschränkung auf die von Haag gewählte Abstraktionsebene hinsichtlich der Abbildung von Prozessen und Energieverbräuchen vorgenommen. Die Erweiterung der Arbeitsvorbereitung bezieht sich insbesondere auf Möglichkeiten der systemtechnischen Integration der Modelle und anderer Softwarelösungen mit dem Ziel einer u. a. energiebezogenen Bewertung [93, S. 89 ff.]. Dazu liefert das ebenfalls entwickelte Kennzahlensystem die notwendigen Kennzahldefinitionen, wobei Haag methodische Unterstützung zu dessen anwendungsspezifischer Ausgestaltung

gibt [93, S. 100 ff.]. Die eigentliche Ableitung von Optimierungsmöglichkeiten erfolgt unter Nutzung von Parametervariation und Szenarioanalyse [93, S. 112 ff.]. Für erstere stellt Haag zudem einige Anwendungshinweise bereit.

Diese Arbeit ist in ihrem thematischen Fokus der von Khalaf (vgl. Abschnitt 2.4.4) ähnlich; beide beschäftigen sich mit Möglichkeiten den Betrieb von Produktionssystemen effizienter zu gestalten. Dabei ist die von Haag vorgeschlagene Methodik merklich konkreter. Mehr noch als der Ansatz von Thiede (vgl. Abschnitt 2.4.5), ist sie jedoch sehr stark auf eine spezielle softwaretechnische Umsetzung festgelegt. Somit wird der Anwender bei einer Vielzahl der Entscheidungen unterstützt, bei anderen wird eine Vorauswahl getroffen. Insofern erscheint die Methodik nicht ohne weiteres auf Probleme außerhalb der Arbeitsvorbereitung übertragbar bzw. mit anderen Softwarelösungen realisierbar.

2.4.7 Vorgehen nach Sproedt et al.

Der Beitrag von Sproedt et al. [100] stellt eine Sammlung von Ansätzen vor, die es Entscheidungsträgern ermöglichen soll, Maßnahmen zur Erhöhung der Ökoeffizienz zu finden und zu bewerten. Dazu untersuchen die Autoren, wie sich einerseits LCA in eine Materialflusssimulation integrieren und wie sich andererseits die Anwendung einer solchen Simulationslösung methodisch unterstützen lässt. Für ersteres bauen sie auf einen von Wohlgemut et al. entwickelten Ansatz (vgl. [119], [145], [146]) auf. Abbildung 2.26 zeigt das empfohlene Vorgehen zur Systemanalyse und -modellierung im Überblick. Zu allen Schritten ergänzen Sproedt et al. zudem die notwendigen Eingaben (Inputs) sowie den jeweiligen Arbeitsinhalt. Auf die Schritte 2 bis 6 gehen sie dabei noch näher ein.

Verglichen mit den Arbeiten von Khalaf, Thiede und Haag (vgl. Abschnitte 2.4.4 bis 2.4.6) verfolgen Sproedt et al. einen umfassenderen Betrachtungsansatz. So beziehen die Autoren nicht ausschließlich einen bzw. mehrere Energieträger ein, sondern erstellen eine Ökobilanz (vgl. Abschnitt 2.1.2). Dazu modellieren sie alle relevanten Flusssysteme (Elektrizität, andere Energieträger, Materialien, Hilfsstoffe usw.) sowie weitere kostenrelevante Faktoren. Die Bestimmung von potenziellen Verbesserungsmaßnahmen wird von der Systemcharakterisierung ausgehend unterstützt. Hierfür schlagen die Autoren strukturierte Analysevorlagen zur Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Faktoren vor. Letztere assoziieren sie wiederum mit potenziellen Maßnahmen (u. a. mittels eines Ursache-Wirkungs- bzw. Ishikawa-Diagramms), sodass sich ausgehend von den bedeutendsten Faktoren problemspezifische Effizienzsteigerungsansätze ableiten lassen. Eine weitere

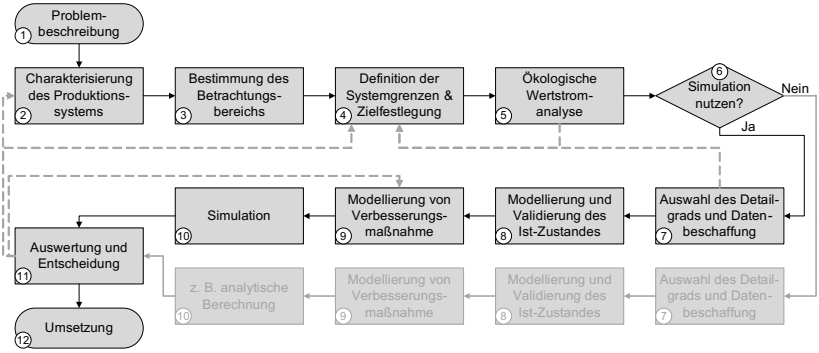


Abbildung 2.26: Vorgehen zur Systemanalyse und -modellierung in Anlehnung an [100]

Besonderheit des vorgeschlagenen Vorgehens ist, dass es explizit auch die Verwendung analytischer Methoden einbezieht, wenn keine Simulationswürdigkeit gegeben ist.

Die Arbeit von Sproedt et al. integriert eine Vielzahl von Hilfestellungen für die Systemanalyse und Ableitung von möglichen Verbesserungsmaßnahmen. Zugleich wird mit Verweis auf andere Quellen nur wenig Hilfestellung für die eigentliche Simulationsstudie gegeben. Die enge Verknüpfung mit einer eigens entwickelten Simulationslösung, die bereits diverse Gestaltungsaspekte der Simulationsstudie vorbestimmt, mag dies in Teilen auch obsolet machen, zugleich steht dies aber auch der Übertragbarkeit des Vorgehens entgegen. Dennoch scheint es möglich, verschiedene Ansätze zur Unterstützung der fabrikplanerischen Arbeit, welche Ausgangspunkt für eine mit Simulation durchgeführte Untersuchung darstellt, aus dieser Arbeit zu adaptieren.

2.4.8 Vorgehen nach Beier

Unter dem Eindruck größer werdender Anteile von volatilen erneuerbaren Energiequellen in der Energieerzeugung hat Beier einen Simulationsansatz zur Untersuchung des Umgangs mit flexiblen Energieangeboten und -bedarfen entwickelt. Ausgangspunkte ist dabei einerseits die Frage, wie der industrielle Elektrizitätsbedarf auf den (dezentralen) variablen Energieangebot aus erneuerbaren Quellen abgestimmt werden kann. Andererseits stellt der Autor die Frage, welche spezifischen Methoden und Werkzeuge es erlauben, den flexiblen Elektrizitätsbedarf der Industrie, speziell von Produktionssystemen, zu untersuchen, zu implementieren und zu bewerten. Die Betrachtungen beziehen sich dabei sowohl auf die strategische und taktische Ebene (Sys-

temauslegung und -verbesserung) als auch auf die operative Ebene (Systemsteuerung) [97, S. 6 ff.]. Anzumerken ist, dass Beier in einer Arbeitsgruppe mit Thiede arbeitete und die gleichen Werkzeuge nutzt (vgl. [147], [148]).

Analog zu der Arbeit von Sproedt et al. (vgl. Abschnitt 2.4.7) beschränkt sich Beier nicht auf ein Vorgehen zur Simulationsanwendung, sondern bezieht Aspekte der Fabrikplanung mit ein. Der von ihm vorgeschlagene Prozess, siehe Abbildung 2.27, beginnt mit einer Zieldefinition (Schritte 1 bis 3) und endet nach der Implementierung sowie Prüfung einer entwickelten Flexibilitätsmaßnahme, aus der ggf. weitere Aktivitäten folgen (Schritte 21 bis 26). Bezogen auf die eigentliche Simulationsstudie beinhaltet er zudem eine formelle und softwaregestützte Modellierung (Schritte 4 bis 7), eine Validierung anhand eines Referenzszenarios (Schritte 8 bis 11) und die Untersuchung relevanter Szenarien (Schritte 12 bis 18) [97, S. 161 ff.]. Die Beschreibungen zu letztgenannten Aktivitäten orientieren sich dabei eng an einem ebenfalls präsentierten Modellentwurf für Elemente der Material- und Energieflusssysteme (vgl. [97, S. 116 ff.]) sowie Arbeiten Dritter für ausgewählte Aspekte, etwa die Modellvalidierung oder die Datenakquise. Der Gesamtprozess enthält mehrere Entscheidungspunkte, die ggf. zur Rückkehr zu früheren Schritten führen, so dass eine iterative Problemlösung erfolgt. Welche Einzelentscheidungen hinsichtlich der Ausgestaltung der Simulationsstudie zu treffen sind, führt Beier nicht im Detail aus und auch Hilfestellungen, etwa zur Auswahl relevanter Systemelemente, werden nicht bereitgestellt.

Insbesondere im Vergleich zu den Vorgehensmodellen von Thiede sowie Sproedt et al. zeigt sich, dass Beier einen größeren Fokus auf die Entwicklung eines Rahmenkonzepts für Simulationsstudien im Bereich der Energieflexibilität legt. Folglich ist das von ihm vorgestellte Vorgehensmodell primär auf dessen Einbindung in entsprechende Planungsprojekte ausgelegt. Eine flexible Übertragung auf anders geartete Problemfälle ist nur bedingt möglich. Somit gibt die Arbeit zwar Aufschluss über ausgewählte Alternativen einiger Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien, kaum aber über deren Auswahl.

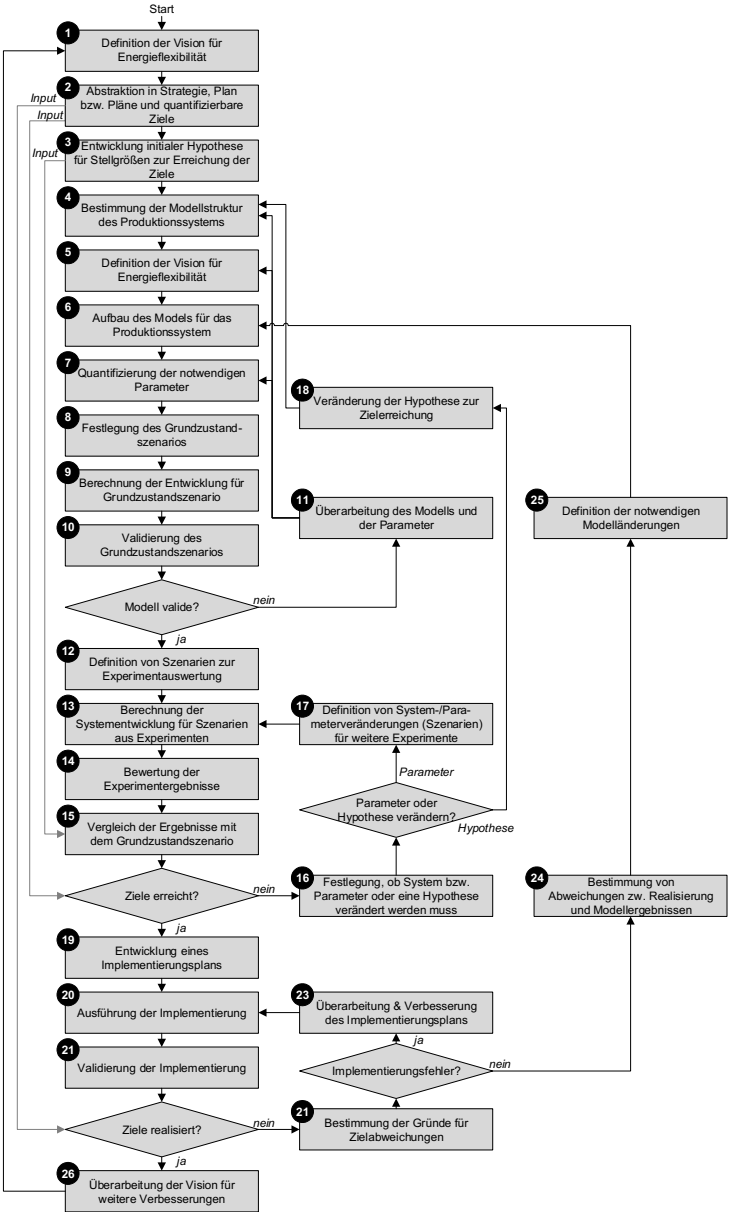


Abbildung 2.27: Vorgehen zur Verbesserung der Energieflexibilität nach [97, S. 162]

2.4.9 Diskussion bestehender Vorgehensmodelle

Die vorangehenden Abschnitte machen ersichtlich, dass die zugrundeliegende Motivation und die Herangehensweise der identifizierten Vorgehensmodelle mitunter merklich voneinander abweichen. Tabelle 2.11 zeigt dazu eine zusammenfassende Darstellung der **Analyseergebnisse**, ausgehend von den eingangs angeführten Kriterien und dem in Anhang B gezeigten Bewertungsschema.

Tabelle 2.11:Übersicht zur Einschätzung der bestehenden Vorgehensmodelle

Vorgehensmodell nach:	**Energetische Betrachtungen**	**Gestaltungsaspekte**	**Entscheidungskriterien**	**Lösungsvarianten**	**Umwelteinflüsse**	**Entscheidungsverfahren**	**Übertragbarkeit**
VDI 3633 Blatt 1 [19]	0	+	+	+	0	0	++
Fritz [143]	0	+	++	++	++	++	++
Solding [86]	++	+	+	+	0	0	+
Khalaf [90]	++	+	+	+	0	0	+
Thiede [23]	++	++	+	+	0	+	+
Haag [93]	++	++	+	+	0	+	0
Sproedt et al. [100]	++	+	++	++	0	++	+
Beier [97]	++	+	0	+	0	0	+
Legende: 0 – Erfüllung gering + – Erfüllung mittel ++ – Erfüllung hoch							

Die Übersicht zeigt, dass einerseits allgemeine Vorgehensmodelle untersucht wurden, die keinen besonderen Bezug zu **energetischen Betrachtungen** in Simulationsstudien haben. Andererseits wurden Ansätze analysiert, die sich unmittelbar mit dieser Art von Simulationen beschäftigen.

Evident ist bei den Letztgenannte, dass diese die relevanten Gestaltungsaspekte entweder implizit in der zugehörigen Simulationslösung bzw. im zugehörigen Modellierungsansatz vorwegnehmen oder nicht durchgängig eine

fundierte Entscheidung zur auszuwählenden Lösungsvariante unterstützen. So werden **Entscheidungskriterien**, **Lösungsvarianten** und **Entscheidungsverfahren** meist nur unzureichend in die Vorgehensmodelle einbezogen.

Ein besonderes Defizit ist zudem bei der qualitativen Erfassung von Wechselwirkungen von Auswahlentscheidungen für einzelne Gestaltungsaspekte der Simulationsstudie auf andere zu verzeichnen. Entsprechend werden diese auch nicht ausreichend im methodischen Vorgehen der identifizierten Arbeiten adressiert. Der Einbezug von **Umwelteinflüssen** stellt sich folglich als unzureichend dar.

Aus der Verknüpfung der zuvor angesprochenen engen Verbindung der Vorgehensmodelle mit individuellen Simulationslösungen bzw. Modellierungsansätzen folgen zudem Defizite in der **Übertragbarkeit**. Die implizite Festlegung von Gestaltungsaspekten sorgt etwa dafür, dass andere (ggf. problemspezifisch effizientere) Lösungsvarianten mitunter gar keine Beachtung finden bzw. eine Entscheidung hinsichtlich alternativer Vorgehensweisen nicht strukturiert unterstützt wird. Dies sei am Beispiel der Energiemodelle kurz verdeutlicht: So geht Haag durchweg von einer Modellierung mittels Betriebszuständen mit Durchschnittsverbrauch aus. Erfordert ein Umplanungsprojekt jedoch größere Genauigkeit im Zeitverlauf des Energieverbrauchs, so zeigt das Vorgehensmodell Haag weder Lösungsvarianten (z. B. Betriebszustände mit Leistungsverläufen) noch relevante Entscheidungskriterien (z. B. Datenerhebungsaufwand) oder einen Ansatz zur Entscheidungsfindung (z. B. Flussdiagramm nach dem Vorbild von Fritz, vgl. Abschnitt 2.4.2) auf. Der Anwender erfährt somit keine strukturierte Entscheidungsunterstützung und darüber hinausgehende Wechselwirkungen (z. B. im Hinblick auf Energiedatenakquiseanforderungen und -methoden) finden möglicherweise keine hinreichende Beachtung.

Zusammenfassend ist daher festzustellen, dass die identifizierten und analysierten Vorgehensmodelle keine ausreichende sowie entscheidungstheoretisch fundierte Hilfestellung für die Gestaltung von Simulationsstudien bieten. Grund dafür ist nicht zuletzt, dass diese Arbeiten eine andere Zielsetzung hatten. Eine weiterführende Diskussion des sich hieraus ergebenden Handlungsbedarfs im Kontext weiterer Erkenntnisse aus dem Studium des Stands von Wissenschaft und Technik finden sich im Folgekapitel.

3 Handlungsbedarf und Lösungskonzept

Bereits in der Einleitung wurde erläutert, welche Bedeutung klima- und energiepolitische Fragestellungen für die Weiterentwicklung der industriellen Produktion in Deutschland haben. Davon ausgehend wurde im vorangehenden Kapitel dargestellt, welche Implikationen sich daraus einerseits für Betriebswissenschaft und Fabrikplanung und andererseits für Digitale Fabrik und Simulationstechnik ergeben. Darauf aufbauend wird im Weiteren der Handlungsbedarf in Form von Anforderungen an der Gestaltungsmethodik für Simulationsstudien abgeleitet. Zudem werden Vorüberlegungen zum Lösungskonzept vorgestellt, bevor Struktur und Inhalt des entwickelten Vorgehensmodells eingeführt werden.

3.1 Ableitung von Anforderungen an die Gestaltungsmethodik

Ausgehend vom Stand von Wissenschaft und Technik sind nachfolgend identifizierte Defizite zusammengefasst. Abschnitt 3.1.2 legt den Handlungsbedarf anhand von Anforderungen an die Konzeptionierung und die Systematisierung der Gestaltungsmethodik dar.

3.1.1 Defizite im Stand von Wissenschaft und Technik

In Abschnitt 2.1 ist dargestellt, dass Fabriken grundsätzlich unter Beachtung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeit) gestaltet werden sollen. Aufgrund geringerer Regulierung, als etwa im Bereich der Bauindustrie, sind in Industriebetrieben meist wirtschaftliche Überlegungen der Ausgangspunkt für Effizienzsteigerungen und die Umsetzung dazu geeigneter Maßnahmen. Dem folgend sind die Qualitätsansprüche bei der Planung ebendieser sehr hoch, damit der ökonomische Nutzen final sichergestellt werden kann. Bezogen auf die Steigerung der Energieeffizienz sorgt diese Handlungstendenz zugleich dafür, dass nicht immer das technisch mögliche, sondern oft nur das mitunter kleinere wirtschaftliche Potenzial ausgeschöpft wird.

Zur Planung energieeffizienter Fabriken und Produktionssysteme gibt es unterdes eine Vielzahl von Handlungsempfehlungen aus Forschung und Praxis. Diese wurden hinsichtlich ihrer methodischen Unterstützung für Fabrikplanungsprojekte untersucht (vgl. Abschnitt 2.1.3). Dabei zeigt sich, dass vielmals zwar **Planungsmethoden** vorgeschlagen werden, aber bis auf exemplarische Untersetzungen kaum Hilfestellungen für den gezielten Methoden-

einsatz gegeben werden. Somit hängt das Planungsergebnis – und damit die erreichbare Effizienzsteigerung – vor allem von der Methodenkompetenz ab, die der Planer besitzt, wenn er die Handlungsempfehlungen umsetzt. Zugleich ist festzustellen, dass die um energetische Betrachtungen erweiterte Simulation eine häufig und vielfältig eingesetzte Methode in energieorientierten Planungsprojekten darstellt.

Fabrikplanung im engeren Sinne dient der Bestimmung und umsetzungsfähigen Detaillierung der Flusssysteme einer Fabrik hinsichtlich ihrer Aufbau- und Ablaufstruktur. Nicht zuletzt aufgrund der großen Interdisziplinarität, welche derartigen Projekten innewohnt, arbeiten Fabrikplaner auf einem relativ hohem Abstraktionsgrad. Dabei gestalten sie, wie auch in Abbildung 2.5 gezeigt, vorrangig auf den Ebenen Arbeitsplatz, Segment bzw. Bereich, Gebäude und Werk. Die vorangehend angesprochenen Handlungsempfehlungen für die energieeffiziente Fabrikplanung stellen dazu bereits abstrakte Handlungsansätze oder Heuristiken bereit, die es dem Fabrikplaner ermöglichen sollen, schnell eigene Lösungen zu entwickeln. Ein zentrales Defizit in diesem Zusammenhang stellt die systematische **Ableitung von Effizienzmaßnahmen** im Fabrikplanungsprojekt dar. Überdies ergeben sich aus den abstrakten Handlungsansätzen verschiedentliche Implikationen für den Einsatz von Planungsmethoden, insbesondere der um energetische Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation, welche in bisherigen Vorgehensmodellen zur Fabrikplanung keine oder nur unzureichend Beachtung finden.

Die Erörterungen zur **Entscheidungstheorie** in Abschnitt 2.2 zeigen weiterhin, dass die Auswahl der Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien sich als eine Reihe von interdependenten Entscheidungsproblemen darstellt. Zur Unterstützung ihrer Lösung lassen sich präskriptive Entscheidungsverfahren einsetzen, insbesondere wenn diese auf ein heuristisches Vorgehen aufbauen. Dazu diskutiert Abschnitt 2.2.2 ein von Grünig und Kühn entwickeltes, allgemeines Verfahren, das sich auf weitgehend beliebige Entscheidungsprobleme anwenden lässt. Da zugleich festzustellen ist, dass spezielle, d. h. problemtypspezifische, Entscheidungsverfahren eine höhere Lösungsqualität zu liefern vermögen, erscheint die Adaption von Grünig und Kühns Ansatz zielführend im Sinne der Arbeit.

Materialflusssimulation, als eine Methode der Digitalen Fabrik, stellt ein vielseitiges Werkzeug für Fabrikplanungsprojekte dar (vgl. Abschnitt 2.3). Mit diesem lassen sich dynamische Untersuchungen durchführen, die der Gestaltung von Ablauf- und Aufbaustruktur des Materialflusssystems dienen. Dabei erlaubt die Leistungsfähigkeit moderner Simulations- und Optimierungssoft-

ware mittlerweile auch die Integration ebendieser Techniken. Der relevante Betrachtungsraum orientiert sich wiederum weitgehend an dem der Fabrikplanung: zumeist im Bereich vom Arbeitsplatz bis zum Produktionsnetzwerk.

Die **Erweiterung der Materialflusssimulation um energetische Betrachtungen** stellt einen in den letzten Jahren vielfach gewählten und dokumentierten Ansatz dar. Dieser wird branchenübergreifend, in unterschiedlicher Weise und zur Untersuchung auch sehr verschiedener Planungsprobleme angewandt. Methodische Hilfestellungen zu deren Einsatz müssen folglich branchenunabhängig einsetzbar sein und ausgehend vom Planungsproblem genauer konkretisieren, wie die Modellierung durchzuführen und Simulationslösungen einzusetzen sind. Relevante Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien sind dabei u. a.:

- Ablauflogik für Betrachtung von Energieflüssen in Form von Ergebnisdaten (reine Auswertung) oder als Simulationsdaten (beeinflussen Simulationsfortschritt)
- Spezifikation der zu erhebenden Ergebnisdaten
- Systemarchitektur der Simulationslösung
- Genauigkeit der Modellierung von Energieflüssen

Um die angeführte Diversität genauer zu untersuchen und zu quantifizieren, wurde eine **systematische Literaturanalyse** durchgeführt. Tabelle 3.1 zeigt überblicksweise, welche Kategorien in der Analyse der dokumentierten Simulationsuntersuchungen einbezogen wurden und welche Erkenntnisse für die Konzeptionierung der Gestaltungsmethodik sich aus den in Abschnitt 2.3.3 erläuterten, quantitativen Analyseergebnissen ableiten lassen.

Tabelle 3.1: Erkenntnisse aus der systematischen Literaturanalyse

Kategorie der Literatur-analyse	**Abgeleitete Erkenntnisse aus der systematischen Literaturanalyse**
Simulations-ziel	• Quantifizierung energiebezogener Größen (o. ä.) größte Priorität • Qualitative Abschätzung von Maßnahmeneffekten teilweise im Fokus • Simulationsgestützte Optimierung stellt relevanten Ansatz dar
Planungs-aufgabe	• Supply Chain Management von untergeordneter Bedeutung • Untersuchung von Maßnahmen bezüglich der Ablaufstruktur seltener als bezüglich der Aufbaustruktur, aber beide besonders relevant • Viele unterschiedliche Planungsaspekte von Bedeutung (heterogene Verteilung dokumentierter Untersuchungen) • Betrachtung von Infrastrukturanlagen in vielen Untersuchungen nicht relevant

Tabelle 3.1: (Fortsetzung)

Kategorie der Literatur-analyse	Abgeleitete Erkenntnisse aus der systematischen Literaturanalyse
Werkzeug	• Einsatz von Materialflusssimulationssoftware dominant in diesem Forschungsbereich • Kombination mehrerer Simulationswerkzeuge oder -methoden ein weiterer relevanter Ansatz (abhängig von Anforderungen an Studie) • Alleinige Nutzung anderer Simulationswerkzeuge eher unbedeutend, daher nicht einzubeziehen
Experiment-planung	• Erfahrungsorientierte Szenarioanalysen haben größte Bedeutung, aber auch „systematisches Probieren“ für Experimentplanung mit hoher Relevanz • Optimierung stellt relevante Untersuchungsmethode dar • Einsatz von Methoden zur statistischen Versuchsplanung von untergeordneter Bedeutung aber ggf. häufiger möglich/zielführend
Betrachtete Größe	• Modellierung einer oder mehrerer Energieträger hat große Priorität (beide in vergleichbarem Maße) • Modellierung ausschließlich von Wirkungsäquivalenten (Emissions-, Gesamt- oder Kostenäquivalent) von untergeordneter Bedeutung, daher potenziell vernachlässigbar
Energiemodell	• Nutzung von Betriebszuständen zur Abbildung von Energieflüssen in Maschinen und Anlagen ist Konsens im Stand der Technik • Höhere Detaillierung seltener notwendig bzw. eingesetzt, daher stets Aufwand-Nutzen-Abschätzung sinnvoll • Reduzierung auf Äquivalente oder Ersatzgrößen möglicherweise ausreichend (problemabhängig)

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden bereits **bestehende Vorgehensmodelle** für die Durchführung von Simulationsstudien identifiziert, welche die korrekte und zielorientierte Anwendung von Simulation ermöglichen sollen (vgl. Abschnitt 2.4). Die Analyse dieser Modelle zeigt, dass der zur Simulation in Produktion und Logistik relevanteste Standard, die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, bislang nicht näher auf Aspekte zur Integration der Betrachtung von Energie o. ä. eingeht. Auch die Arbeiten von Solding, Khalaf, Thiede, Haag, Sproedt et al. und Beier (vgl. Abschnitte 2.4.3–2.4.8, respektive) gehen nicht oder nur teilweise auf die Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien ein. Zugleich orientieren sie sich zumeist an einer entwickelten Softwarelösung bzw. an einem Modellierungsansatz für um energetische Betrachtungen erweitere Materialflusssimulation und sind daher nur

eingeschränkt übertragbar. Ferner folgt keine der untersuchten Arbeiten einem entscheidungstheoretisch fundiertem Ansatz, sodass ihre Vorgehensmodelle im Entscheidungsprozess (bewertet beispielsweise nach den Anforderungen von Schmidt; vgl. Abschnitt 2.2.1) nur bedingt unterstützen.

3.1.2 Anforderungen für die Konzeptionierung der Gestaltungsmethodik

Ein zentraler Ausgangspunkt für die Konzeptionierung und die Systematisierung einer Gestaltungsmethodik für Simulationsstudien in Umplanungsprojekten zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken wurde von Wilson et al. wie folgt formuliert:

> *„[…] [R]esearch is required into how accurate energy simulation should be, and at what point does the pursuit of accuracy incur more costs than potential cost savings?“*[17] *[106]*

Dahinter steckt letztlich eine Frage nach der Effizienz in der Simulationsanwendung, nach einem Aufwand-Nutzen-Verhältnis. Dies beschränkt sich jedoch nicht ausschließlich auf die Abbildungsgenauigkeit modellierter Energieflüsse, sondern gilt im Grunde für alle in einer Simulationsstudie relevanten Gestaltungsaspekte. Folglich ist zu klären, wie dieses Verhältnis und die dahinterliegenden Interessen von Fabrikplaner und Simulationsanwender sich in ein **Zielsystem** überführen lassen, um die Effizienz in Simulationsstudien zu bewerten.

Die Aufwandsdimension ist in diesem Zusammenhang eng mit der Planungsaufgabe verbunden, die es mittels Simulation zu untersuchen gilt. In der Literatur konnten unterschiedliche Ansätze zur Klassifikation von typischen Planungsfällen einerseits und Energieeffizienzmaßnahmen andererseits identifiziert werden. Dies suggeriert, dass sich Planungsprobleme auf einer höheren Abstraktionsebene vergleichbar beschreiben lassen. Es wird unterstellt, dass sich diese Kategorien bezüglich einzelner Planungsaspekte auch in ähnlicher Weise bearbeiten lassen. Ausgehend von den relevanten Aspekten nachhaltiger Produktion ist daher zu klären, welche speziellen **Planungsfälle** für ein hierin relevantes Umplanungsprojekt zu beachten sind. Weiterhin sind mit Bezug auf die spätere Durchführung von Simulationsstudien vergleichbare **Handlungsansätze** auszuwählen bzw. abzugrenzen und hinsichtlich ihrer Eignung zur Umsetzung in einzelnen Planungsfällen einzuordnen. Neben der Schaffung eines definierten Bezugsrahmens zur Ausprägungsbestimmung für

17 Übersetzung des Autors: Forschung ist notwendig bezüglich der Frage, wie genau Energiesimulation sein sollte und an welchem Punkt verursacht das Streben nach Genauigkeit mehr Kosten, als es Potential für Kosteneinsparungen bietet.

Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien wird auf diesem Wege zugleich die Exploration von möglichen Effizienzmaßnahmen aus fabrikplanerischer Sicht unterstützt.

Aufgrund des größeren Aufwands bei der integrierten Simulation von Material- und Energieflüssen, stellt die **Simulationswürdigkeit** eine erste, aber überaus entscheidende Fragestellung dar. Unter Einbezug der verschiedenen Möglichkeiten zur Untersuchung von Energieeffizienzplanungsproblemen mittels simulationstechnischer und anderer Methoden gilt es gemäß dem o. g. Zielsystem eine geeignete Richtungsentscheidung zu unterstützen. Dabei ist nicht davon auszugehen, dass es sich bei der um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation stets um die geeignetste Methode zur Planungsunterstützung handelt. Zugleich wird ihr in der vorliegenden Arbeit die größte Bedeutung beigemessen, sodass alternative Untersuchungsansätze im weiteren Verlauf überwiegend unbeachtet bleiben.

Um eine zielorientierte, effiziente Anwendung der Simulation zu unterstützen, stellt die Identifikation potenziell relevanter **Gestaltungsaspekte** (Teilprobleme) und die Bestimmung ihrer möglichen **Lösungsvarianten** (Alternativen) eine Grundvoraussetzung dar. Dazu wird gleichwohl auf die bekannten Vorgehensmodelle (vgl. Abschnitt 2.4) und das Wissen über dokumentierte Simulationsuntersuchungen (vgl. Abschnitt 2.3) zurückgegriffen. Durch die Aufbereitung dieser Information wird der schrittweise Entscheidungsprozess während der Durchführung einer Simulationsstudie auf zweierlei Wegen unterstützt. Zum einen kann das Wissen über die potenziell relevanten Gestaltungsaspekte vom Anwender genutzt werden, um frühzeitig die relevanten Entscheidungen zu bestimmen. Zum anderen wird die Identifikation von Lösungsvarianten vereinfacht. Ein zentraler Anspruch im Zuge der Aufbereitung muss die Identifikation von Abhängigkeiten und Beeinflussungen einzelner Gestaltungsaspekte untereinander sein. Zugleich ist eine Analyse hinsichtlich eines Zusammenhangs zu den o. g. Planungsfällen und Handlungsansätzen durchzuführen.

Unter Nutzung aller voranstehend diskutierten Teilaspekte ist es möglich, die **Entscheidungen zur Auswahl** einzelner Lösungsvarianten für Gestaltungsaspekte zu strukturieren und dadurch zu vereinfachen sowie zu unterstützen. Dabei gilt es insbesondere, Hilfestellung für die Bewertung und Beurteilung von Lösungsvarianten unter Beachtung der zuvor identifizierten Zusammenhänge zu geben. Der Fokus innerhalb der Arbeit liegt dabei auf simulationsbezogenen Entscheidungen (vgl. Abbildung 1.1). Zugleich sind

jedoch auch planungsbezogene Entscheidungen zu treffen, um notwendige Eingangsinformationen für die Vorbereitung und Durchführung der Simulationsstudie zu schaffen.

Die genannten Lösungselemente sind in einer Gestaltungsmethodik für Simulationsstudien in Umplanungsprojekten zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken zu integrieren. Der konsequente Einsatz entscheidungstheoretischer Methoden unterstützt dabei eine objektivere und effizientere Ausprägungsbestimmung für Simulationsstudien. Dazu wird die Methodik als ein spezielles heuristisches Entscheidungsverfahren ausgeführt. Dieser Ansatz fand in der Literatur bislang keine Beachtung, woraus dessen **Neuartigkeit** folgt.

Die Erkenntnisse der Abschnitte 2.3 und 2.4 bekräftigen die in Kapitel 1 formulierte Erwartung, dass die entwickelte Gestaltungsmethodik große Komplexität aufweisen wird. Das folgt insbesondere aus der Vielzahl bereits identifizierter Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien, aber auch aus der umfangreichen Folge von Teilaufgaben, die im Rahmen von Simulationsprojekten zu bearbeiten sind. Eine effiziente Anwendung der Methodik trotz dieser Komplexität kann durch Überführung der im Weiteren gezeigten Ergebnisse in ein **Expertensystem** gesichert werden. Hiermit können auch vielgliedrige Abläufe und komplexe Entscheidungsverfahren auf einfache grafische Oberflächen reduziert werden, sodass sich Simulationsstudien komfortabel sowie unter Einbezug aller relevanten Aspekte bearbeiten lassen. Die literaturgestützte Systematisierung der grundlegenden Bestandteile der Gestaltungsmethodik stellt dazu eine zentrale Grundlage dar.

Ein besonderes Augenmerk liegt daher auch auf der Definition eines logischen Vorgehens für die Durchführung entsprechender Simulationsstudien. In diesem werden die einzelnen Teilprobleme bzw. Entscheidungspunkte in geeigneter Weise verortet. Folgende **Anforderungen** werden unter teilweisem Rückgriff auf die Anforderungen an Entscheidungsmodelle bzw. -verfahren von Schmidt [65] (vgl. Abschnitt 2.2.1) dazu formuliert:

- *Übertragbarkeit:* Alle Entscheidungen sollen ohne Bezug zu einer konkreten Simulationslösung oder Branche vorgesehen und dahingehend vorbereitet werden.
- *Synthese:* Die Gestaltungsmethodik soll bestehendes Wissen und geeignete Alternativen integrieren und systematisieren.
- *Methodeneinsatz:* Für entscheidungs- und simulationsvorbereitende Schritte sollen geeignete Methoden identifiziert und effektiv sowie effizient integriert werden.

- *Rationalität:* Entwickelte Entscheidungsmodelle und -verfahren sollen der Identifikation der optimalen Lösungsvariante gemäß der Entscheiderpräferenzen dienen.
- *Realitätsnähe:* Für die Gestaltungsmethodik und ihre Elemente wird vorausgesetzt, dass alle Aspekte in der Realität gegeben sind (Existenz) und wesentliche Merkmale der realen Entscheidungen adäquat einbezogen werden (Vollständigkeit).
- *Anwendbarkeit:* Alle Elemente der Gestaltungsmethodik müssen (unter besonderer Beachtung der folgenden Anstriche) so gestaltet sein, dass eine hohe Wahrscheinlichkeit zur Findung optimaler Ergebnisse in der Anwendung erreicht wird.
- *Einfachheit:* Die Informationsbeschaffung und Alternativenbewertung sind so zu gestalten, dass Entscheidungen möglichst intuitiv getroffen werden können.
- *Flexibilität:* Innerhalb der Planung und Untersuchung von Energieeffizienzmaßnahmen soll die Gestaltungsmethodik größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der gewünschten Ergebnisdaten und deren Granularität bieten.

Abbildung 3.1 stellt die zuvor beschriebenen Lösungsaspekte und die bestehenden Zusammenhänge ausgehend von den zentralen Defiziten des Stands der Forschung dar. Erstgenannte (in dunklerer Schattierung hervorgehoben) wurden einer bzw. mehreren Wissenschaftsdisziplinen zugeordnet, die in der vorliegenden Arbeit besondere Beachtung finden. Das Ordnungskriterium dabei ist, aus welcher Domäne heraus die jeweiligen Aspekte vorrangig beeinflusst werden. Es ist weiter anzumerken, dass die Lösungsaspekte einzelne Bestandteile des allgemeinen heuristischen Entscheidungsverfahren nach Grünig und Kühn (vgl. Abschnitt 2.2.2) (in Weiß hervorgehoben) aufgreifen. Dieser Umstand begründet zugleich die enge Orientierung an der Entscheidungstheorie bei der Konzeptionierung und der Systematisierung der Gestaltungsmethodik.

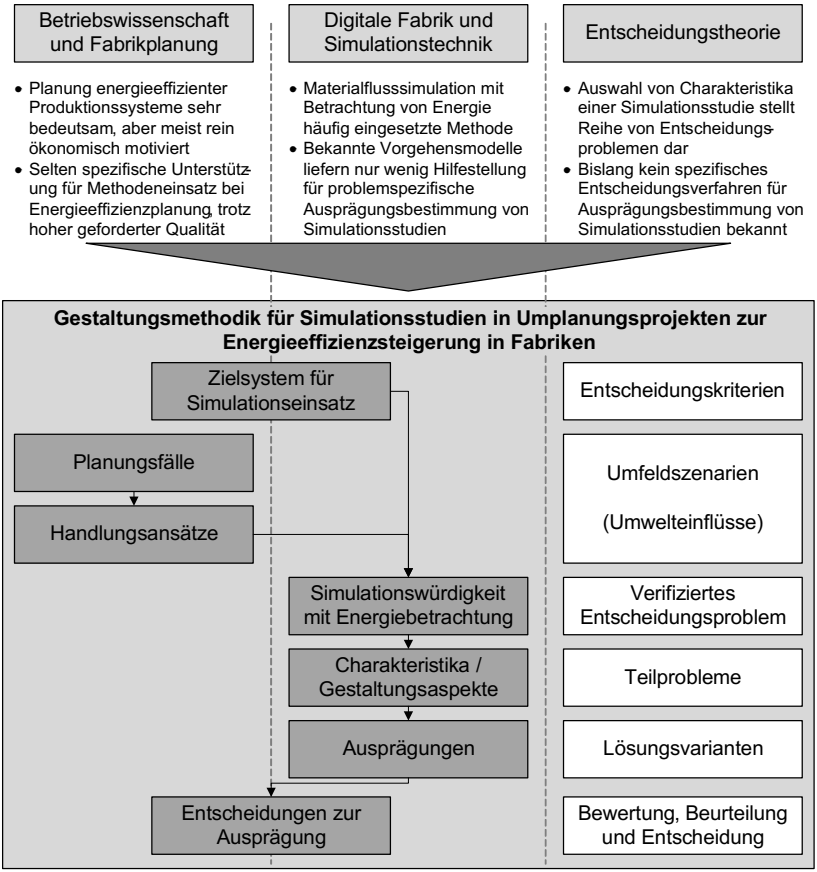


Abbildung 3.1: Zusammenhang der Lösungsaspekte zur Entwicklung der Gestaltungsmethodik

3.2 Vorüberlegungen zum Lösungskonzept

Ein zentraler Ausgangspunkt für die Konzeptionierung und die Systematisierung der Gestaltungsmethodik ist das Ziel der Effizienzsicherung in Simulationsstudien. Dazu wird im Folgenden ein geeignetes Zielsystem vorgestellt. Daran anschließend wird das Grundkonzept der eigentlichen Methodik vorgestellt, bevor die relevanten Planungsfälle eingeführt und eingegrenzt werden. Abschnitt 3.2.4 geht zudem auf die im Weiteren Verlauf der Arbeit eingesetzte Methode des Analytischen Hierarchie Prozesses ein.

3.2.1 Zielsystem des Simulationsanwenders

Zur Bestimmung des Zielsystems des Simulationsanwenders wird von typischen unternehmerischen Zielen bei der Steigerung der Energieeffizienz in bestehenden Fabriken ausgegangen. Wie in Abschnitt 2.1.2 ausgeführt, sind das zumeist ökonomische Überlegungen, also letztlich Kostenvermeidung und Sicherung des Marktzugangs (z. B. durch Konformität zu Umweltregularien). Die Planung geeigneter Maßnahmen dazu stellt eine Form der Entscheidungsvorbereitung dar, welche „ein hohes Ausmaß und eine hohe Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung gewährleisten" [28, S. 18] soll. Der Simulationsanwender wiederum übernimmt einen Teil dieser Planung[18] und ist bestrebt einen Nutzen durch einen Sicherheitsgewinn, eine kostengünstigere Lösung, ein besseres Systemverständnis oder eine günstigere Prozessführung (vgl. [77, S. 23 f.]) zu stiften. Dem gegenüber stehen Aufwände für die Durchführung der Simulationsstudie, insbesondere der Datenbeschaffung, Modellierung und Simulation [77, S. 23 ff.].

Ausgehend von den voranstehenden Überlegungen lässt sich die Effizienzbewertung für den Simulationseinsatz genauer eingrenzen. Dazu wird zunächst ein **allgemeines Effizienzmaß** eingeführt, welches im Kern eine Ergebnis-Einsatz-Relation darstellt [149, S. 75]:

$$Effizienz = \frac{Ergebnis}{Einsatz} = \frac{Leistung}{Einsatz} = \frac{Output}{Input} \tag{3.1}$$

Die Messbarkeit des Ergebnisses bzw. des Outputs stellt sich für Simulationsstudien als nicht trivial dar. Das gilt insbesondere für solche Studien, die planungsunterstützend und prospektiv betrieben werden. Eine genaue Abgrenzung von Planungswissen aus Simulation oder anderen Planungsaktivitäten und dessen monetäre Bewertung ist kaum möglich. Dennoch ist zu konstatieren, dass das Effizienzmaß für den Simulationsanwender das Verhältnis des gestifteten Nutzens und des mit der Simulation verbundenen Aufwands beinhaltet.

Zusammenfassend ist die geschilderte **Beziehung der Effizienzmaße** für die Realisierung einer Effizienzmaßnahme, des assoziierten Planungsprojekts und der im Zuge dessen durchgeführte Simulationsstudie in Abbildung 3.2 gezeigt. Die Beeinflussung des Realisierungsaufwands durch den Planungsauf-

18 An dieser Stelle sei nochmals hervorgehoben, dass „Simulation […] kein Ersatz für Planung [ist]" [19, S. 6], sondern nur ein Teil ebendieser sein kann.

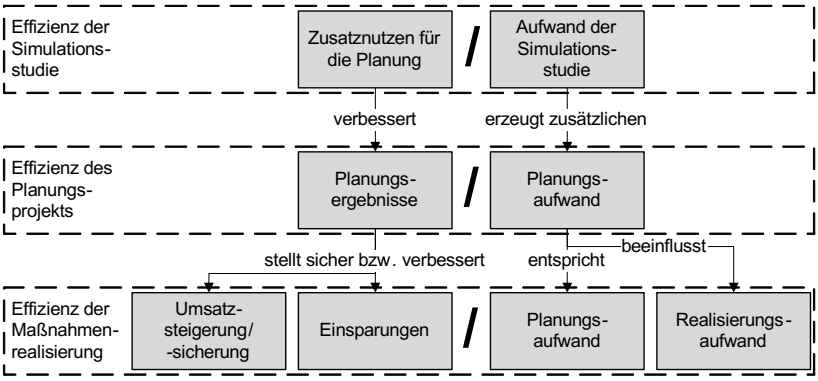


Abbildung 3.2: Beziehung der Effizienz von Maßnahmenrealisierung, Planungsprojekt und Simulationsstudie im Hinblick auf Gleichung (3.1)

wand folgt der Entwicklung von beeinflussbaren und festgelegten Kosten in Entwicklungsprojekten über die Zeit (vgl. [16, S. 57]). Aufgrund des indirekten Zusammenhangs soll die Effizienzbetrachtung im Rahmen der entwickelten Gestaltungsmethodik vorrangig die Simulationsstudie betreffen. Das Ergebnis einer Maßnahmenplanung bzw. -realisierung bleibt somit weitestgehend ohne Beachtung.

Konkret für die um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation ist somit der mögliche Zusatznutzen (Notwendigkeit und Genauigkeit der Modellierung von Energie) dem hinzukommenden Aufwand gegenüberzustellen. Entsprechend müssen zur Definition der Ausprägung einer Simulationsstudie folgende Fragen gestellt werden:

- Welche Energieflüsse sind abzubilden, um den gewünschten *Erkenntnisgewinn* zu ermöglichen?
- Welche *Genauigkeit* muss erreicht werden, um ausreichend Zusatznutzen zu stiften?
- Wie viel größer ist der *Datenbeschaffungsaufwand*?
- Wie viel größer ist der *Modellierungsaufwand*?
- Wie viel größer ist der *Simulationsaufwand*?

Es sei hervorgehoben, dass sich die Aufwandskategorien hier auf die von Kühn hervorgehobenen (vgl. [77, S. 23]), im Kern auch wesentlichsten, Aspekte beziehen. Das aus diesen Fragen abgeleitete, grundlegende **Zielsystem des Simulationsanwenders** ist in Abbildung 3.3 gezeigt. Es ist zu betonen, dass dieses im Rahmen von Simulationsstudien stets individuell und projektbezogen angepasst werden kann. Zugleich spiegelt es den Kernkonflikt

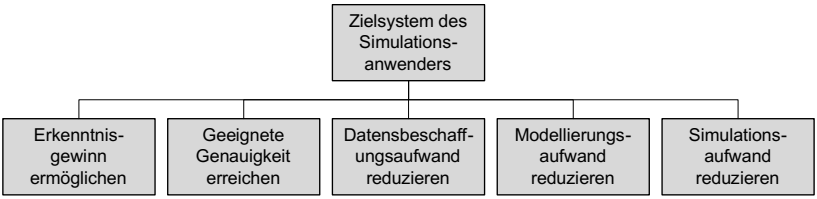


Abbildung 3.3: Grundlegendes Zielsystem des Simulationsanwenders

aus Abbildungsgenauigkeit und Zielerfüllung im Sinne des Simulationsergebnisses wider (vgl. Abschnitt 2.3.2 sowie [19, S. 6]). Weiterhin ist ersichtlich, dass die einzelnen Zielgrößen derart verknüpft sind, dass sie nicht für sich genommen minimiert oder maximiert werden sollten. Vielmehr wird eine Zweckmäßigkeit der Modellierung und Simulation angestrebt.

Die Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien beeinflusst das Erreichen dieses Zielsystems innerhalb des Projekts. Um dabei eine bessere Messbarkeit dieses Zusammenhangs zu erreichen, ist eine Konkretisierung von Subzielen für die Teilprobleme (Gestaltungsaspekte) vorzunehmen. Beispielsweise lässt sich für die Auswahl eines Energiemodells präzisieren, welcher Art der Erkenntnisgewinn sein soll (z. B. mit oder ohne Zeitbezug der Ergebnisgrößen) und mit welchem Maß die Genauigkeit bewertet werden kann (z. B. Auflösung des Zeitbezugs).

3.2.2 Grundkonzept der Gestaltungsmethodik

Ausgehend von dem in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten allgemeinen heuristischen Entscheidungsverfahren von Grünig und Kühn und den Ausführungen in Abschnitt 3.1.2 ist evident, dass die Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien einen vielteiligen Problemkomplex darstellt. In diesem bauen spätere Entscheidungen auf vorherige auf oder werden von diesen beeinflusst. Mit Bezug auf die in Abschnitt 3.1.2 vorgestellten Lösungsaspekte kann weiter konstatiert werden, dass für jedes Teilproblem Lösungsvarianten, Entscheidungskriterien, Umwelteinflüsse sowie Möglichkeiten zur Bewertung, Beurteilung und Entscheidungsunterstützung (kurz: Entscheidungsverfahren) zu bestimmen sind. Die Festlegung von Umfeldszenarien für die Teilprobleme muss dabei projektspezifisch erfolgen und kann nicht allgemeingültig vorweggenommen werden.

Dem folgend beinhaltet die entwickelte Gestaltungsmethodik ein **übergeordnetes Vorgehensmodell**, das die einzelnen planungs- und simulationsbezogenen Entscheidungen in Kontext miteinander sowie mit weiteren notwendigen Aktivitäten setzt. Dieses orientiert sich grundsätzlich am Ablauf

von Planungs- und Simulationsprojekten. Ergänzt wird es um **Lösungsmodule**, die alle Bestandteile des jeweils adressierten Teilproblems (s. o.) systematisieren und als Unterstützung zur Entscheidungsfindung fungieren.

Analog zu dem von Sproedt et al. vorgestellten Vorgehensmodell (vgl. Abschnitt 2.4.7 sowie [100]) wird neben der eigentlichen Durchführung der Simulationsstudie auch die Identifikation von Maßnahmen unterstützt. Dies folgt der Logik, dass bereits bei Definition eines Planungsgegenstands, eines Planungsfalls und eines konkreten Planungsinhalts wichtige Ausgangsinformationen für die Simulationsstudie geschaffen werden. Die möglichst frühe Strukturierung dieser Informationen kann daher die Ausprägungsbestimmung für einzelne Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien unterstützen.

Der Gesamtablauf teilt sich somit in zwei Phasen: die **fabrikplanerischen Vorarbeiten**, in denen planungsbezogene Entscheidungen zu fällen sind, und die **Durchführung der Simulationsstudie**, in der simulationsbezogene Entscheidungen getroffen werden. Im Ergebnis der Studie sowie weiterer Aktivitäten liegen alle notwendigen Informationen um eine Investitionsentscheidung[19], d. h. eine Entscheidung zur Unternehmensentwicklung, fundiert herbeizuführen und die Realisierung der geplanten Maßnahme voranzutreiben. Zusammenfassend ist das **Grundkonzept der Gestaltungsmethodik** in Abbildung 3.4 gezeigt, wobei die zentralen Bestandteile dunkel hervorgehoben wurden.

Bevor das Vorgehensmodell und die relevanten Gestaltungsaspekte für Simulationsstudien im Kontext der Arbeit in Abschnitt 3.3 eingeführt werden, wird im Folgenden zunächst genauer auf die identifizierten Planungsfälle eingegangen. Weiterhin werden in Abschnitt 3.2.4 die Grundlagen des Analytischen Hierarchie Prozesses vorgestellt, um dessen Einbindung als Entscheidungsverfahren in ausgewählten Lösungsmodulen methodisch zu fundieren. Die detaillierte Darstellung der einzelnen Schritte des Vorgehensmodells und der zugeordneten Lösungsmodule in Kapitel 4 gliedert sich wiederum nach den zwei in Abbildung 3.4 gezeigten Phasen. Abschnitt 4.2 beschäftigt sich vornehmlich mit planungsbezogene Entscheidungen im Zuge der fabrikplanerischen Vorarbeiten. In Abschnitt 4.3 liegt der Fokus hingegen auf simulationsbezogene Entscheidungen, die im Rahmen der Durchführung der Simulationsstudie zu treffen sind.

19 Der Argumentation in Abschnitt 2.1.1 folgend, werden Fabrikplanungsprojekte in der vorliegenden Arbeit als investitionsvorbereitende Maßnahmen aufgefasst, da sie eine langfristige, dauerhafte Anpassung der Fabrik zum Ziel haben.

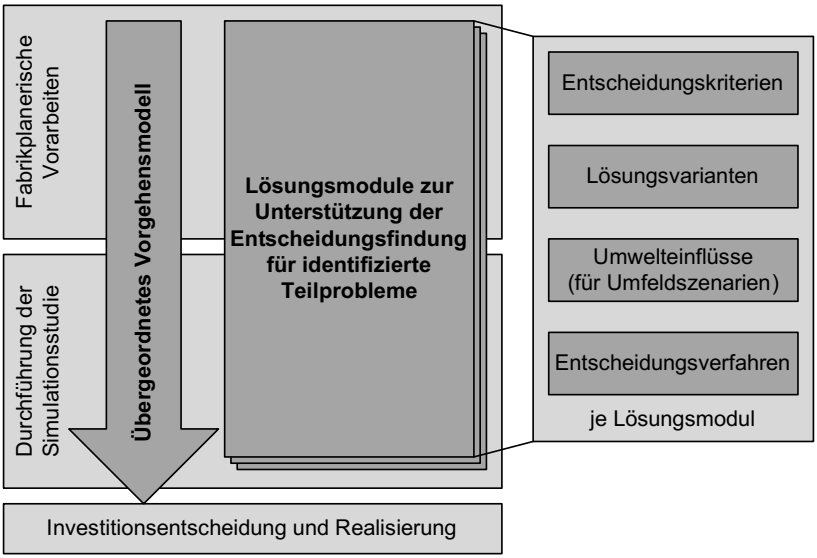


Abbildung 3.4: Grundkonzept der Gestaltungsmethodik

3.2.3 Planungsfälle und Konkretisierung des Betrachtungsfokus

Zur Klassifizierung der im Betrachtungsraum der Gestaltungsmethodik liegenden Planungsinhalte bedarf es geeigneter Planungsfälle. Da die vorliegende Arbeit auf Umplanungsprojekte fokussiert, ist die Nutzung der von VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1 vorgeschlagenen Planungsfälle (vgl. Abschnitt 2.1.1 sowie [24, S. 4]) hierzu unzweckmäßig. Zugleich wurde bereits in der Einleitung festgestellt, dass Umplanungen größeren Restriktionen unterliegen. Diese drücken sich u. a. in der **Bestimmtheit** von Elementmenge, Strukturen und Fertigungsauftragsmenge nach Förster und Wirth (vgl. Abschnitt 2.1.4 sowie [57, S. 11]) aus. Werden diese subjektiv mit einem Grad von 0 (unbestimmt) oder 1 (weitestgehend bestimmt) definiert, so ergeben sich aus den Kombinationsmöglichkeiten acht Planungsfälle [57, S. 11 ff.]. Dabei zeichnet sich ein hoher Grad an Bestimmtheit dadurch aus, dass im Planungsprojekt der jeweilige Aspekt als weitgehend unveränderbar behandelt wird. Ist der Bestimmtheitsgrad hingegen niedrig, so können im Rahmen der Planungen auch größere Veränderungen vorgesehen und schlussendlich realisiert werden.

Für die Einschätzung sind zumeist unternehmerische Interessen hinsichtlich der Höhe damit verbundener Investitionen, der Aufrechterhaltung des Produktionsbetriebs usw. relevant.

Bezüglich der Klassifizierung nach Förster und Wirth ist festzustellen, dass diese auf die Kernaspekte der Produktionssystemplanung beschränkt ist: den Materialfluss bzw. den Wertschöpfungsprozess. Für die Steigerung von Energieeffizienz in Fabriken stellt die **Anpassung von Infrastrukturanlagen bzw. -systemen** jedoch einen gebräuchlichen Ausgangspunkt dar. Die Bestimmtheit der Infrastruktur lässt sich in der von Förster und Wirth vorgeschlagenen Systematik nicht abbilden. Überdies ist festzustellen, dass Energieeffizienzsteigerungen üblicherweise nicht durch eine reine Strukturänderung der bestehenden Elemente des Materialflusssystems zu erreichen sind. Auch Förster und Wirth merken an, dass eine reine Strukturänderung selten und „ohne Veränderungen der Ressourcentypen und -anzahl kaum möglich ist“ [57, S. 15].

Daher wird in der vorliegenden Arbeit der Bestimmtheitsgrad für Elementmengen mit dem Bestimmtheitsgrad für Strukturen zum Bestimmtheitsgrad des Produktionssystems zusammengefasst. Weiterhin wird der Bestimmtheitsgrad für Infrastruktur- und Versorgungssysteme hinzugenommen. Die Fertigungsauftragsmenge wird vereinfachend dem Fertigungsablauf zugeordnet. Somit werden im Weiteren folgende Definitionen genutzt:

- **Bestimmtheitsgrad des Fertigungsablaufs (FA):** Menge, Sequenz, Terminierung und Betriebsmittel-Zuordnung von Fertigungsaufträgen
- **Bestimmtheitsgrad des Produktionssystems (PS):** Typen, Mengen und Struktur der Elemente des Materialflusssystems
- **Bestimmtheitsgrad der Infrastruktur- und Versorgungssysteme (IVS):** Typen/Medien, Mengen und Struktur der Elemente von Infrastruktur- und Energieversorgungssystemen

Werden die Werte dieser wiederum subjektiv zwischen 0 und 1 eingeschätzt, ergeben sich acht **Planungsfälle** für die Umplanung zum effizienteren Energieeinsatz (vgl. Tabelle 3.2). Deren Charakterisierung ist in Anhang C zusammengefasst. Die Benennung der Planungsfälle erfolgt dabei in Anlehnung an die Begrifflichkeiten in Abbildung 2.1.

Tabelle 3.2: Planungsfälle abgeleitet aus Kombination der Bestimmtheitsgrade

Nr.	Planungsfall	Bestimmtheitsgrad		
		Fertigungs-ablauf	**Produk-tions-system**	**Infra-struktur-/ Versor-gungs-systeme**
1	**Fabrik- und Anlagensteuerung**	≈ 1	≈ 1	≈ 1
2	**Produktionsplanung**	« 1	≈ 1	≈ 1
3	**Produktionssystemplanung**	≈ 1	« 1	≈ 1
4	**Produktionsprozessplanung**	« 1	« 1	≈ 1
5	**IVS-Planung**	≈ 1	≈ 1	« 1
6	**Produktions- und IVS-Planung**	« 1	≈ 1	« 1
7	**Fabriksystemplanung**	≈ 1	« 1	« 1
8	**Fabriksystem- und Produktionsplanung**	« 1	« 1	« 1

Mit Blick auf die Veränderungen, die in den Planungsfällen ausgehend von deren Bestimmtheit realisierbar sind, zeigt sich, dass zumeist nur ein Subset der von Müller et al. vorgestellten **Handlungsansätze** (vgl. Abbildung 2.4 sowie [13, S. 123 ff.]) anwendbar ist. Folglich ermöglicht die Abschätzung eines Bestimmtheitsgrads zu Beginn von Umplanungsprojekten die Auswahl eines Planungsfalls und damit die Eingrenzung potenziell realisierbarer Maßnahmen. Dazu kann die in Abbildung 3.5 gezeigte Assoziation als erste Stufe des Auswahlprozesses herangezogen werden. Ersichtlich wird zugleich, dass einerseits die Fülle von Möglichkeiten schwer überschaubar ist und andererseits auch abstrahierte Maßnahmen (d. h. Klassen inhaltlich vergleichbarer Maßnahmen bzw. anwendungsneutraler Maßnahmentypen) erst in zweiter Stufe von den Handlungsansätzen abzuleiten sind. Die Menge der Assoziationen nimmt dabei mit dem Grad der Unbestimmtheit zu. Dennoch kann die Verknüpfung für alle Planungsfälle grundsätzlich bis zu den abstrahierten Maßnahmen, wie von Müller et al. [13, S. 124 ff.] vorgestellt, bestimmt und aufgeschlüsselt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt jedoch zunächst eine **Eingrenzung auf die Planungsfälle 1 bis 4**. Somit werden jene Planungsfälle ausgeschlossen, die eine hohe Unbestimmtheit der Infrastruktur-/Versorgungssysteme aufweisen. Diese Vereinfachung wird mit der Feststellung der

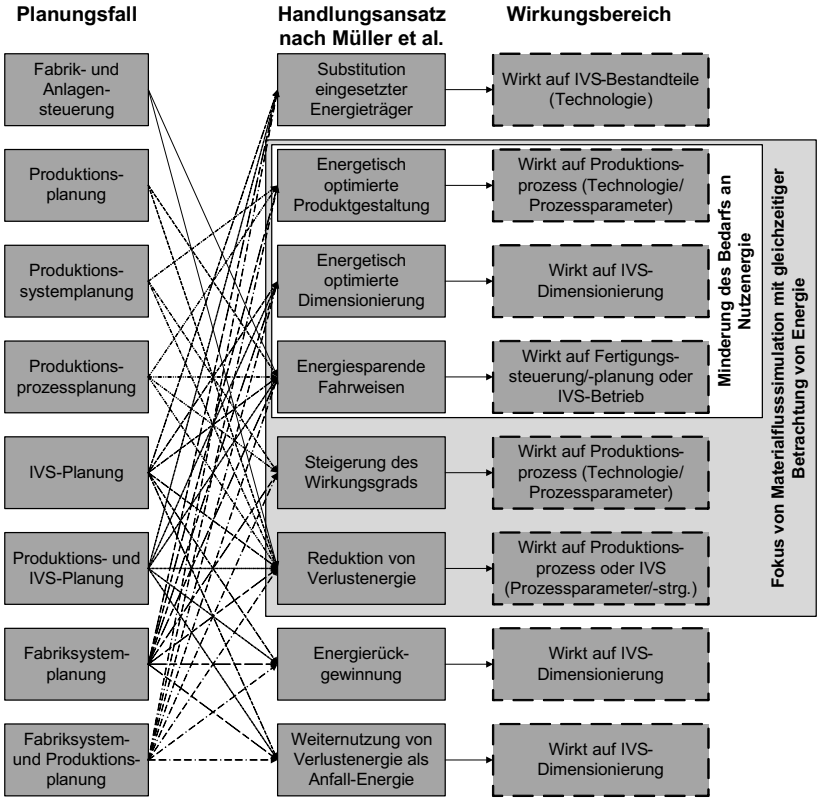


Abbildung 3.5: Assoziation von Planungsfällen mit möglichen Handlungsansätzen (in Anlehnung an Müller et al. [13, S. 123 ff.])

systematischen Literaturanalyse begründet, dass IVS in bisherigen Simulationsprojekten mit zeitgleicher Betrachtung von Material- und Energieflüssen seltener Beachtung fanden (vgl. Abschnitt 2.3.3 und Tabelle 3.1). Zugleich weist bereits die Erläuterung der Planungsfälle (vgl. Anhang C) darauf hin, dass Planungsfälle 7 und 8 üblicherweise mit einem Änderungsumfang verbunden sind, welcher im Rahmen der Einführung von Energieeffizienzmaßnahmen unüblich ist. Sie sind somit in sich schon untypisch für Umplanungsprojekte, welche hier im Fokus stehen.

Die Zuordnung von abstrahierten Maßnahmen zu den vier im Fokus befindlichen Planungsfällen stellt bereits eine erste methodische Hilfestellung der Gestaltungsmethodik dar. Sie ordnet sich in die fabrikplanerischen Vorarbeiten ein. Daher wird sie nicht hier, sondern in Abschnitt 4.2.3 genauer vorgestellt.

3.2.4 Zur Verwendung des Analytischen Hierarchie Prozesses (AHP)

Ausgehend von dem in Abschnitt 3.2.1 vorgestellten grundsätzlichen Zielsystem und der Vielzahl von möglichen Lösungsvarianten (Alternativen) für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien (vgl. Abschnitt 2.3) ist die projektbezogene Ausprägungsbestimmung nicht trivial. Die Analyse und Bewertung einzelner Alternativen kann dabei zwar mitunter intuitiv oder unterstützt von geeigneten Flussdiagrammen (analog zum Vorgehensmodell von Fritz, vgl. Abschnitt 2.4.2) erfolgen, das ist jedoch nicht immer zweckmäßig.

Der Klassifikation von Grünig und Kühn folgend (vgl. [63, S. 131 ff.]) ist die Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien als Entscheidung unter Mehrwertigkeit sowie unter Sicherheit bzw. unter Unsicherheit zu betrachten. Die Zielbildung und der letztendliche Entscheidungsprozess für derartige Entscheidungsprobleme lassen sich unter Einsatz von Verfahren für Multi-Attribut-Entscheidungen (MADM[20]) effektiv treffen [28, S. 185 f.]. Dazu schlagen Grünig und Kühn u. a. die sogenannte Nutzenwertmaxime vor [63, S. 132 ff.], welche im Kern einer **Nutzwertanalyse** entspricht (vgl. z. B. [28, S. 193 ff.], [150, S. 78 f.]). Eine umfassendere Übersicht bestehender MADM-Methoden wird von Götze präsentiert [28, S. 191]. In dieser sind die Methoden nach der Art der einbezogenen Informationen und der Quelle der Informationen geordnet. So ist die Nutzwertanalyse bezüglich dieser Kategorien wie folgt einsortiert: Informationen über die Attribute sind verfügbar und es handelt sich um kardinale Informationen. Nach Grünig und Kühn umfasst diese Methode nachstehende Teilaufgaben [63, S. 133 f.]:

1. Transformation der Konsequenzwerte in Nutzenwerte
2. Gewichtung der Konsequenzarten
3. Ermittlung der Gesamtkonsequenz

Dabei merken die Autoren bereits an, dass der Transformationsschritt aufwändig und schwierig sei [63, S. 134]. Götze ergänzt dazu, dass eine subjektive Beurteilung erforderlich ist, welche zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit unter Zuhilfenahme von Transformationsfunktionen erfolgen sollte [28, S. 195]. Die Ausführungen machen deutlich, dass die Bestimmung von Nutzenwerten einen Informationsbedarf schafft, welcher im Rahmen der Gestal-

20 aus dem Englischen: Multi-attribute decision-making [28, S. 185]

tungsmethodik nur schwer oder ungenau zu befriedigen ist. Das folgt insbesondere aus der Feststellung, dass sich Aufwand und Nutzen in diesem Kontext nicht unmittelbar messen lassen (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Der **Analytische Hierarchie Prozess (AHP)** stellt eine Alternative zur Nutzenwertmaxime bzw. zur Nutzwertanalyse dar. Vorteil dieses Verfahrens im Kontext der vorliegenden Arbeit ist, dass es die Vorteilhaftigkeit von Lösungsvarianten bezüglich einzelner Kriterien auf Grundlage von Paarvergleichen bestimmt (vgl. [28, S. 201]). Dieses Vorgehen erscheint hier praktikabler, da auch bei nicht exakter Messbarkeit zumeist eine relative Abschätzung getroffen werden kann. Zugleich ist festzustellen, dass der AHP eine international und transdisziplinär etablierte sowie in der Anwendung vorherrschende Technik zur Entscheidungsunterstützung ist [151]. Aus diesen Gründen wird der AHP im Rahmen der Gestaltungsmethodik mitunter für komplexere Entscheidungen herangezogen. Im Weiteren wird das grundsätzliche Vorgehen im Einsatz dieses Verfahrens erläutert.

Der AHP verfolgt das Ziel, eine komplexe, unstrukturierte Situation in ihre Komponenten aufzuteilen, diese in einer hierarchischen Ordnung zu arrangieren und ihnen numerische Werte hinsichtlich ihrer subjektiv eingeschätzten Bedeutung zuzuordnen, um letztlich eine Gesamtbeurteilung ableiten zu können [152, S. 5]. Der Entwickler dieses Verfahrens, Thomas L. Saaty, schlägt dazu in [152, S. 94 f.] nachstehende Schritte vor[21]:

1. *Problem definieren* und Lösungsvarianten spezifizieren
2. *Hierarchie* ausgehend von der obersten Ebene bis zu der Ebene, auf der interveniert wird, strukturieren
3. *Paarweise-Vergleichsmatrizen* mit relevanten Einflüssen eines Elements auf das jeweils darüber gelegene konstruieren
4. Bewertungen für *paarweise Vergleiche* zur Vervollständigung der Matrizen erarbeiten bzw. einholen
5. *Prioritäten* aus Matrizen *berechnen* und *Konsistenz prüfen*
6. *Schritte 3. bis 5. für alle Ebenen* und Gruppen der Hierarchie durchführen
7. Hierarchische Komposition (Synthese) der *Prioritäten-Vektoren* und der Kriteriengewichtungen bis zur untersten Ebene zur Berechnung des Gesamtpriorität-Vektors durchführen
8. *Konsistenz der gesamten Hierarchie* prüfen und ggf. Verbesserung der Eingangsdaten bzw. Iteration ab Schritt 2

21 Die genaue Aufgliederung der AHP-Schritte variiert dabei in unterschiedlichen Werken Saatys (vgl. z. B. [153], [154]), aber auch in den Erläuterungen dritter Autoren (vgl. z. B. [28, S. 201]). An dieser Stelle ist eine feiner gegliederte Variante dargestellt.

Bezogen auf den Einsatz des AHP als Bestandteil der entwickelten Gestaltungsmethodik, ist die **Problemdefinition** (Schritt 1) nicht vom Anwender vorzunehmen, sondern ergibt sich unmittelbar aus dem Vorgehensmodell und dem jeweiligen Lösungsmodul. Sie bezieht sich auf die Auswahl der Lösungsvariante eines identifizierten Gestaltungsaspekts der Simulationsstudie, für die abstrahierte Lösungen bereits identifiziert sind.

Die **Bildung von Hierarchien** (Schritt 2) dient der Unterstützung des menschlichen Denkprozesses und umfasst die Identifikation der Elemente eines Problems, die Gruppierung ebendieser in homogene Gruppen und das Arrangieren der Gruppen auf unterschiedlichen Ebenen [152, S. 28]. Eine ausführliche Diskussion methodischer Überlegungen bezüglich dieses Schritts findet sich in [152, S. 28 ff.], theoretische Grundlagen erläutert Saaty wiederum in [155]. Da die vorbereitende Strukturierung eine Anforderung für die Konzeptionierung und die Systematisierung der Gestaltungsmethodik darstellt, wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung dieser verzichtet. Stattdessen werden bei methodischem Einbindung des AHP im weiteren Verlauf der Arbeit auf Grundlage des allgemeinen Zielsystems (vgl. Abschnitt 3.2.1) lösungsmodulspezifische Zielsysteme vorgeschlagen und zusammen mit den Lösungsvarianten auf unterster Ebene in eine Hierarchie überführt. Das oberste Ziel (auch „Fokus“, vgl. [152, S. 28]) folgt dabei dem bereits diskutierten Ziel der Effizienz in der Simulationsanwendung. Zudem wird davon ausgegangen, dass der Anwender der Gestaltungsmethodik die vorgeschlagene Hierarchie kritisch bezüglich seiner individuellen Zielstellungen prüft und bei Bedarf Anpassungen vornimmt.

Die **Konstruktion von Matrizen zum paarweisen Vergleich** in Schritt 3 muss für jede Hierarchiegruppe erfolgen (vgl. Schritt 6). Dabei werden Kriterien gegenüber dem obersten Ziel ebenso in einer eigenen Matrix abgebildet, wie Lösungsvarianten in Bezug auf ein jeweils relevantes Kriterium. Beispielhaft sei dies an dem grundlegenden Zielsystem des Simulationsanwenders (Abbildung 3.3) verdeutlicht, für das in Tabelle 3.3 die Vergleichsmatrix aufgebaut wurde. Auf der Hauptdiagonalen ist dabei überall 1 einzutragen, da ein Element sich selbst gegenüber nicht priorisiert werden kann. Für jedes verglichene Kriterium ist analog eine Matrix aufzubauen, in der betrachtete Lösungsvarianten bzw. Unterkriterien miteinander verglichen werden.

Tabelle 3.3: Matrix zum paarweisen Vergleich der Kriterien für effiziente Simulationsanwendung

	Kriterien	1	2	3	4	5
1	**Erkenntnisgewinn**	1				
2	**Genauigkeit**		1			
3	**Datenbeschaffungsaufwand**			1		
4	**Modellierungsaufwand**				1	
5	**Simulationsaufwand**					1

Die **Priorisierung im paarweisen Vergleich** wurde von Saaty und anderen Autoren ausführlich erläutert und theoretisch fundiert (vgl. [28, S. 202 ff.], [155], [156, S. 49 ff.], [157]). Ausgangspunkt stellt dabei die in Tabelle 3.4 gezeigte Skala dar. Sie ermöglicht die Abschätzung der Vorteilhaftigkeit zweier Lösungsvarianten bzw. Kriterien gegeneinander. In Schritt 4 werden die Paare anhand dieser Skala miteinander verglichen und die Werte bzw. deren Reziproke entsprechend oberhalb und unterhalb der Diagonalen eingetragen. Dies wird gemäß Schritt 6 für alle zuvor konstruierten Matrizen durchgeführt.

Tabelle 3.4: Skala zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit im Paarvergleich übersetzt nach [155]

Intensität der Bedeutung	Definition	Erläuterung
1	Gleiche Bedeutung	Zwei Aktivitäten tragen gleich viel zum Ziel bei
3	Geringe Bedeutung eines über den anderen	Erfahrungen und Beurteilung favorisieren eine Aktivität etwas über eine andere
5	Erhebliche oder starke Bedeutung	Erfahrungen und Beurteilung favorisieren eine Aktivität deutlich über eine andere
7	Nachgewiesene Bedeutung	Eine Aktivität ist deutlich favorisiert und ihre Dominanz ist in der Praxis nachgewiesen.

Tabelle 3.4: (Fortsetzung)

Intensität der Bedeutung	Definition	Erläuterung
9	Absolute Bedeutung	Die Belege, nach denen eine Aktivität einer anderen gegenüber zu favorisieren ist, sind in höchstmöglichen Maße bestätigend
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte zwischen zwei angrenzender Wertungen	Wenn Kompromisse notwendig sind
Reziproke voranstehender Werte über 0	Wenn Aktivität i im Vergleich zu einer Aktivität j eine der oben angeführten Werte über 0 annimmt, dann hat j den reziproken Wert im Vergleich mit i	
Rationale Zahlen	Aus der Skala abgeleitete Verhältnisse	Wenn Konsistenz zwingend erforderlich ist, um n numerische Werte zur Befüllung der Matrix zu erhalten

Zur **Berechnung der Prioritäten** und zur **Prüfung der Konsistenz** in Schritt 5 schlägt Saaty die Verwendung des maximalen Eigenwerts sowie des dazugehörigen Eigenvektors vor [155], [156, S. 49 ff.]. Die Berechnung dieser stellte in der Vergangenheit eine rechentechnische Herausforderung dar, die mit moderner Rechentechnik jedoch unterdes performant gelöst werden kann, etwa unter Verwendung der Potenzmethode (vgl. [158, S. 813 ff.]). Insofern wird im Kontext der vorliegenden Arbeit auf die Verwendung von Näherungsverfahren, wie sie auch von Saaty vorgeschlagenen werden (vgl. [156, S. 19]), verzichtet. Die Prioritäten der verglichenen Elemente als Vektor v_{norm} entspricht dabei dem, mit der sogenannten Einsnorm, normierten Eigenvektor [156, S. 51]. Dieser wird wie folgt gebildet (Eigenvektor v, Vektorelement v_i in Eigenvektor v, Index der Vektorelemente i, Anzahl der verglichenen Elemente n):

$$v_{\text{norm}} = \frac{v}{\sum_{i=1}^{n} v_i} \tag{3.2}$$

Die Konsistenz wird wiederum mit nachstehendem Maß berechnet [156, S. 21] (Konsistenzindex *CI*, größter Eigenwert λ_{max}, Anzahl der verglichenen Elemente n):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{3.3}$$

Konsistenz wird als gegeben angenommen, wenn der Quotient (Konsistenzverhältnis *CR*) aus *CI* und einem von der Matrixgröße abhängigen Zufallsindex *RI* einen Wert von 0,10 nicht übersteigt [156, S. 21]. *RI* kann Tabelle 3.5 entnommen werden; die beschriebene Forderung ist nachstehend gezeigt:

$$CR = \frac{CI}{RI} \overset{!}{\leq} 0{,}10 \tag{3.4}$$

Tabelle 3.5: Matrixgröße und zugehöriger Zufallsindex RI [156, S. 21]

Matrixgröße	1	2	3	4	5	6	7	8
Zufallsindex RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41
Matrixgröße (Fortsetzung)	9	10	11	12	13	14	15	
Zufallsindex RI (Fortsetzung)	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59	

Gemäß Schritt 6 sind die Schritte 3, 4 und 5 den vorangehenden Ausführungen folgend für alle Ebenen zu wiederholen. Im anschließenden Schritt 7 sind die normierten **Prioritätsvektoren** mit den Gewichten des jeweils betrachteten Kriteriums zu multiplizieren, wobei von der höchsten bis zur niedrigsten Hierarchieebene vorgegangen wird [152, S. 85 ff. & 94]. Somit werden die Prioritäten der betrachteten Lösungsvarianten je übergeordnetem Kriterium bestimmt. Diese sind je Alternative aufzuaddieren, um einen einzigen Prioritätswert zu ermitteln. Eine Normierung dieser auf den Maximalwert ergibt die **idealisierten Prioritäten**.

Um die **Validität der entwickelten Hierarchie** zu prüfen, schlägt Saaty in Schritt 8 die Berechnung eines aggregierten Konsistenzverhältnis *CRH* vor. Dazu sind die Konsistenzverhältnisse (CI_i) des i-ten bewerteten Kriterien

jeweils mit der zugehörigen Priorität (r_i) zu multiplizieren und die Ergebnisse aufzuaddieren (Summe M; Anzahl Kriterien n_K). Analog dazu muss dies auch für die Zufälligkeitsindizes der entwickelten Matrizen (RI_i) durchgeführt werden ($\overline{M}$). Beide Summen sind anschließend durcheinander zu dividieren, wobei der Quotient nicht kleiner als 0,10 sein soll [152, S. 95]. In Anlehnung an [159] kann der Zusammenhang wie folgt ausgedrückt werden:

$$CRH = M / \bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^{n_K} CI_i \cdot r_i}{\sum_{i=1}^{n_K} RI_i \cdot r_i} \overset{!}{\leq} 0{,}10 \tag{3.5}$$

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so muss geprüft werden, ob die Eingangsdaten verbessert werden können, indem etwa die Fragestellungen zu den paarweisen Vergleichen in Schritt 4 verbessert werden. Bringt dies keinen Erfolg, so ist es wahrscheinlich, dass die Hierarchie nicht korrekt ist und es sollte von Schritt 2 ausgehend eine Iteration über den gesamten Prozess erfolgen [152, S. 95].

An dieser Stelle wird auf eine beispielhafte Darstellung des AHP an einem konkreten Anwendungsfall verzichtet. Vielfältige Beispielanwendungen finden sich sowohl in Publikationen Saatys als auch in denen anderer Autoren (z. B. [28], [152]–[157], [159]–[161]). Für den praktischen Einsatz der Gestaltungsmethodik wurden zudem softwaregestützte Tabellenkalkulationen unter Nutzung der o. g. Potenzmethode zur Berechnung von maximalem Eigenwert und Eigenvektoren entwickelt, die alle notwendigen Berechnungen realisieren. Überdies ist in Anhang D.4 das Ergebnis der Kriterienbewertung mittels AHP für ein entwickeltes Lösungsmodul gezeigt, das als teilweises Beispiel dient.

Grundsätzlich kann der AHP von einer Einzelperson durchgeführt werden, ermöglicht zugleich aber auch den **Einsatz in Gruppenprozessen** [152, S. 224 ff.]. Diese Eigenschaft spricht für seine Eignung bei der Entscheidungsfindung im Rahmen der Gestaltungsmethodik, da die Einschätzung bestehender Lösungsvarianten für einen Gestaltungsaspekt mitunter die Integration verschiedener Sichtweisen erfordert, um ein zufriedenstellendes Projektergebnis erreichen zu können.

Ferner merkt Götze an, dass die Kenntnis über alle einzubeziehenden Lösungsvarianten gegeben sein muss, da andernfalls die **Gefahr von Stabilitätsproblemen** aufgrund sich nachträglich ändernder Rangfolgen besteht [28,

S. 216]. Da es ein Ziel der Gestaltungsmethodik ist, die Identifikation der Lösungsvarianten in geeigneter Abstraktion vorwegzunehmen, wird dieses Risiko soweit möglich abgeschwächt. Wie hoch es ist, bleibt letztlich vom Anwendungsfall und den Randbedingungen im Einsatz der Gestaltungsmethodik abhängig. Dabei ist anzunehmen, dass für den Anwender unbekannte Lösungsvarianten mit größeren Hindernissen in der Realisierbarkeit verbunden sind, nicht zuletzt aufgrund mangelnder Kenntnis dieser. Dadurch werden sie oftmals ohnehin eine niedrigere Priorisierung erfahren.

3.3 Struktur und Inhalt des Vorgehensmodells

Die vorherigen Abschnitte zeigen den Handlungsbedarf auf und stellen einige Vorüberlegungen zum Lösungskonzept vor. Das Vorgehensmodell ist diesen zufolge ein zentraler Bestandteil der Gestaltungsmethodik. Es setzt die relevanten Arbeitsschritte in Kontext mit planungs- bzw. simulationsbezogenen Entscheidungen. Dessen Synthese und grundsätzlicher Aufbau werden im Folgenden präsentiert. Abschnitt 3.3.2 untersetzt dies mit einer überblicksweisen Darstellung der als relevant identifizierten Gestaltungsaspekte.

3.3.1 Synthese und Folge der Arbeitsschritte

Ein Ausgangspunkt für die Entwicklung des Vorgehensmodells kann in der Struktur des **Problemlösungszyklus** gefunden werden, wie sie von Förster und Wirth zur Beschreibung der „projektneutrale[n] technische[n] Ablauforganisation des Planungsprozesses“ dargestellt wird [57, S. 17]. Sie ist in Abbildung 3.6 gezeigt, wobei bezugnehmend auf Abbildung 1.1 der Fokus der Umplanung zur Systemanpassung und die Simulation zur Planungsunterstützung angetragen ist. Ersichtlich ist, dass die eigentliche Simulationsstudie trotz ihrer Komplexität sich vor allem auf zwei Schritte, die Konzept- und/oder Systemanalyse sowie die Konzept- und/oder Systembewertung, konzentriert. Entsprechend sind die vorgelagerten Schritte gemäß dem in Abbildung 3.4 gezeigten Grundkonzept der Gestaltungsmethodik als fabrikplanerische Vorarbeiten zu betrachten. Die Auswahl des optimalen Konzeptes und/oder Systems ist wiederum im Grundsatz bedeutungsgleich mit der ebenda angeführten Investitionsentscheidung, an welche sich die Realisierung anschließt.

Für die Entwicklung des Vorgehensmodells galt es, die gezeigten Schritte so zu konkretisieren und zu strukturieren, dass die identifizierten planungs- und simulationsbezogenen Entscheidungen in abgestimmter Folge getroffen werden können. Der Fokus der Schritte zu den **fabrikplanerischen Vorarbeiten** liegt dabei auf der Identifikation einer geeigneten Energieeffizienzmaß-

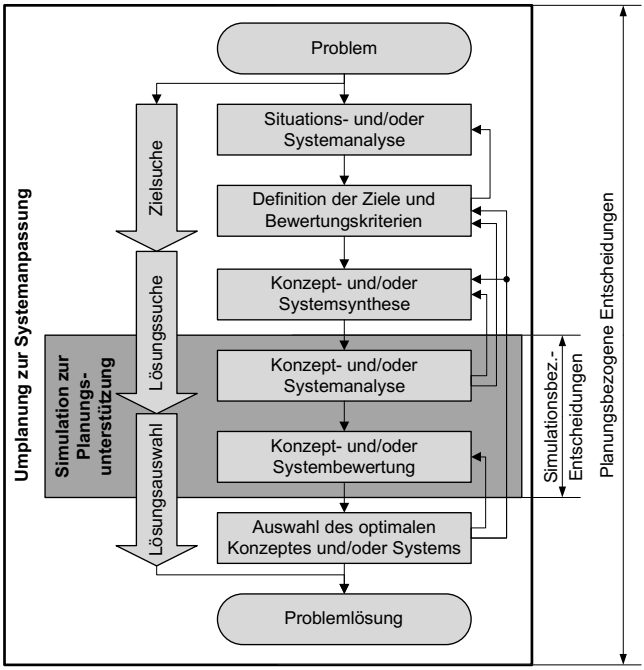


Abbildung 3.6: Struktur des Problemlösungszyklus und Einordnung zu treffender Entscheidungen in Anlehnung an [57, S. 18]

nahme, aus der heraus ein Lösungskonzept für die Effizienzsteigerung im betrachteten System entwickelt wird. Dieses ist wiederum mittels Simulation weiter zu untersuchen. Dazu wird eine Arbeitsfolge auf Grundlage der in Abschnitt 3.2.3 eingeführten Systematik der Planungsfälle vorgeschlagen.

Die Schritte zur **Durchführung der Simulationsstudie** orientieren sich, in Analogie zu dem von Solding gewählten Ansatz (vgl. [86, S. 56]), indes weitgehend an dem bestehenden Standard der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (vgl. Abschnitt 2.4.1 sowie [19]). Dieser Ablauf ist weithin akzeptiert und einschlägige Literatur zur Anwendung der Materialflusssimulation (z. B. [78], [138], [162]) bezieht sich auf diesen. Den Ausführungen in Abschnitt 2.4.1 folgend, sind für die Entwicklung des Vorgehensmodells jedoch insbesondere Aspekte zur integrierten Betrachtung von Energieflüssen sowie methodische Unterstützung zur Ausprägungsbestimmung für relevante Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien zu ergänzen.

Das letztlich entwickelte **Vorgehensmodell** ist in Abbildung 3.7 gezeigt und besteht aus 13 Schritten[22]. Im linken Teil sind die entwickelten Lösungsmodule für betrachtete planungs- bzw. simulationsbezogene Entscheidungen gezeigt. Die in den einzelnen Schritten generierten Ergebnisse des Umplanungsprojekts sind wiederum auf der rechten Seite gezeigt. Entgegen etwa der Vorgehensmodelle von Thiede (vgl. Abschnitt 2.4.5), Sproedt et al. (vgl. Abschnitt 2.4.7) oder Beier (vgl. Abschnitt 2.4.8) wird auf die explizite Definition von Iterationsschleifen verzichtet. Dies folgt dem Ansatz, den die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 vorschlägt, nach dem „alle [E]rgebnisse […] einer Verifikation und Validierung" unterliegen [19, S. 18]. Einzelne Schritte sind demnach „in Abhängigkeit von der Qualität der [E]rgebnisse wiederholt [zu] durchlaufen" [19, S. 18].

Für das Vorgehensmodell wird davon ausgegangen, dass ein Planungsprojekt zunächst ohne (z. B. bei Erweiterung des Produktionsprogramms) oder mit direktem Effizienzbezug (z. B. als Forderung für jährliche Energieeinsparungen) initiiert wird. Daraufhin sind in **Schritt 1** alle fundamentalen Restriktionen für das spezifische Planungsprojekt festzulegen. Dies dient einerseits der Definition von Zielen sowie Bewertungskriterien und andererseits der Festlegung von Energieeffizienzfokus und Betrachtungsbereich.

In **Schritt 2** wird eine erste Situations- bzw. Systemanalyse durchgeführt, auf Grundlage derer die Bestimmtheitsgrade gemäß Abschnitt 3.2.3 für den Betrachtungsbereich zu bestimmen sind. Aus letzteren wird dann der Planungsfall bestimmt und plausibilisiert.

Schritt 3 hat die Auswahl einer möglichen Effizienzmaßnahme auf Grundlage relevanter Handlungsansätze zum Ziel. Ausgangspunkt dafür ist die Assoziation von Planungsfällen und Handlungsansätzen, die in Abschnitt 3.2.3 vorgestellt wurde. Im Ergebnis steht letztlich eine ausgewählte abstrahierte Maßnahme und ihre inhaltliche Konkretisierung als Planungsziel.

Der **Schritt 4** umfasst die eigentliche Konzept- bzw. Systemsynthese, in der auf Grundlage des zuvor ausgewählten abstrakten Handlungsansatzes eine konkrete Planungslösung auszuarbeiten ist. Hierunter fallen alle relevanten fabrikplanerischen Aufgaben, die notwendig sind, um die angestrebte Systemanpassung zu spezifizieren. Das resultierende Planungsergebnis stellt somit den Sachverhalt dar, der mutmaßlich mittels Simulation zu untersuchen ist und später zu realisieren wäre.

22 Das im Weiteren vorgestellte Vorgehensmodell beruht auf den in [163] publizierten Vorarbeiten.

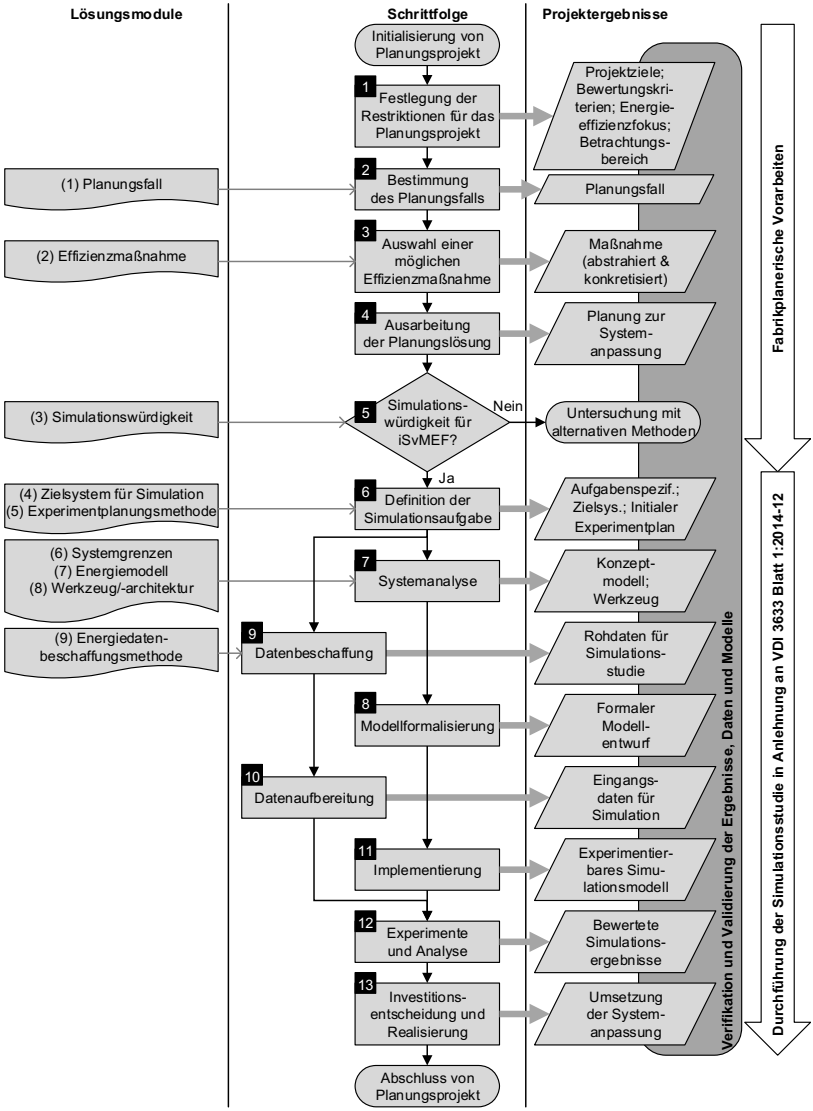


Abbildung 3.7: Übergeordnetes Vorgehensmodell der Gestaltungsmethodik

Gemäß Sproedt et al. ist der Einsatz von Simulation, insbesondere bei Erweiterung um energetische Betrachtungen, auf Grundlage einer Aufwand-Nutzen-Abschätzung abzuwägen (vgl. Abschnitt 2.4.7 sowie [100]). Dem folgend wird

in **Schritt 5** des Vorgehensmodells geprüft, inwieweit speziell die integrierte Simulation von Material- und Energieflüssen (iSvMEF)[23] empfehlenswert scheint. Der Ablauf endet in dem Fall mit dem Ergebnis, dass eine Untersuchung mit alternativen Methoden empfehlenswerter scheint als die iSvMEF.

Andernfalls wird eine Simulationsstudie in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 durchgeführt (s. o.). Dazu erfolgt in **Schritt 6** zunächst die Definition der Simulationsaufgabe ausgehend von der zuvor erfolgten Planung zur Systemanpassung. Für die Gestaltungsmethodik sind hierbei, neben der eigentlichen Aufgabenspezifikation, insbesondere die Festlegung des Zielsystems für die Simulationsstudie sowie die Bestimmung eines initialen Experimentplans von Bedeutung.

Eine tiefer gehende Systemanalyse als Grundlage zur Modellierung ist Inhalt von **Schritt 7**. Dazu sind Ergebnisse der fabrikplanerischen Vorarbeiten zu verwerten und bei Bedarf zu ergänzen. Im Vordergrund stehen dabei Festlegungen zur Detaillierung der zu simulierenden Elemente (Systemgrenzen und Energiemodell) sowie zur softwaretechnischen Umsetzung (Werkzeug/ -architektur). Im Ergebnis steht ein Konzeptmodell des betrachteten Systems sowie ein Konzept für die softwaretechnische Umsetzung (Werkzeug).

In **Schritt 8** erfolgt eine Formalisierung des zuvor entwickelten Konzeptmodells. Wenzel et al. merken dazu an, dass die Notwendigkeit dieses durchaus aufwändigen Schritts vielfach hinterfragt wird, jedoch weisen sie zugleich auf seine qualitätssteigernde Bedeutung hin [162, S. 134]. Für die Gestaltungsmethodik ist dabei die Ablauflogik zur ergänzenden Modellierung von Energieflüssen (vgl. auch Abschnitt 3.3.2) besonders relevant. Je nach Simulationsaufgabe kann auch die Entwicklung von Algorithmen zur PPS notwendig sein.

Parallel, jedoch in stetem Abgleich zur Systemanalyse und Modellformalisierung, erfolgt in **Schritt 9** die Datenbeschaffung. Im Rahmen der Gestaltungsmethodik sind vor allem Energiedaten von Belang, auch wenn darüber hinaus noch weitere simulationsrelevante Daten zu beschaffen sind. Die zentrale Herausforderung ist es dabei Datenbeschaffungsmethoden so auszuwählen und einzusetzen, dass alle relevante Daten in der richtigen Genauigkeit bei möglichst geringem Aufwand gesammelt werden.

23 Die von Thiede identifizierten Paradigmen zur Simulation von Energieflüssen in Produktionssystemen (vgl. Abbildung 2.12) zeigen, dass auch die Materialflusssimulation mit Energiebetrachtung (Paradigma A) eine Form der um energetische Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation darstellt. Da die alleinige Nachbehandlung von Simulationsergebnisdaten jedoch kaum Einfluss auf die eigentliche Simulationsstudie hat, zielt die Gestaltungsmethodik vornehmlich auf die integrierte Simulation von Material- und Energieflüssen (nach Paradigma B oder C) ab. Folglich wird in Schritt 5 geprüft, inwieweit Simulationswürdigkeit für diese besteht.

Ebenso parallel und unter Rückgriff auf die Ergebnisse der Datenbeschaffung werden in **Schritt 10** die Rohdaten in Eingangsdaten für die Simulation transformiert. Dabei sind die aufbereiteten Daten vor allem dadurch gekennzeichnet, dass sie sich unmittelbar im ablauffähigen Simulationsmodell verwenden lassen. Dazu relevanten Anforderungen an die Datenaufbereitung ergeben sich in der Modellformalisierung sowie der Implementierung.

Die Modellbildung wird mit der Implementierung in **Schritt 11** abgeschlossen. Darin werden die formalen Modelle in ein ablauffähiges Simulationsmodell bzw. eine Menge selbiger überführt. Hierzu können universelle Programmiersprachen oder spezifische Simulationswerkzeuge genutzt werden [19, S. 31 ff.], wobei bislang jedoch überwiegend letztgenannte Anwendung finden (vgl. auch Abschnitt 2.3.3).

In **Schritt 12** wird das Simulationsmodell bzw. werden die Simulationsmodelle genutzt, um die zuvor ausgeplante Maßnahme bzw. das System zu untersuchen. In diesem Schritt erfolgt ein Rückgriff auf den initial definierten Experimentplan (Schritt 6), zugleich muss auf Grundlage neuer Erkenntnisse der Experimentplan bei Bedarf erweitert oder verändert werden. Alle Simulationsexperimente sind anhand des Zielsystems für die Simulation so auszuwerten, dass eine Bewertung der Maßnahme (bzw. Varianten dieser) erfolgen kann. Diese Bewertung stellt zugleich das Hauptergebnis der Simulationsstudie dar.

Abschließend und somit nicht mehr unmittelbar Bestandteil der Simulationsstudie erfolgt in **Schritt 13** eine Investitionsentscheidung (entspricht der Auswahl des optimalen Konzeptes und/oder Systems in Abbildung 3.6) und ggf. eine Realisierung der Maßnahme. Eine Überprüfung der Übereinstimmung von Planungsergebnis und Realisierungsergebnis (wie etwa von Beier vorgeschlagen, vgl. Abschnitt 2.4.8 sowie [97, S. 161 ff.]) kann ebenfalls angeschlossen werden. Damit erfolgt der Abschluss des Planungsprojekts.

3.3.2 Gestaltungsaspekte der um energetische Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation

Zuvor wurde die grundsätzliche Arbeitsfolge des entwickelten Vorgehensmodells vorgestellt. Bevor diese im anschließenden Kapitel 4 untersetzt und dezidiert auf die entwickelten Lösungsmodule eingegangen wird, sind im Folgenden zunächst die identifizierten Gestaltungsaspekte dargestellt. Weiterhin wird ein Überblick zum Inhalt der Module gegeben und u. a. eine allgemeine Darstellungsform zu ihrer Zusammenfassung eingeführt.

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 3.1.2 konnten ausgehend von den Erkenntnissen des Literaturstudiums verschiedene **Gestaltungsaspekte** identifiziert werden, die im Verlauf einer um energetische Betrachtungen erwei-

terten Materialflusssimulationsstudie einer Entscheidung hinsichtlich ihrer zu realisierenden Ausprägung bedürfen. Diese entstammen einerseits unmittelbar aus den bestehenden Vorgehensmodellen (vgl. Abschnitt 2.4), genauer den Stellen, an denen diesen zufolge Entscheidungen zu treffen sind. Andererseits ergeben sie sich aus Aspekten, die in den bekannten Simulationsstudien mit signifikanten Unterschieden realisiert sind (vgl. Abschnitt 2.3). Für die vorliegende Arbeit sind somit die folgenden Gestaltungsaspekte relevant:

- **Zielsystem:** Nach VDI-Richtlinie 3633 stellt sich das Zielsystem im Kontext der Materialflusssimulation als „Vielzahl von (markt- oder betriebsorientierten) Teilzielen eines Gesamtziels dar, die in Wechselwirkung zueinander stehen", wobei „Kenngrößen zur Charakterisierung des Systemverhaltens hinsichtlich der Teilziele benötigt" werden [18, S. 22]. Auf die um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation bezogen, stellt sich daher explizit die Frage nach geeigneten Kennzahlen. Ansätze und Unterschiede in der Anwendung wurden dazu bereits in den Abschnitten 2.3.2 und 2.3.3 gezeigt.
- **Experimentplanungsmethode:** Die systematische Literaturanalyse (vgl. Abschnitt 2.3.3) hat bereits Unterschiede im Einsatz verschiedener Methoden zur Experimentplanung gezeigt. Auch in den bestehenden Vorgehensmodellen finden sich diverse, wenn doch meist unkonkrete Hinweise hierzu (vgl. Abschnitt 2.4).
- **Systemgrenzen der Energieflusssysteme:** Die bekannten Simulationsstudien unterscheiden sich hinsichtlich der einbezogenen Strukturebenen der Energieflusssysteme. Inwieweit dabei einzelne Maschinen weiter untergliedert bzw. Infrastrukturelemente einbezogen werden, ist meist eng mit dem eingesetzten Modellierungsansatz verknüpft (vgl. z. B. [90, S. 60 ff.] und [97, S. 103 ff.]).
- **Energiemodell:** Analog zur Experimentplanungsmethode wurden auch diverse Möglichkeiten zur Modellierung von Energieflüssen identifiziert (vgl. Abschnitte 2.3.2 und 2.3.3). In den Vorgehensmodellen wurde dazu zumeist eine Vorgabe anhand der zugehörigen Modellierungsansätze gemacht (vgl. Abschnitt 2.4).
- **Werkzeug/-architektur:** Neben den von Thiede vorgeschlagenen Simulationsparadigmen (vgl. Abschnitt 2.3.2; entspricht Werkzeugarchitektur), zeigt auch die systematische Literaturanalyse Unterschiede zur Art der eingesetzten Software auf (vgl. Abschnitt 2.3.3). Die bekannten Vorgehensmodelle zur um energetische Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation wiederum setzen durchweg auf einen Architekturansatz, wenn nicht auf ein einziges Werkzeug (vgl. Abschnitt 2.4).

- **Ablauflogik zur Interaktion der einzelnen Flusssysteme:** Insbesondere die Dissertationen im Themenbereich weisen mitunter große Detailtiefe bei der Darstellung der Modellierungsansätze auf (vgl. [23], [84], [86], [89]–[91], [93], [94], [96], [97]). Den dortigen Ausführungen lassen sich Unterschiede dazu entnehmen, wie klassische Materialflusssystemelemente (wie sie in den marktverfügbaren Simulationslösungen Anwendung finden) mit den zusätzlich entwickelten Energieflussmodellen interagieren. Wie bei den Energiemodellen beinhalten die meisten dokumentierten Ansätze bereits eine Festlegung hierzu, die aber in einer gänzlich freien Simulationsstudie neu zu treffen bzw. ggf. auch problembezogen zu überdenken ist.
- **Energiedatenakquisemethode:** Zur Simulation der modellierten Energieflüsse sind Daten aus dem realen System unerlässlich. Die zur Datenakquise eingesetzte Methode ist dabei in geeigneter Weise zu wählen. Obwohl die bekannten Vorgehensmodelle (vgl. Abschnitt 2.4) zumeist von Messungen ausgehen, zeigen andere relevante Arbeiten auch Alternativen auf (z. B. [88, S. 67 ff.], [96, S. 52 ff.], [101]).

In Ergänzung zu den Gestaltungsaspekten von Simulationsstudien gibt es zudem einige relevante **Planungsaspekte**. Deren strukturierte Klärung kann die Lösungssuche vereinfachen und spätere Entscheidungen zur Ausprägung der Simulationsstudie unterstützen. Hierunter fallen der Planungsfall und die Effizienzmaßnahme (vgl. Abschnitt 3.2.3) sowie die grundsätzliche Simulationswürdigkeit.

Zu den meisten dieser Planungs- und Gestaltungsaspekte wurde ein **Lösungsmodul** zur Entscheidungsunterstützung entwickelt. Eine Übersicht der im Rahmen der Arbeit entwickelten Module findet sich in Tabelle 3.6. Für den Gestaltungsaspekt Ablauflogik zur Interaktion der einzelnen Flusssysteme kann hingegen nicht unmittelbar ein Lösungsmodul entwickelt werden, da die dahinterstehende Entscheidung keine Formulierung eines allgemeinen und praktikablen Entscheidungsverfahren ermöglicht.

Tabelle 3.6: Übersicht der entwickelten Lösungsmodule

Nr.	Schritt	Abschnitt	Bezeichnung	Beschreibung
1	2	4.2.2	Planungsfall	Das Lösungsmodul unterstützt bei der Identifikation des Planungsfalls unter Beachtung bestehender Restriktionen bezüglich realisierbarer Änderungen. Die dahinterliegende planungsbezogene Entscheidung ist Ausgangspunkt für den Folgeschritt.
2	3	4.2.3	Effizienzmaßnahme	Das Lösungsmodul unterstützt die Auswahl eines geeigneten, abstrahierten Handlungsansatzes, der ausgehend vom Planungsfall als möglich und in Bezug auf die Nebenbedingungen des Planungsprojekts als realisierbar erscheint. Die dahinterliegende planungsbezogene Entscheidung stellt die Grundlage für die anschließende Ausarbeitung einer Planungslösung dar.
3	5	4.2.5	Simulationswürdigkeit	Das Lösungsmodul unterstützt die planungsbezogene Entscheidung, ob die integrierte Simulation von Material- und Energieflüssen eine geeignete und effiziente Methode im Planungsprojekt ist.
4	6	4.3.1	Zielsystem für Simulation	Das Lösungsmodul unterstützt die Auswahl von Zielkriterien, die mittels Simulation evaluiert werden sollen, sowie deren Kombination in ein widerspruchsfreies Zielsystem. Die dahinterliegende simulationsbezogene Entscheidung konkretisiert das Anforderungsprofil an die Modellierung und das Experimentieren.
5	6 (und 12)	4.3.1	Experimentplanungsmethode	Das Lösungsmodul unterstützt die Auswahl einer geeigneten Experimentplanungsmethode ausgehend von der Aufgabenspezifikation der Simulationsstudie. Diese simulationsbezogene Entscheidung ist Ausgangspunkt für die Entwicklung eines initialen Experimentplans, welcher insbesondere Auswirkungen auf die Modellierung hat. Eine Wiederverwendung ist in Schritt 12 möglich.

Tabelle 3.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt	Abschnitt	Bezeichnung	Beschreibung
6	7	4.3.2	Systemgrenzen	Das Lösungsmodul unterstützt die Bestimmung der Systemgrenzen für die Modellierung der Energieflüsse sowie der einzubeziehenden Systemelemente. Diese simulationsbezogene Entscheidung hat Auswirkungen auf quasi alle Folgeschritte der Simulationsstudie und alle weiteren Lösungsmodule in Schritt 7.
7	7	4.3.2	Energiemodell	Das Lösungsmodul unterstützt die Auswahl eines geeigneten Ansatzes für die Modellierung von Energieverbräuchen. Diese simulationsbezogene Entscheidung hat Auswirkungen auf quasi alle Folgeschritte der Simulationsstudie und alle weiteren Lösungsmodule in Schritt 7.
8	7	4.3.2	Werkzeug/ -architektur	Das Lösungsmodul unterstützt die Auswahl einer geeigneten Art von Simulation und mittelbar die Festlegung einer einzusetzenden Werkzeugarchitektur für die Simulationsstudie. Diese simulationsbezogene Entscheidung ist die Grundlage für die letztendliche Auswahl eines Simulationswerkzeugs (oder mehrerer) und wirkt sich somit auf alle folgenden Schritte aus.
9	9	4.3.4	Energiedatenbeschaffungsmethode	Das Lösungsmodul unterstützt die Auswahl einer geeigneten Energiedatenbeschaffungsmethode, mittels derer Rohdaten für die Simulationsstudie, speziell für die modellierten Energieflüsse, effizient gesammelt werden. Diese simulationsbezogene Entscheidung beeinflusst den Datenakquise- und -aufbereitungsaufwand sowie die Detailtreue der Simulation.

Überdies sei angemerkt, dass über die gezeigten und explizit unterstützten Entscheidungen hinaus noch **weitere Entscheidungen** zu treffen sind, die nicht explizit in Lösungsmodule überführt wurden. Gründe dafür sind, dass entweder kein Bezug zur Abbildung von Energieflüssen in der Materialflusssimulation besteht oder aber keine strukturierte Entscheidungsunterstützung ausgehend vom Konzept der Lösungsmodule möglich ist. Hierunter fallen

beispielsweise kreative, systemspezifische planungsbezogene Entscheidungen, die etwa im Schritt 4 des Vorgehensmodells relevant sind. Für Hilfestellungen zu diesen sei auf einschlägige Literatur (vgl. Kapitel 2) verwiesen.

Zur Vereinfachung der folgenden Ausführungen und um einen schnellen Überblick über die einzelnen Lösungsmodule zu ermöglichen, wird im Weiteren die in Tabelle 3.7 gezeigte Steckbriefvorlage genutzt. Diese fasst die in Abbildung 3.4 gezeigten Bestandteile der Lösungsmodule zusammen, welche wiederum die von Grünig und Kühn eingeführten Begrifflichkeiten nutzen (vgl. Abschnitt 2.2.2 sowie [63, S. 61 ff.]). Im Einzelnen sind das:

- *Lösungsmodul:* Bezeichnung des Moduls
- *Entscheidungskriterien:* Übersicht identifizierter und relevanter Kriterien für Entscheidungsfindung
- *Lösungsvarianten:* Übersicht der identifizierten Alternativen, die diesbezüglich in Frage kommen
- *Umwelteinflüsse:* Übersicht der Umwelteinflüsse[24], die gebündelt in Umfeldszenarien die Einzelentscheidung beeinflussen können
- *Entscheidungsverfahren:* Vorschlag für einzusetzende Prozeduren bzw. Modelle zur strukturierten Entscheidungsfindung

Tabelle 3.7: Vorlage für Steckbrief eines Lösungsmoduls

Lösungsmodul	
Entscheidungs-kriterien	
Lösungsvarianten	
Umwelteinflüsse	
Entscheidungs-verfahren	

Es sei bereits hier angemerkt, dass die Auflistungen innerhalb der im Weiteren vorgestellten Steckbriefe mitunter nicht erschöpfend erscheinen. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn eine abweichende Differenzierung bzw.

24 Im Kontext der Lösungsmodule werden Umwelteinflüsse als durch die Umwelt oder in vorangehenden Schritten geschaffene und im Weiteren unveränderliche Bedingungen verstanden, die die jeweiligen Entscheidungen beeinflussen. Ihre Revision im Rahmen eines Rückschritts im Vorgehensmodell ist möglich, erfordert aber eine Reevaluierung in allen Folgeschritten.

eine alternative Betrachtungsweise zugrunde gelegt wird[25] oder aber neue Entwicklungen (d. h. neue mögliche Ausprägungen) zu ergänzen wären. Ansatz der vorliegenden Arbeit ist daher, einerseits die Wahl eines höheren Abstraktionsgrads, um eine bedeutsame Auswahl zu erhalten, und andererseits das Bestreben nach Vollständigkeit durch weitreichende Literaturarbeit. Daraus folgt zugleich, dass in der Anwendung der Gestaltungsmethodik bei Rückgriff auf die Lösungsmodule stets eine fallspezifische Konkretisierung vorzunehmen ist. So ist beispielsweise die genaue Modellierung von Energieverbräuchen aus einem verallgemeinerten Energiemodell abzuleiten. Zugleich können nicht erfasste Entscheidungskriterien, Lösungsvarianten und Umwelteinflüsse in der Anwendung ergänzt und einbezogen werden. Hierzu wurden die Lösungsmodule gemäß der Anwendbarkeitsanforderung für Entscheidungsmodelle und -verfahren (vgl. Abschnitt 2.2.1) so konzipiert, dass sie flexibel erweiterbar sind.

25 Als Beispiel dazu seien die identifizierten Ausprägungen für Energiemodelle nach Abschnitt 2.3.3 angeführt. Die ebenda angeführten Lösungsvarianten unterscheiden sich hinsichtlich ihres Abstraktionsgrads von der Realität. Würde hingegen eine Differenzierung hinsichtlich der Vorhersagbarkeit der in der Simulation eintretenden Werte für die Modelle zugrunde gelegt, so wären stochastische von deterministischen Modellen zu unterscheidende Ausprägungen.

4 Vorstellung der Arbeitsschritte und Lösungsmodule

Ausgehend von der Kurzdarstellung der Arbeitsschritte des Vorgehensmodells, die in Abschnitt 3.3.1 erfolgte, wird im Weiteren konkretisiert, welche Aspekte ihrer Bearbeitung im Detail umfasst und welche Lösungsmodule dazu entwickelt wurden. Einleitend sind zunächst einige Hinweise zum praktischen Einsatz der Gestaltungsmethodik dargestellt. Im Weiteren gliedert sich dieses Kapitel entsprechend der zwei Phasen der Gestaltungsmethodik in fabrikplanerische Vorarbeiten (Abschnitt 4.2) und Durchführung der Simulationsstudie (Abschnitt 4.3). Abschließend wird in Abschnitt 4.4 ein Zwischenfazit gezogen.

4.1 Hinweise zum praktischen Einsatz der Gestaltungsmethodik

Die Menge der in Abschnitt 3.3 angeführten Arbeitsschritte und Lösungsmodule impliziert bereits, dass die folgenden Abschnitte eine Vielzahl von Aktivitäten und (Teil-)Entscheidungen behandeln. Deren Bearbeitung wird bei der Durchführung eines simulationsgestützten Umplanungsprojekts zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken sukzessive relevant. Zur Erhöhung der Nachvollziehbarkeit und als Arbeitshilfe für die korrekte händische Anwendung der Gestaltungsmethodik wurden **Checklisten** entwickelt. Die Nutzung solcher empfiehlt sich insbesondere mit Blick auf die Handlungsempfehlungen zur Qualitätssicherung in Simulationsprojekten von Wenzel et al. [162, S. 38 ff.], die ebenfalls auf Checklisten basieren.

Diesen zugrunde liegt die Annahme, dass Auftraggeber (Fabrikbetreiber) und Auftragnehmer (Simulationsdienstleister) unabhängige Organisationen, Gruppen oder Personen sind. Dem entgegen wird für den praktischen Einsatz der Gestaltungsmethodik die vereinfachende Annahme getroffen, dass eine einzelne Person (**der Anwender**) alle relevanten Schritte bearbeitet. Ob dies in Einzelarbeit oder in Kooperation mit anderen Experten geschieht, ist dabei unerheblich, soweit der Anwender in alle relevanten Schritte involviert wird und somit stets eine mit allen Informationen vertraute Person beteiligt ist.

Aufgrund ihres Umfangs sind die zur Gestaltungsmethodik gehörigen Checklisten an dieser Stelle mit Verweis auf Anhang D.1 nicht gezeigt. In Analogie zur Gliederung der folgenden Abschnitte teilen sich diese entsprechend der Phasen des Vorgehensmodells (siehe Tabelle D.1 und Tabelle D.2, respektive). Zum **praktischen Einsatz** der Gestaltungsmethodik soll der

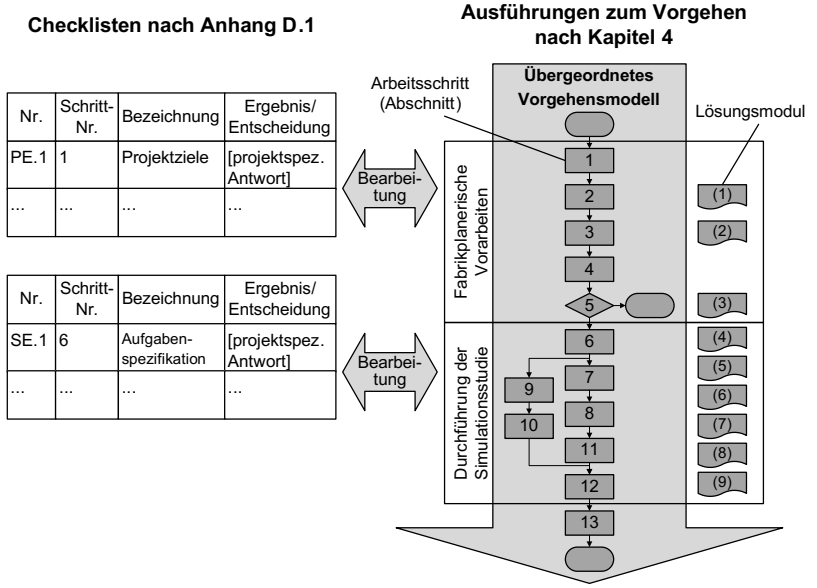


Abbildung 4.1: Schaubild zum praktischen Einsatz der Gestaltungsmethodik

Anwender sequenziell die einzelnen, in den folgenden Abschnitten erläuterten Aktivitäten durchführen bzw. Entscheidungen treffen und in den Checklisten dokumentieren (vgl. Abbildung 4.1). Gemäß der Ausführungen in Abschnitt 3.3.1 sind alle Ergebnisse anwendungsbegleitend zu verifizieren sowie zu validieren und iterative Rückschritte bedarfsmäßig zu realisieren. Alle Aktivitäten, Entscheidungen und Lösungsmodule sind dazu in den nachstehenden Abschnitten (dritte Gliederungsebene) gemäß der Arbeitsschritte genauer erläutert. Darüber hinausgehende Begründungen, Detaildarstellungen oder nicht essentielle Hilfestellungen finden sich zudem in den Anhängen D.2 bis D.6.

Die Zuordnung der Einträge der Checkliste zu den hiernach folgenden Ausführungen erfolgt über **Ordnungsnummern** (vgl. Abbildung 4.1, links) und Hervorhebungen der jeweiligen Bezeichnung im Text. Erstgenannte haben für alle planungsbezogenen bzw. simulationsbezogenen Entscheidungen die Form PE.1, PE.2 usw. bzw. SE.1, SE.2 usw.

Die **Darstellung der Aktivitäten bzw. Entscheidungen** in den folgenden Abschnitten (d. h. je Arbeitsschritt) folgt einer nach logischen Gesichtspunkten zur Abarbeitung entwickelten Reihenfolge, die auch den Checklisten zugrunde liegt. Soweit Lösungsmodule für einzelne Aspekte entwickelt wurden, werden

für diese jeweils Entscheidungskriterien, Lösungsvarianten, Umwelteinflüsse und vorgeschlagene Entscheidungsverfahren vorgestellt. Für weitere notwendige Aktivitäten und Entscheidungen wird der Handlungsbedarf herausgearbeitet und, wenn möglich, auf relevante Lösungsansätze eingegangen.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass ein ergänzender Einsatz der von Wenzel et al. entwickelten Dokumentstrukturen und Checklisten (vgl. [162, S. 177 ff.]) insbesondere für weniger simulationserfahrene Anwender hilfreich sein kann. Da die Gestaltungsmethodik auf die integrierte Simulation von Material- und Energieflüssen (iSvMEF) fokussiert, werden weitere für konventionelle Simulationsstudien notwendige Aspekte hier nur am Rande einbezogen. Die Annahme dabei ist, dass der Anwender diese bereits zu bearbeiten weiß oder auf bestehende Literatur zurückgreift (z. B. [19], [78], [138], [144], [162]).

4.2 Fabrikplanerische Vorarbeiten: Planungsbezogene Entscheidungen

Die folgenden Abschnitte gehen auf die Schritte 1 bis 5 im Vorgehensmodell ein, in denen vornehmlich planungsbezogene Entscheidungen im Rahmen der fabrikplanerischen Vorarbeiten zu treffen sind. Ergänzend dazu findet sich in Anhang D.1, Tabelle D.1 eine Checkliste zur Unterstützung des praktischen Einsatzes der erläuterten Arbeitsschritte[26].

4.2.1 Festlegung der Restriktionen für das Planungsprojekt

Zwischen Fabriken, Umwelt und Gesellschaft besteht ein komplexes Wirkungsgefüge [13, S. 3 ff.], [47, S. 6 ff.], in dem sich Industriebetriebe bewegen. Entsprechend müssen diese ihr Handeln unter Beachtung der Interessen einer Vielzahl von Anspruchsgruppen ausrichten [13, S. 4 ff.]. Dies fällt in den Aufgabenbereich der Unternehmensführung (vgl. [13, S. 57 ff.], [28, S. 15 ff.]). Die Menge der Ziele im Unternehmen ist dabei durchaus umfangreich und heterogen (vgl. [164, S. 15 ff.]).

In Schritt 1 des zugrundeliegenden Vorgehensmodells gilt es somit zunächst eine Situationsanalyse durchzuführen, um davon ausgehend eine Zieldefinition für das Planungsprojekt vorzunehmen. Dies umfasst im Phasenmodell der VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1 die Phase 1 „Zielfestlegung“. Hierunter fallen die Analyse der Unternehmensziele und Rahmenbedingungen, die Festlegung der

26 Im Text erfolgt jeweils eine Kennzeichnung durch Hervorhebung und Ordnungsnummer im Format PE.1, PE.2 usw.

Fabrik- und Projektziele, die Aufstellung der Bewertungskriterien und Definition der Arbeitspakete [24, S. 8 ff.]. Die **Projektziele** (PE.1) stellen dabei ein erstes wichtiges Ergebnis dieses Schritts dar, welche die weiteren Arbeiten insgesamt leiten. Diese können beispielsweise im Rahmen eines Zielfindungsworkshops (vgl. [45, S. 462 ff. & 615]) bestimmt werden. Über die eigentlichen Ziele hinaus sind zudem **Bewertungskriterien** (PE.2) für die entwickelte Planungslösung zu definieren.

Dem Planungsprojekt liegt (in Anlehnung an Löffler [47, S. 31]) stets ein energieeffizienzbezogener bzw. ein energieeffizienzfremder Planungsanlass zugrunde. Der Unterschied liegt darin, inwieweit der Anspruch einer Energieeffizienzsteigerung bereits direkter Teil der Projektziele ist. Für die Gestaltungsmethodik ist es dabei von Bedeutung, den **Energieeffizienzfokus** (PE.3) genauer zu bestimmen. Grundlage dafür können u. a. Vorgaben interner Effizienzprogramme (z. B. [165]), rechtliche Vorgaben (vgl. [32, S. 12 ff.]), normative Vorgaben (z. B. [166, S. 39 f.] oder [36, S. 11 ff.]), Forderungen von Anspruchsgruppen (vgl. [47, S. 31]), Kostenüberlegungen (vgl. [13, S. 6 ff.]) oder Überlegungen zur Versorgungssicherheit, insbesondere im Hinblick auf den steigenden Anteil erneuerbarer Energieerzeugung, (vgl. [13, S. 10 ff.] oder [97, S. 1 ff.]) sein. Beispiele typischer Definitionen des Energieeffizienzfokus und exemplarische Quellenangaben können nachstehender Auflistung entnommen werden:

- *Steigerung der Energieeffizienz im Produktionssystem* (zunächst unter weitgehender Vernachlässigung von Umweltwirkungen und betriebswirtschaftlichen Aspekten) [15], [23], [51], [56], [84], [90], [93], [94]
- *Reduktion der Umweltwirkungen* (zunächst unter weitgehender Vernachlässigung betriebswirtschaftlicher Aspekte) [47], [48], [85], [88], [167]
- *Reduktion von Energie- und Medienkosten* (unter besonderer Beachtung betriebswirtschaftlicher Aspekte) [23], [48], [84], [85], [88], [90], [168]
- *Flexibilisierung des Energieverbrauchs* (unter besonderer Beachtung eines Abgleichs von Energiebedarf und -angebot) [84], [97], [169]–[175]

Die unterschiedliche Gewichtung insbesondere der betriebswirtschaftlichen Aspekte hat großen Einfluss auf die eventuelle Planungslösung. Dies folgt u. a. aus dem Zusammenhang von technischem, wirtschaftlichem und genutztem Potenzial (vgl. Abschnitt 2.1.2).

Nach Pawellek kann die Planung „nur dann [zielführend] durchgeführt werden, wenn der Umfang des zu gestaltenden Systems klar definiert ist“ [44, S. 44]. Auf die Notwendigkeit einer Systemabgrenzung weist auch Löffler hin [47, S. 31 f.]. Folglich ist in Schritt 1 auch der **Betrachtungsbereich** (PE.4) für

das Planungsprojekt festzulegen. Dieser grenzt ein, welche Teile der Fabrik in die Konzeptsuche einbezogen werden sollen. Thiede schlägt dazu folgende grundlegende Alternativen vor [23, S. 132 f.]:

- *Gesamtes Unternehmen* (hierin wird dies als einzelne Fabrik verstanden und sollte nicht auf einen Industriebetrieb mit mehreren Fabriken bezogen werden)
- *Produktionsbereich*
- *Prozesskette für ein spezifisches Produkt*

Ein Modus, nach dem diese Entscheidung für ein konkretes Unternehmen zu treffen ist, lässt sich nicht zielführend und allgemeingültig formalisieren. Zugleich kann diese im Rahmen des oben angesprochenen Zielfindungsworkshops gemeinschaftlich und unter Einbezug des betrieblichen Fachwissens mehrerer Personen getroffen werden, soweit der Betrachtungsbereich nicht bereits durch den Planungsanlass bestimmt wird. Eine Differenzierung nach Handlungsraum und Wirkraum, wie sie von Müller et al. [13, S. 134] sowie Löffler [47, S. 32] vorgeschlagen wird, ist an dieser Stelle nicht vorzunehmen, da noch nicht klar ist, was der genaue Gegenstand und Inhalt der Umplanung sein wird.

4.2.2 Bestimmung des Planungsfalls

Um ausgehend von den Restriktionen des Planungsprojektes strukturiert geeignete Handlungsansätze bestimmen zu können, wird im Rahmen der Gestaltungsmethodik ein Ansatz vorgeschlagen, der auf einer Abschätzung des Umfangs möglicher Änderungen fußt. Dazu wird in Schritt 2 ausgehend von bekannten Restriktionen des Planungsprojektes ein Planungsfall für das Umplanungsprojekt (vgl. Abschnitt 3.2.3) bestimmt. Der Steckbrief des dazugehörigen Lösungsmoduls ist in Tabelle 4.1 gezeigt. Dessen Anwendung umfasst eine Analyse des Betrachtungsbereichs, eine subjektive Einschätzung der Bestimmtheitsgrade und eine abschließende Plausibilisierung des bestimmten Planungsfalls.

Tabelle 4.1: Steckbrief des Lösungsmoduls Planungsfall

Lösungsmodul	Planungsfall
Entscheidungs-kriterien	• Bestimmtheitsgrad des Fertigungsablaufs • Bestimmtheitsgrad des Materialflusssystems • Bestimmtheitsgrad der Infrastruktur- und Versorgungssysteme
Lösungsvarianten	• Planungsfälle 1–8 nach Tabelle 3.2 und Anhang C
Umwelteinflüsse	• Betrachtungsbereich • Grundlegende Unternehmensvorgaben • Systemzustand und -komplexität • Äußere Restriktionen (Recht, Kunden, …)
Entscheidungs-verfahren	• Subjektive Einschätzung und Kombinatorik nach Tabelle 3.2

Eingangs ist in der Systemanalyse zu untersuchen, wie groß der Bestimmtheitsgrad des Fertigungsablaufs, des Materialflusssystems sowie der Infrastruktur- und Versorgungssysteme ist. Ausgehend von den Definitionen dieser **Entscheidungskriterien** (vgl. Abschnitt 3.2.3) werden folgende Fokusfragen als Grundlage zur Bewertung vorgeschlagen, wobei anwendungsspezifisch ggf. auch andere Aspekte einzubeziehen sind:

- **Bestimmtheitsgrad des Fertigungsablaufs** (PE.5):
  - Wie hoch ist die Auslastung des Systems in welchem Schichtbetrieb?
  - Wie genau sind bisherige Fertigungsreihenfolgen einzuhalten?
  - Wie groß ist der Spielraum für zeitliche Verschiebungen einzelner Aufträge?
  - Welche Möglichkeiten zur Anpassung der Belegungsplanung existieren?
  - Wie genau und in welcher Form erfolgt die Produktionsplanung?
  - Welche Einflussmöglichkeiten bestehen auf die Losgrößen im System?
- **Bestimmtheitsgrad des Produktionssystems** (PE.6):
  - Welche Randbedingungen würden für eine Umstrukturierung gelten?
  - Wie hoch ist die Kapazitätsauslastung der einzelnen Maschinen und Anlagen?
  - Welche nutzbaren Flächen bestehen oder können geschaffen werden?
  - Welche Bedingungen sind während der Realisierung zu erfüllen?
  - Welche Möglichkeiten zur Ergänzung oder Veränderung des bestehenden Maschinen- und Anlagenparks bestehen?
- **Bestimmtheitsgrad der Infrastruktur- und Versorgungssysteme** (PE.7):
  - Welche Energieträger und Medien werden im Produktionssystem benötigt?

- Welche Energie- und Medienbereitstellungseinrichtungen existieren?
- Wie hoch ist die Auslastung der einzelnen Systeme?
- Welche Kreislauf- und Verteilungssysteme bestehen und welche Maschinen und Anlagen versorgen sie jeweils?
- Welche Anforderungen bestehen an die Versorgung im Regelbetrieb?
- Als wie hoch wird die Effizienz der Systeme eingeschätzt?
- Welche Vorbehalte oder bereits geplanten Eingriffe existieren für IVS?

Neben diesen Fokusfragen sind auch **Umwelteinflüsse** einzubeziehen. Ob aus diesen Umfeldszenarien abzuleiten sind, ist projektbezogen zu entscheiden. Entsprechend Tabelle 4.1 umfassen die relevanten Umwelteinflüsse neben dem Betrachtungsbereich (PE.4):

- *Grundlegende Unternehmensvorgaben:* Hierunter fallen alle unternehmensintern formulierten Vorgaben, die für das Planungsprojekt zu beachten sind. Das können beispielsweise Investitionsgrenzen sein, die Anpassungen des Materialflusssystems kategorisch ausschließen, oder Zielsystemdefinitionen, die Anpassungen der IVS unattraktiv machen (z. B. Kennzahlen auf direkte Prozesse beschränkt).
- *Systemzustand und -komplexität:* Hierunter fallen alle Aspekte, die sich – ausgehend vom Zustand und der Komplexität des Systems – auf die Attraktivität einer Umplanung auswirken. So ist es tendenziell unattraktiver, ein gerade neu installiertes Kaltwasserversorgungssystem mit komplexen Abhängigkeiten zu anderen Maschinen und Anlagen umzuplanen, währenddessen eine ohnehin auszutauschende, alte Maschine ein bedeutendes Potenzial verspricht.
- *Äußere Restriktionen:* Hierunter fallen alle äußeren Restriktionen, die für das Unternehmen und die Fabrik gelten. Dazu gehören beispielsweise baurechtliche Einschränkungen, die bei Veränderungen bestehender Anlagen tangiert würden, oder Kundenforderungen an den Produktionsprozess und die Lieferfähigkeit.

Die Einschätzung der Bestimmtheitsgrade sollte idealerweise in einem Gruppenprozess geschehen, wenn möglich im Rahmen des Zielfindungsworkshops, der in Schritt 1 erwähnt ist. Darüber hinaus können während der Analyse bereits konkrete Maschinen und Anlagen identifiziert werden, die im Zuge der Umplanung im Fokus stehen sollen (**fokussierte Systembestandteile**; PE.8). Dies kann beispielsweise auf Grundlage der Identifikation der bedeutendsten Energieverbraucher (vgl. Vorgehen nach Thiede[27] [23, S. 135

27 Thiede beschreibt eine Kategorisierung von Maschinen und Anlagen anhand ihrer Nennleistung und ihrer jährlichen Betriebszeit in vier Quadranten eines Punkte-Diagramms, denen er unterschiedliche Bedeutung beimisst (vgl. auch Portfolio-Analyse-Methodik in Abschnitt 4.2.3).

ff.]) bzw. der größten Umweltpotenziale (vgl. Vorgehen nach Sproedt et al.[28] [100]) erfolgen. Auf diesem Wege kann die Einschätzung der Bestimmtheitsgrade direkt an den fokussierten Systemelementen gespiegelt und bei Bedarf überarbeitet werden. Das ist insbesondere dann hilfreich, wenn zunächst die Bestimmtheit als sehr hoch eingeschätzt wird und dadurch keine ausreichend großen Potenziale ersichtlich werden können.

In Abschnitt 3.2.3, genauer Tabelle 3.2, wurde bereits gezeigt, wie die hier relevanten **Lösungsvarianten** in Zusammenhang mit den Bestimmtheitsgraden stehen. Ausgehend von den getroffenen Einschätzungen hinsichtlich Letztgenannter kann somit ein **Planungsfall** (PE.9) ausgewählt werden. Anhand der Planungsfallbeschreibungen (vgl. Anhang C) ist zu prüfen, ob die getroffene Auswahl mit Blick auf Planungsanlass und andere Randbedingungen korrekt erscheint. Weiterhin ist zu plausibilisieren, ob der Wirkungsbereich Handlungsansätze nach Müller et al. [13], die mit dem Planungsfall assoziiert sind (vgl. Abbildung 3.5), unter Beachtung des Betrachtungsbereichs und der Projektziele ausreichend Potenzial versprechen. Bei Bedarf sind die Einschätzungen der Bestimmtheitsgrade zu revidieren.

4.2.3 Auswahl einer möglichen Effizienzmaßnahme

Nach erfolgter Bestimmung des Planungsfalls ist die inhaltliche Lösungssuche voranzutreiben. Ziel von Schritt 3 des Vorgehensmodells ist es dabei, einen konkreten Ansatz zur Realisierung einer Effizienzsteigerung zu bestimmen, der im Betrachtungsbereich umgesetzt werden kann. Dieser soll aus den von Müller et al. beschriebenen Handlungsansätzen abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 2.1.4 bzw. [13, S. 123 ff.]). Das dazu entwickelte Lösungsmodul ist in Tabelle 4.2 als Steckbrief gezeigt und umfasst die Teilaufgaben:

1. Vorauswahl möglicher Handlungsansätze und möglicher abstrahierter Effizienzmaßnahmen
2. Ableitung von Maßnahmenvorschlägen für den Betrachtungsbereich
3. Auswahl und Konkretisierung einer zu verfolgenden Effizienzmaßnahme

28 Sproedt et al. schlagen eine Einschätzung des Verbesserungspotenzials aller direkten und indirekten Prozesse hinsichtlich zuvor gewichteter Umweltaspekte vor, um Aspekte und Prozesse mit besonders großem Potenzial zu identifizieren.

Tabelle 4.2: Steckbrief des Lösungsmoduls Effizienzmaßnahme

Lösungsmodul	Effizienzmaßnahme	
Entscheidungs-kriterien	• Zuordnung von Handlungs-ansätzen/abstrahierten Maß-nahmen zu Planungsfällen • Machbarkeit	• Realisierungsaufwand • Verbesserungspotenzial
Lösungsvarianten	• Optimierte Auftrags-steuerung • Optimierte Anlagen-steuerung • Veränderte Prozessparameter • Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten • Prozess-/-ketten-anpassungen • Veränderter Rohteil-/ Rohmaterialbedarf	• Prozessintegration • Substitution • Prozesssicherheit/ Fehlerrobustheit • Sophistication • Vermeidung von Umgebungsverlusten • Vermeidung von Verlustleistung
Umwelteinflüsse	• Planungsfall	• Fokussierte System-bestandteile
Entscheidungs-verfahren	• Assoziative Vorauswahl abstrahierter Effizienzmaßnahmen mit anschließender Entwicklung und Auswahl von Maß-nahmenvorschlägen mittels Portfolio-Analyse	

Die Vorauswahl beruht auf der Assoziation von Planungsfällen zu möglichen Handlungsansätzen, die in Abschnitt 3.2.3 eingeführt wurde (vgl. Abbildung 3.5). Auf Grundlage der Erläuterungen in [13, S. 123 ff.] wurden abstrahierte Effizienzmaßnahmen abgeleitet, die den Handlungsansätzen je Planungsfall zugeordnet sind. Dies ist in Tabelle 4.3 für die im Rahmen der Gestaltungsmethodik betrachteten Planungsfälle 1 bis 4 dargestellt. Ergänzende Erläuterungen zu den abstrahierten Effizienzmaßnahmen (**Lösungsvarianten**) finden sich in Anhang D.2, Tabelle D.3.

Tabelle 4.3: Übersicht abstrahierter Maßnahmen je Handlungsansatz und Planungsfall in Anlehnung an [13, S. 123 ff.]

Planungsfall	**Handlungsansatz**	**Abstrahierte Maßnahme**	**Beispiel**
Fabrik- und Anlagensteuerung	Energiesparende Fahrweisen	Optimierte Auftragssteuerung	Energieorientierte Produktionssteuerungsstrategien
		Optimierte Anlagensteuerung	Kopplung der Steuerung von Infrastruktur mit der von Produktionsanlagen
	Reduktion von Verlustenergie	Veränderte Prozessparameter	Reduktion von Prozesstemperaturen
		Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten	Stand-by-Schaltung für Anlagen
Produktionsplanung	Energiesparende Fahrweisen	Optimierte Auftragssteuerung	Energieorientierte Produktionsplanungsstrategien
	Reduktion von Verlustenergie	Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten	Stand-by-Schaltung für Anlagen unterstützt durch Produktionsplanung
Produktionssystemplanung	Energetisch optimierte Produktgestaltung	Prozess-/-kettenanpassung	Konstruktive Vorgaben für energetisch günstigere Prozessauswahl/-führung
		Veränderter Rohteil-/ Rohmaterialbedarf	Formgebung für energetisch günstigere Fertigung (endformnahe Rohteile)
	Steigerung des Wirkungsgrads	Prozessintegration	Zusammenführen von Haupt- oder Integration von Hilfsprozessen
		Substitution	Ersatz von Anlagen/-teilen mit effizienteren Alternativen
		Prozesssicherheit/ Fehlerrobustheit	Verringerung von Ausschuss
		Sophistication	Ersatz von angetriebenen Förderern mit Schwerkraftförderern

Tabelle 4.3: (Fortsetzung)

Planungsfall	Handlungsansatz	Abstrahierte Maßnahme	Beispiel
Produktionssystemplanung *(Fortsetzung)*	Reduktion von Verlustenergie	Veränderte Prozessparameter	Reduktion von Prozesstemperaturen
		Vermeidung von Umgebungsverlusten	Bessere Isolation von thermisch relevanten Anlagenteilen
		Vermeidung von Verlustleistung	Wartung und Instandhaltung zur Vermeidung von Leckagen und Reibungsverlusten
Produktionsprozessplanung	Handlungsansätze entsprechend denen der Produktionsplanung und der Produktionssystemplanung, wobei insbesondere kombinierte Anpassungen von Fertigungsablauf und Materialflusssystem möglich werden.		

Der Planer kann somit nach Tabelle 4.3 und ausgehend vom zuvor identifizierten Planungsfall eine Vorauswahl möglicher **Handlungsansätze** (PE.10) und möglicher **abstrahierter Maßnahmen** (PE.11) treffen. Letztgenannte stehen dabei jeweils stellvertretend für eine Menge konkreter Maßnahmen, die eine ähnliche Herangehensweise verfolgen und ähnliche Planungsaspekte umfassen. Sie sind Ausgangspunkt für die Ableitung von Maßnahmenvorschlägen für das Planungsprojekt und als abstrakter Input für weitere Lösungsmodule der Gestaltungsmethodik bedeutsam.

Unter Beachtung der Vorauswahl und der eventuell fokussierten Systembestandteile sind abstrahierte Maßnahmen in **Maßnahmenvorschläge** (PE.12) zu überführen, deren Anwendungsbereich als Subsystem des Betrachtungsbereichs genau festgelegt ist. Dem folgend dienen der Planungsfall und die fokussierten Systembestandteile (**Umwelteinflüsse**) zur Einschränkung des Lösungsraums. Eine Relevanzprüfung kann diese Vorauswahl weiter unterstützen (besteht beispielsweise kein Einfluss auf Produktgestaltung, so kann dieser Handlungsansatz als irrelevant vernachlässigt werden).

Als Hilfestellung für die Erarbeitung der Vorschläge können u. a. Literaturquellen dienen, die bekannte Effizienzmaßnahmen systematisieren und zusammenfassen (z. B. [13], [14], [46], [51], [59], [100], [176]–[179]). Weiterhin ist der Einsatz von Kreativitätstechniken (vgl. [150], [180], [181]), z. B. Brainstorming, insbesondere im Rahmen von Gruppenprozessen, empfehlenswert.

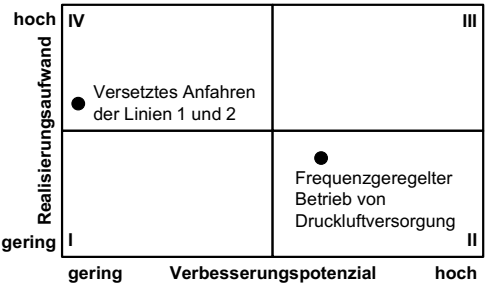


Abbildung 4.2: Beispielhaftes Portfolio zur Auswahl eines Maßnahmenvorschlags

Die Maßnahmenvorschläge werden anschließend bewertet, bevor eine **Auswahl** getroffen wird. Für den Auswahlprozess wird der Einsatz der Portfolio-Analyse-Methodik in Anlehnung an Kerth et al.[29] vorgeschlagen (vgl. [182, S. 107 f.]). Diese ermöglicht es, „komplexe Zusammenhänge anschaulich zu aggregieren und normative Behauptungen zur Ableitung von Strategien zu nutzen" [182, S. 104], und kann folglich die hier zu treffende Auswahlentscheidung unterstützen. Dazu werden identifizierte Vorschläge zunächst hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Machbarkeit geprüft und ggf. ausgeschlossen. Hierbei sind insbesondere technische, aber auch projektspezifische (z. B. zuvor als unveränderlich definierte Maschinen oder Prozesse) Restriktionen einzubeziehen. Alle verbliebenen Vorschläge werden hinsichtlich des mit ihnen verbundenen Realisierungsaufwands und des Verbesserungspotenzials bewertet. Hierzu sind qualifizierte Schätzungen auf Grundlage von Expertenwissen oder dokumentierten Fallstudien (vgl. z. B. [34], [59], [60]) vorzunehmen. Anhand der Bewertungsergebnisse werden die einzelnen Maßnahmenvorschläge in ein Portfolio gemäß Abbildung 4.2 eingetragen. Die dazu notwendige Skalierung der Schätzwerte auf die relativ bemessenen Achsen ist dabei vom Anwender speziell für den Projektrahmen zu wählen. Abschließend erfolgt die Interpretation der Ergebnisse mit dem Ziel der Auswahl von zumindest eines Vorschlags. Folgende Cluster lassen sich dabei unterscheiden:

- **Cluster I:** Mit geringem Aufwand umzusetzende Maßnahmen mit geringem Potenzial können häufig in kontinuierlichen Verbesserungsprozessen oder bei Wartungen einfließen und erfordern daher nur selten einer ausgeprägten Umplanung.

29 Das von Kerth et al. allgemeingültig formulierte Vorgehen umfasst die Schritte: Abgrenzung der Betrachtungsobjekte, Bewertung der ersten Achse, Bewertung der zweiten Achse, Aggregation auf der Matrix und Interpretation der Zuordnung [182, S. 107 f.]. Als Betrachtungsobjekte dienen im vorliegenden Kontext die Maßnahmenvorschläge.

- **Cluster II:** Mit geringem Aufwand umzusetzende Maßnahmen mit hohem Potenzial erfordern möglicherweise größere Planungsumfänge, weisen jedoch ein attraktives Verhältnis der Bewertungsgrößen auf und sind daher zu priorisieren.
- **Cluster III:** Realisierungsaufwändige Maßnahmen mit großem Potenzial erfordern im besonderen Maße eine effiziente und genaue Planung, damit das inhärent weniger gute Aufwand-Nutzen-Verhältnis nicht weiter belastet wird. Diese Maßnahmen sind besonders relevant für den Einsatz der Gestaltungsmethodik.
- **Cluster IV:** Realisierungsaufwändige Maßnahmen mit nur geringem Potenzial sind nur dann interessant, wenn (externe) Zwänge ökonomische Überlegungen überstimmen. In diesem Falle ist dringend nach Planungseffizienz zu streben.

Für den ausgewählten Maßnahmenvorschlag sind der zugrundeliegende **Handlungsansatz** (PE.13) und die **abstrahierte Maßnahme** (PE.14) zu dokumentieren. Letztlich muss eine weitere **Konkretisierung der verfolgten Effizienzmaßnahme** (PE.15) erfolgen, sodass der genaue Planungsbedarf im Weiteren klar definiert und auch dokumentiert ist.

Zur Verdeutlichung des Vorgehens wird ein hypothetisches Beispiel eingeführt, in dem die Energiekosten für einen Bereich mit fünf hochautomatisierten, verketteten Fertigungslinien gesenkt werden sollen und der Planungsfall „Fabrik- und Anlagensteuerung“ bestimmt wurde. Für diesen Fall sind die Handlungsansätze „Energiesparende Fahrweisen“ und „Reduktion von Verlustenergie“ relevant (vgl. Tabelle 4.3). Da im Beispiel angenommen wird, dass weder unproduktive Einschaltzeiten noch Möglichkeiten zur Veränderung der Prozessparameter existieren, kann der zweite Handlungsansatz vernachlässigt werden. Es kommen somit die abstrahierten Effizienzmaßnahmen „Optimierte Auftragssteuerung“ und „Optimierte Anlagensteuerung“ in Betracht. Dazugehörige Maßnahmenvorschläge könnten folglich „versetztes Anfahren der Linien 1 und 2“ oder „frequenzgeregelter Betrieb von Druckluftversorgung“ sein. Nach Abschätzung von Machbarkeit, Aufwand und Potenzial (vgl. Abbildung 4.2) erfolgt die Auswahl der im Weiteren verfolgten Maßnahme, hier die Letztgenannte. Für diese wird konkretisiert, dass die Regelungstechnik der Druckluftversorgung mit dem Ziel der Energiekostenreduktion anzupassen ist.

4.2.4 Ausarbeitung der Planungslösung

Ziel von Schritt 4 ist es, die ausgewählte Effizienzmaßnahme auszuplanen, also die Konzept- bzw. Systemsynthese abzuschließen. Dazu ist zunächst zu klären, in welcher **Planungsphase** (PE.16) die Ausarbeitung der Planungslösung geschehen soll. In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1 sind dabei Konzeptplanung und Detailplanung zu differenzieren [24, S. 12 ff.], die sich hauptsächlich in der notwendigen Detailtiefe unterscheiden. Diese gibt Aufschluss, wie genau das Planungsergebnis sein und die Konzept- bzw. Systemanalyse der Planungslösung im Weiteren geschehen muss.

Die Anforderungen an die Konzept- bzw. Systemsynthese sind auch von der verfolgten Energieeffizienzmaßnahme abhängig. Daher können keine Vorgaben zu einem allgemeingültigen, detaillierten Planungsvorgehen im Rahmen der Gestaltungsmethodik gemacht werden. Zugleich sei auf die Methodik zur energieeffizienzorientierten Fabrikplanung von Müller et al. (vgl. [13, S. 131 ff.]) sowie die Methode eines planungsintegrierten Umweltschutzes von Löffler (vgl. [47, S. 27 ff.]) hingewiesen, welche einen Rahmen vorgeben. Die Ergebnisse des Schritts stellen eine Grundlage der folgenden Systemanalyse dar und sind als **Übersicht der ausgeplanten Effizienzmaßnahme** (PE.17) zu dokumentieren.

Neben der technischen Spezifikation der zu realisierenden Systemänderungen ist in diesem Schritt auch eine **Hypothese für die ausgeplante Effizienzmaßnahme** (PE.18) zu definieren. Diese umfasst, analog zum Vorschlag Beiers [97, S. 163], konkrete Aussagen darüber, was am System verändert werden soll und wie es sich voraussichtlich auswirkt. Nach Möglichkeit ist die Hypothese bereits so aufzubereiten, dass die Systemänderung parametrisch dargestellt ist und die Wirkung sich auf konkrete Kenngrößen des Systems bezieht. Soweit relevant, können auch mehrere Hypothesen entwickelt und zur Grundlage der Folgeschritte gemacht werden.

Bezogen auf das Beispiel am Ende des vorherigen Abschnitts könnte etwa nachstehende Hypothese getroffen werden: „Durch das zeitweise Verringern der Kompressorleistung in Abhängigkeit des tatsächlichen Druckluftbedarfs kann der Bedarf elektrischer Energie reduziert werden, ohne die Druckluftversorgung zu beeinträchtigen." Die Systemänderung besteht dabei aus einer Dynamisierung des Betriebszustands der Druckluftversorgung mit Teillastfällen. Kenngrößen sind die elektrische Energie, die der Kompressor aufnimmt, und ein Maß für die Versorgungsqualität mit Druckluft, z. B. der Druck innerhalb des Druckluftsystems (vgl. auch Modellierung von Kompressoren nach Beier [97, S. 125 ff.]).

4.2.5 Simulationswürdigkeit

Nach erfolgter Konzept- bzw. Systemsynthese ist die gefundene Planungslösung zu analysieren und zu bewerten. Dazu stehen sowohl statische als auch dynamische Methoden zur Verfügung (vgl. u. a. [78, S. 27 ff.], [94, S. 75 ff.], [143, S. 45 ff.]). Ziel von Schritt 5 des Vorgehensmodells ist die Klärung der Frage, ob eine dynamische Betrachtung mittels iSvMEF unter Beachtung des Zielsystems des Simulationsanwenders empfehlenswert erscheint. Der Steckbrief des dazu entwickelten Lösungsmoduls ist in Tabelle 4.4 gezeigt.

Tabelle 4.4: Steckbrief des Lösungsmoduls Simulationswürdigkeit

Lösungsmodul	Simulationswürdigkeit	
Entscheidungskriterien	• Grundlegende Simulationswürdigkeit (ohne Beachtung von Energie) • Energiebezug der Hypothese • Zeitbezug für energetische Größen • Wiederverwendung des Modells	• Abhängigkeiten zwischen Systemzuständen und Leistungsverlauf • Abhängigkeit der Ablauflogik von energetischen Größen
Lösungsvarianten	• Konventionelle Materialflusssimulation • Konventionelle Materialflusssimulation mit nachträglicher Energiebetrachtung	• Integrierte Simulation von Material- und Energieflüssen (iSvMEF) • Alternative Methoden (ohne Simulation)
Umwelteinflüsse	• Planungsfall • Verfolgte abstrahierte Effizienzmaßnahme	• Fokussierte Systembestandteile
Entscheidungsverfahren	• Flussdiagramm und Bewertungsindikatoren auf Grundlage der verfolgten abstrahierten Effizienzmaßnahme	

Um dem Zielsystem des Simulationsanwenders gerecht zu werden, sollte die iSvMEF nur eingesetzt werden, wenn der Nutzen den Aufwand zumindest aufwiegt. Andernfalls sind die konventionelle Materialflusssimulation mit oder ohne nachträglicher Energiebetrachtung bzw. alternative (statische) Methoden zu bevorzugen. Zur Strukturierung der Entscheidung dient ein Flussdiagramm, welches die relevanten Kriterien miteinander und mit den genannten **Lösungsvarianten** in Zusammenhang stellt. Dieses ist in Abbildung 4.3 gezeigt und dessen Entscheidungspunkte (entsprechend der **Entscheidungskriterien**) sind im Weiteren erläutert. Anhand des Ablaufs sind die einzelnen

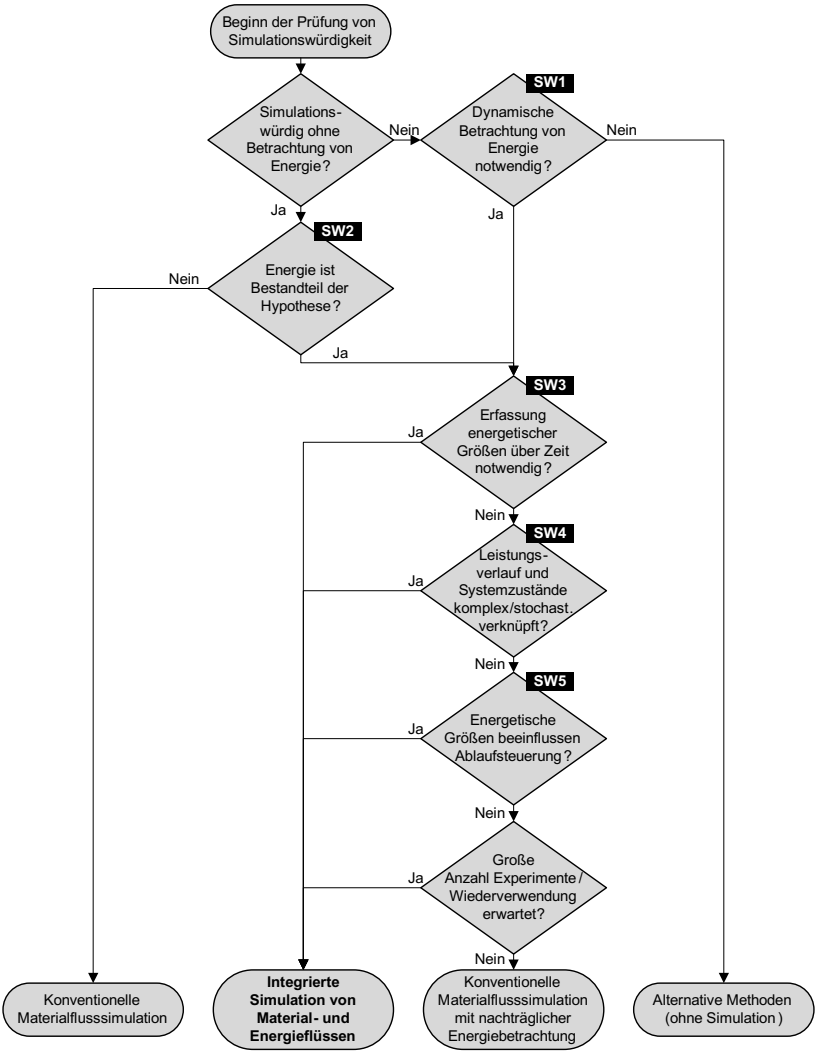


Abbildung 4.3: Flussdiagramm zur Prüfung der Simulationswürdigkeit

Kriterien unter Beachtung der Hypothese für die ausgeplante Effizienzmaßnahme (umfasst u. a. die **Umwelteinflüsse** Planungsfall, verfolgte abstrahierte Effizienzmaßnahme und fokussierte Systembestandteile) zu prüfen, um so die abschließende Entscheidung vorzubereiten.

Wurden im vorangehenden Schritt **mehrere Hypothesen** definiert, sind diese zur Bildung von Umfeldszenarien heranzuziehen. Für jedes dieser Szenarien ist die Simulationswürdigkeit entsprechend der folgenden Erläuterungen zu prüfen, sodass eine Schar von zu präferierenden Untersuchungsmethoden generiert wird. Grundsätzlich sollte jedoch nur eine Methode zum Einsatz kommen, um Planungseffizienz zu erreichen. Die finale Methodenentscheidung folgt daher einer vom Anwender der Gestaltungsmethodik zu definierenden Prämisse (z. B. am häufigsten zu präferierende Methode oder die zu präferierende Methode mit der höchsten erwarteten Detaillierung).

Die **Identifikation und Auswahl von Entscheidungskriterien** folgt einerseits der einschlägigen Literatur bzw. Standards (vgl. [19, S. 19 f.], [78, S. 37 ff.], [138, S. 58 f.], [162, S. 14 ff.], [183, S. 6]) und andererseits dem Wissen über die im Rahmen der systematischen Literaturanalyse identifizierten und einbezogenen Arbeiten (vgl. Abschnitt 2.3.3). Im Sinne des Zielsystems des Simulationsanwenders (vgl. Abschnitt 3.2.1) stehen dabei Aspekte im Vordergrund, die den Aufwand auf das Notwendige beschränken und zugleich den erforderlichen Erkenntnisgewinn erlauben. Insbesondere die identifizierten Fallstudien der systematischen Literaturanalyse geben Aufschluss darüber, welchen Mehrwert die iSvMEF generieren kann, den andere (statische) Methoden nicht (mit zweckmäßigem Aufwand) ermöglichen.

Zunächst ist, wie in Abbildung 4.3 gezeigt, die Prüfung der **Simulationswürdigkeit ohne Betrachtung von Energie** (PE.19) für das Planungsproblem (vgl. Gesichtspunkte nach VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 in Abschnitt 2.4.1 sowie [162, S. 14 ff.]) vorzunehmen. Ist diese negativ, so ist das Problem nur dann im Sinne der Gestaltungsmethodik relevant, wenn die **dynamische Betrachtung von Energie** (PE.20) zur Analyse und Bewertung des vorläufigen Planungsergebnisses notwendig ist. Trifft dies ebenfalls nicht zu, so können alternative Methoden, etwa analytische Berechnungen (vgl. auch [78, S. 27 ff.], als effizienter Untersuchungsansatz herangezogen werden.

Zugleich impliziert die Simulationswürdigkeit des Planungsproblems ohne Betrachtung von Energie nicht automatisch, dass die um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation das geeignete Untersuchungsinstrument ist. Dies ist nur der Fall, wenn die Flüsse von **Energie Bestandteil der Hypothese** (PE.21) sind (z. B. Hypothese zur Verbrauchsänderung). Sonst genügt der Einsatz einer konventionellen Materialflusssimulation.

Erreicht der Anwender den mit SW3 gekennzeichneten Knoten, bleibt zu klären, ob die Untersuchung des zugrundeliegende Planungsproblem mit iSvMEF einer Simulation mit nachträglicher Energiebetrachtung vorzuziehen

ist. Diese ist jedoch mit einem bedeutenden Mehraufwand verknüpft, aus welchem Grunde zunächst der mögliche Nutzen genauer untersucht wird. Dazu sind nacheinander folgende vier Kriterien zu bewerten:

- *Erfassung energetischer Größen über Zeit notwendig (PE.22):* Hierbei ist zu prüfen, ob die Formulierung der Hypothese oder aber die Planungslösung selbst die Erfassung von Kenngrößen der Energieflüsse über die Zeit notwendig macht. Dies ist etwa der Fall, wenn Aussagen zum Verlauf (z. B. Mindest-/Maximalwerte) gefordert sind. Hier erlaubt die iSvMEF eine dynamische Betrachtung, die durch eine nachträgliche Auswertung nur mit bedeutendem Aufwand realisierbar ist[30].
- *Leistungsverlauf und Systemzustände komplex/stochastisch verknüpft (PE.23):* Hierbei ist zu prüfen, ob der Leistungsverlauf (der nicht über die Zeit aufgelöst erfasst werden muss) und damit das Energieverbrauchs-/-erzeugungsverhalten abhängig von komplexen oder stochastischen Einflüssen ist. Dies ist etwa der Fall, wenn komplexe Beziehungen zwischen den energetisch relevanten Betriebszuständen unterschiedlicher Elemente bestehen[31] oder eine stochastische Modellierung des Verbrauchs-/Erzeugungsverhaltens notwendig ist[32].
- *Energetische Größen beeinflussen Ablaufsteuerung (PE.24):* Hierbei ist zu prüfen, ob Kenngrößen der Energieflüsse den Ablauf der Simulation beeinflussen sollen. Dies ist etwa der Fall, wenn die Logik zur Steuerung der Betriebszustände von simulierten Elementen sich an Leistungsgrenzen orientieren soll (z. B. verlangsamter/versetzter Betrieb von Anlagen bei Erreichung

30 Zur nachträglichen Berechnung von zeitabhängigen Profilen sind alle relevanten Ereignisse während der Simulationslaufzeit zu speichern und nachträglich einer Energieberechnung zuzuführen. Dies erfordert zumeist Erweiterungsaufwand zum Sammeln und Exportieren von Daten bei der Modellimplementierung sowie die Entwicklung eines Werkzeugs zur nachträglichen Berechnung von Energiedaten. Daher wird bei nachträglicher Berechnung von Energiedaten zumeist nur der Energieverbrauch über einen Referenzzeitraum berechnet (vgl. z. B. [106], [110]).

31 Hierunter fallen vor allem Abhängigkeiten zwischen Energieflusssystemelementen beim Einbezug von versorgender Infrastruktur. In diesem Falle bildet ein Modell das simulierte System nur dann korrekt ab, wenn stets eine ausreichende Leistungsbereitstellung erfolgt. Wird beispielsweise auch die Abschaltung von Infrastrukturanlagen untersucht, so ist die Simulation nur valide, wenn über die gesamte Simulationszeit hinweg ein Abgleich von Verbrauch und Angebot erfolgt. Dieser ist (analog zum vorherigen Kriterium) nachträglich nicht zielführend realisierbar.

32 Ein Vorteil der Materialflusssimulation ist die Möglichkeit zur Untersuchung stochastischer Prozesse. Unterliegt das energetische Verhalten von Elementen stochastischen Einflüssen, so lässt sich dies mit geringem Aufwand in der Simulationsumgebung modellieren. Die Nachbildung in einer nachträglichen Berechnung ist indes komplizierter und aufwendiger, da für eine korrekte Untersuchung mehrere Replikationen notwendig sind [162, S. 139 ff.].

einer Leistungsgrenze). Hierbei sind energetische Größen als Simulationsdaten notwendig und eine nachträgliche Generierung dieser als Ergebnisdaten unzureichend (vgl. auch Abschnitt 2.3.2).

- *Große Anzahl Experimente/Wiederverwendung erwartbar (PE.25):* Hierbei ist zu prüfen, ob die Hypothese auf eine große Anzahl notwendiger Simulationsexperimente schließen lässt bzw. ob eine Wiederverwendung des Simulationsmodells zum Zwecke der Untersuchung anderer Hypothesen geplant oder zu erwarten ist. Dies ist insofern relevant, als eine nachträgliche Energiebetrachtung stets eines zusätzlichen Schritts zur Datennachbearbeitung bedarf. Dieser wiederkehrende Aufwand ist letztlich dem initialen Aufwand für die Erstellung einer iSvMEF entgegenzusetzen und abzuwägen.

Unter Beachtung der genannten Kriterien kann letztlich ein **Ansatz zur Untersuchung** (PE.26) ausgewählt werden. Für die Durchführung der Simulationsstudie nach Abschnitt 4.3 liegt dabei der Fokus in der vorliegenden Arbeit auf der iSvMEF.

Ob die Prüfung hinsichtlich der Kriterien positiv oder negativ ausfällt, kann auf Grundlage der ausgewählten abstrahierten Maßnahme (siehe PE.14; vgl. Abschnitt 4.2.3) abgeschätzt werden. Hierzu wurden literaturgestützt typische Planungsinhalte sowie -aktivitäten, die im Vorfeld der Umsetzung der abstrahierten Maßnahmen relevant sind, analysiert. Diese Analyse zielt sowohl auf die Identifikation von Kriterien, für die ein Indikator zur Bewertung bei Anwendung des Lösungsmoduls abgeleitet werden kann, als auch auf die Ableitung ebendieser Indikatoren ab. Die detaillierten Analyseergebnisse sind in Tabelle D.3 (Anhang D.2) zusammengefasst. Aufbauend auf diesen können für fünf der Entscheidungskriterien (in Abbildung 4.3 durch die Ordnungsnummern SW1 bis SW5 hervorgehoben) **Bewertungsindikatoren** abgeleitet werden (vgl. Tabelle 4.5). Ersichtlich ist, dass nur jene Kriterien Beachtung finden, die im Zusammenhang mit Energie oder der abstrahierten Maßnahme stehen. Für Planungsfall 4 können die Vorlagen der Planungsfälle 2 und 3 herangezogen werden.

Tabelle 4.5: Maßnahmenbezogene Bewertungsindikatoren zur Simulationswürdigkeit

Planungsfall	**1**				**2**		**3**								
Abstrahierte Effizienzmaßnahme / **Kriterien in Flussdiagramm (verkürzt)**	**Optimierte Auftragssteuerung**	**Optimierte Anlagensteuerung**	**Veränderte Prozessparameter**	**Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten**	**Optimierte Auftragssteuerung**	**Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten**	**Prozess-/-kettenanpassung**	**Veränderter Rohteil-/Rohmaterialbedarf**	**Prozessintegration**	**Substitution**	**Prozesssicherheit/Fehlerrobustheit**	**Sophistication**	**Veränderte Prozesse/Prozessparameter**	**Vermeidung von Umgebungsverlusten**	**Vermeidung von Verlustleistung**
SW1 – Dynamische Betrachtung	⊡	⊡	○	□	⊡	□	□	□	□	□	○	○	□	○	○
SW2 – Bestandteil der Hypothese	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
SW3 – Erfassung über Zeit	□	⊡	□	□	⊡	□	□	□	○	□	○	○	□	○	○
SW4 – Leistungsverlauf und Systemzustände	□	⊡	□	□	⊡	□	○	○	○	□	○	○	□	○	○
SW5 – Beeinflussung Ablaufsteuerung	□	⊡	□	□	□	○	○	○	○	○	○	○	□	○	○

Legende:
○ – unwahrscheinlich
□ – möglich
⊡ – wahrscheinlich
■ – anzunehmen

Bei **Rückgriff auf die Bewertungsindikatoren** ist zu beachten, dass die Entscheidungsfindung zur Simulationswürdigkeit bezüglich der zu untersuchenden Hypothese vorzunehmen ist und Tabelle 4.5 nicht dogmatisch die Prüfung lenken soll. Der Anwender sollte daher den in Abbildung 4.3

gezeigten Ablauf orientieren, die Indikatoren in seine Bewertung der Kriterien unterstützend einbeziehen und letztlich sukzessiv Teilentscheidung (hinsichtlich der Kriterien) fällen, die im Projektkontext am zutreffendsten sind.

Mit Auswahl der Untersuchungsmethode zur Analyse und Bewertung der Planungslösung enden die fabrikplanerischen Vorarbeiten. Soweit die iSvMEF ausgewählt wurde, ist nach den folgenden Abschnitten zu verfahren. Andernfalls ist der frühe Abbruchpunkt der Gestaltungsmethodik erreicht und es folgt die Untersuchung mit alternativen Methoden.

4.3 Durchführung der Simulationsstudie: Simulationsbezogene Entscheidungen

Entsprechend den Ausführungen zur Synthese des Vorgehensmodells (vgl. Abschnitt 3.3.1) orientiert sich die Durchführung der Simulationsstudie an der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1. Demzufolge wird im Weiteren vorrangig auf diejenigen Aspekte detailliert eingegangen, die beim Einsatz der iSvMEF über die Richtlinie hinaus Beachtung finden müssen. Die Gliederung der Abschnitte folgt dabei den Schritten 6 bis 13 des Vorgehensmodells. Analog zur vorangehenden Phase findet sich in Tabelle D.2 (Anhang D.1) eine Checkliste zur Unterstützung des praktischen Einsatzes[33].

4.3.1 Definition der Simulationsaufgabe

Die Definition der Simulationsaufgabe in Schritt 6 des Vorgehensmodells umfasst 3 hauptsächliche Aspekte:

- Aufgabenspezifikation
- Zielsystem für die Simulationsstudie
- Initialer Experimentplan

Diese konkretisieren den Inhalt der Implementierung des Simulationsmodells sowie dessen intendierte Einsatzmöglichkeiten. Dazu wird zunächst die Hypothese für die ausgeplante Effizienzmaßnahme in eine **Aufgabenspezifikation zur Simulationsstudie** (SE.1 bis SE.6) überführt. Dieser Schritt ist vor allem bedeutsam, wenn die fabrikplanerischen Vorarbeiten, insbesondere die Planung der vorzunehmenden Systemanpassung, nicht vollständig durch den Simulationsanwender erfolgten. So dient die Spezifikation nach Rabe et al. [138, S. 47] und Wenzel et al. [162, S. 21] der Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses bei allen Beteiligten. Sie umfasst Rabe et al. zufolge die Inhalte:

33 Im Text erfolgt jeweils eine Kennzeichnung durch Hervorhebung und Ordnungsnummer im Format SE.1, SE.2 usw.

- „Zielbeschreibung und Aufgabenstellung [für die Simulationsstudie]“,
- „Beschreibung des zu untersuchenden Systems“,
- „Notwendige Informationen und Daten“,
- „Geplante Modellnutzung“,
- „Lösungsweg und -methode“ sowie
- „Anforderungen an Modell und Modellbildung“ [138, S. 61 ff.].

Die dahinter stehenden Informationen und Festlegungen können aufgrund zumeist noch unvollständiger Systemkenntnis z. T. nicht unmittelbar in diesem Schritt konkretisiert werden und bedürfen einer tiefer gehenden Systemanalyse. Demnach werden zunächst nur Festlegungen auf Grundlage der zu untersuchenden Hypothese (vgl. PE.18) und der Erkenntnisse des bisherigen Planungsprozesses getroffen. Diese sind im Folgeschritt durch weitere Ergebnisse der Systemanalyse (insbesondere Systemgrenzen, Energiemodell und einzusetzende Software; vgl. auch [162, S. 180]) zu ergänzen und zu detaillieren.

Für die iSvMEF stellt das **Zielsystem** (SE.9) eine besonders wichtige Grundlage für die Modellbildung dar. Tabelle 4.6 zeigt den Steckbrief des dazu entwickelten Lösungsmoduls. Dieses dient, unter Rückgriff auf typischerweise genutzte Gruppen von Kennzahlen, der Bestimmung eines simulationsspezifischen Zielsystems.

Tabelle 4.6: Steckbrief des Lösungsmoduls Zielsystem für Simulation

Lösungsmodul	Zielsystem für Simulation
Entscheidungskriterien	• Relevanz von Kriterien für Hypothese • Überschneidungsfreiheit • Direkte Messbarkeit im Simulationsmodell • Ggf. Gewichtung einzelner Kriterien
Lösungsvarianten	Zielsystem als Kombination einer oder mehrerer Zielkriterien abgeleitet von • 5 Aufgabenkategorien und • 7 Gruppen von Kennzahlen
Umwelteinflüsse	• Hypothese(n) für Effizienzmaßnahme(n)
Entscheidungsverfahren	• Vorgehen zur Entwicklung von Zielsystemen nach Putz et al. [184] (unter Zuhilfenahme einer Zuordnung von Gruppen von Kennzahlen zu Aufgabenkategorien)

Ausgangspunkt des Lösungsmoduls ist das von Putz et al. [184] vorgeschlagene Vorgehen zur Entwicklung nachhaltiger Zielsysteme. Dieses definiert die **Entscheidungskriterien** für das zugrundeliegende Auswahlproblem. Das Vorgehen wurde für die Integration in die Gestaltungsmethodik adaptiert und umfasst nunmehr die Teilaufgaben:

1. Analysieren der Ziele des Unternehmens und speziell des Planungsprojekts (vgl. PE.1) hinsichtlich ihrer *Relevanz* für die Planungsalternativen (Hypothesen)
2. Aufnahme direkt identifizierter Zielkriterien (aus den Bewertungskriterien für das Planungsprojekt, vgl. PE.2) oder Ableitung ersatzweiser Kriterien
3. Prüfung der *Messbarkeit* der Kriterien (unter Nutzung von Simulation)
4. Integration in ein transparentes Zielsystem, das *überschneidungsfrei* ist und erlaubt, dass einzelne Zielkriterien unabhängig voneinander erfüllt werden können
5. Ggf. Gewichtung einzelner Kriterien durch Rangfolgebildung oder andere Ansätze

Da Unternehmensziele und z. T. auch Projektziele meist deutlich abstrakter formuliert sind als die Ergebnisdaten, die sich durch den Einsatz von Simulation gewinnen lassen, ist die Ableitung ersatzweiser Bewertungskriterien in der Regel notwendig. Dies muss auf Grundlage der Aufgabenspezifikation geschehen. Die Analyse bisheriger Simulationsarbeiten (vgl. auch Abschnitt 2.3.3) hat in diesem Zusammenhang gezeigt, dass fünf typische **Aufgabenkategorien** existieren, die durch den Einsatz von Simulation zu lösen sind[34]. Zugleich können sieben **Gruppen von Kennzahlen** (vgl. Abschnitt 2.3.2) identifiziert werden[35], die unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit der Abbildung von Energieflüssen in der Simulation stellen. Diese Grundbausteine der **Lösungsvarianten** sind in Tabelle 4.7 aufgeführt und wurden um exemplarische Quellenangaben ergänzt. Anknüpfend daran zeigt Abbildung 4.4 eine Zuordnung jeweils relevanter Gruppen von Kennzahlen zu den Aufgabenkategorien, die ebenfalls aus der Analyse bisheriger Simulationsarbeiten in diesem Bereich abgeleitet wurde.

34 Diese leiten sich aus den „Einsatzzielen und Zwecken der Simulation mit energetischem Kontext“ ab, die von der ASIM Arbeitsgruppe „Betrachtung energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik“ identifiziert wurden (vgl. [103]).

35 Diese wurden in der ASIM Arbeitsgruppe „Betrachtung energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik“ bestimmt (vgl. [103]).

Tabelle 4.7: Typische Aufgabenkategorien und Kennzahlen in Simulationsstudien mit iSvMEF

Aufgabenkategorien	Gruppen von Kennzahlen
• Untersuchung / Prognose von Verbrauchsprofilen und -kennzahlen [84], [88], [185] • Machbarkeit / Gestaltung von Infrastruktur und Versorgungssystemen [97], [112], [186] • Kostenermittlung [111], [121], [187] • Bewertung der ökologischen Effizienz [87], [110], [188] • Bewertung der ökonomischen Effizienz (nicht notwendigerweise monetär) [189]–[191]	• Wertschöpfungsanteil beim Energieverbrauch [107], [189], [190] • Energieverbrauch (absolut oder relativ) pro Produkt/-variante oder Transporteinheit [108], [192], [193] • Energieverbrauch (absolut oder relativ) pro Zeiteinheit pro Anlage/Teilsystem/System [23], [117], [194] • Energieverbrauch nach Anlagenzuständen [106], [119], [121] • Emissionen, Umweltwirkungen, Zusammensetzung von Energieträgern [110], [188], [189] • Abgeleitete Leistungskennzahlen von Anlagen/Teilsystemen/Systemen (z. B. Spitzenlast) [85], [195], [196] • Energiekosten pro Zeit oder Produkt/-variante je Energieträger [84], [90], [111]

Die Entscheidung über die einzubeziehenden Zielkriterien (gemäß der zweiten Teilaufgabe zur Entwicklung des Zielsystems) orientiert sich somit entweder unmittelbar an den Bewertungskriterien des Projektes oder an der Hypothese für die zu untersuchende Effizienzmaßnahme (vgl. PE.18). Können Erstgenannte nicht direkt übernommen werden, so ist zunächst anhand der Hypothese eine relevante **Aufgabenkategorie** (SE.7) zu identifizieren. Mittels dieser Kategorien und unter Rückgriff auf Abbildung 4.4 werden dann **Gruppen von möglichen Kennzahlen** (SE.8) bestimmt. Ausgehend davon ist wiederum über einzubeziehende problemspezifische Kennzahlen zu entscheiden, die mittels Simulation zu ermitteln sind. Dazu wird der Rückgriff auf die in Tabelle 4.7 referenzierten aber auch auf weitere Arbeiten (vgl. Abschnitt 2.3) empfohlen. Die Arbeit von Schmidt et al. [197] lässt sich dabei als weitere methodische Stütze zur Kennzahldefinition einbeziehen.

Für die so bestimmten Zielkriterien gilt die Forderung, dass sie einen Beitrag zur Quantifizierung jener Bewertungskriterien (siehe PE.2) des Projekts liefern, die nicht direkt ins Zielsystem für die Simulation integriert werden können. Wird das Ergebnis des Planungsprojektes also beispielsweise an der Amortisationszeit der ausgeplanten Effizienzmaßnahme bemessen, so kann

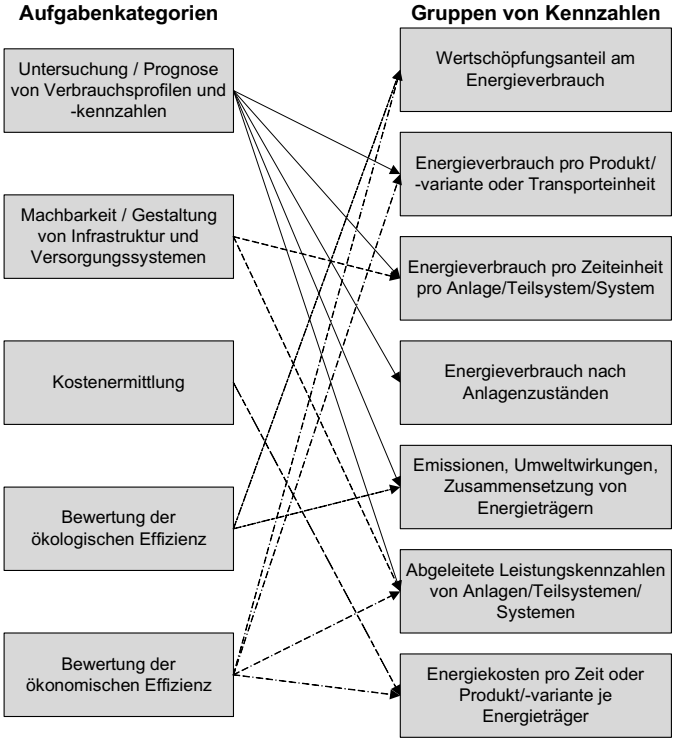


Abbildung 4.4: Zuordnung der relevanten Gruppen von Kennzahlen zu den Aufgabenkategorien

über das skizzierte Vorgehen die Kennzahl „Energiekosten pro Zeiteinheit" als simulativ zu ermittelndes Zielkriterium bestimmt werden. Zusammen mit den geplanten Investitionskosten (als Ergebnis der fabrikplanerischen Vorarbeiten) erlaubt diese im Anschluss an die Simulation die Ermittlung der Amortisationszeit.

Die Hypothese zur geplanten Effizienzmaßnahme stellt einen **Umwelteinfluss** für die Entscheidung über das in der Simulation evaluierte Zielsystem dar (vgl. Abschnitt 3.3.2). Existieren mehrere Hypothesen, so können diese in Form unterschiedlicher Umfeldszenarien zunächst der Bestimmung mehrerer unabhängiger Zielsysteme dienen. Diese sind gemäß dem von Putz et al. [184] beschriebenen Vorgehen (s. o.) jedoch wieder in ein einziges, überschneidungsfreies Zielsystem für die Simulation zu integrieren.

Wie auch beim Einsatz konventioneller Simulation, ist im Rahmen der Gestaltungsmethodik eine vorläufige Klärung zum Experimentplan in diesem Schritt vorzunehmen. Dieser beeinflusst maßgeblich, welche Parameter(-kombinationen) nach welchem Modus in die Simulationssoftware zu übergeben sind und wie oft mit dem implementierten Modell simuliert wird. Zur Unterstützung der Auswahl einer geeigneten **Experimentplanungsmethode** für die Entwicklung des initialen Experimentplans wurde ein Lösungsmodul entwickelt. Tabelle 4.8 zeigt den Steckbrief dieses Moduls.

Tabelle 4.8: Steckbrief des Lösungsmoduls Experimentplanungsmethode

Lösungsmodul	Experimentplanungsmethode	
Entscheidungskriterien	• Art der zu untersuchenden Alternativen lt. Hypothese • Untersuchungsziel • Anzahl relevanter Parameter • Anzahl möglicher Parameterkombinationen	• Methodenkenntnis des Anwenders • Automatisierbarkeit der Auswertung
Lösungsvarianten	• Szenarioanalyse • Sensitivitätsanalyse • Teil-/faktorielle Untersuchung • Methoden der statistischen Versuchsplanung	• Optimierung mit multikriterieller (Meta-)Heuristik • Optimierung mit (Meta-)Heuristik mit summarischer Zielfunktion • Untersuchung als kombiniertes MADM-MODM-Problem
Umwelteinflüsse	• Anzahl der Parameterstufen	• Zeit-/Aufwandsgrenzen für Untersuchung
Entscheidungsverfahren	• Flussdiagramm	

Die Literaturanalyse in Abschnitt 2.3.3 hat u. a. Aufschluss über die in bisherigen Simulationsarbeiten eingesetzten Experimentplanungsmethoden gegeben. Dieses Wissen wird herangezogen, um die Methodenauswahl zu unterstützen. Die in der Literaturanalyse erfassten Alternativen werden an dieser Stelle erweitert, um auch für komplexe Untersuchungsinhalte möglichst passgenaue **Lösungsvarianten** einbeziehen zu können. Konkret wird „Optimierung“ in „Optimierung mit multikriterieller (Meta-)Heuristik“ und „Optimierung mit (Meta-)Heuristik mit summarischer Zielfunktion“ aufgeteilt. Verfahren der erstgenannten Art versuchen, verschiedene Zielkriterien unabhängig voneinander zu optimieren (Ermittlung von Lösungen auf Pareto-

Fronten). Die der letztgenannten Art aggregieren die einzeln quantifizierten Zielkriterien in einen Gesamtwert, um Alternativen anhand eines Wertes zu priorisieren (vgl. [184]). Weiterhin wurde die Lösungsvariante „Untersuchung als kombiniertes MADM-MODM-Problem“[36] ergänzt. Probleme dieser Art sind nach Putz et al. [184] durch Problemintegration vor der Lösung oder aber durch sequentielle Problemlösung zu bewältigen.

Frühere Simulationsarbeiten (vgl. Abschnitt 2.3.3) dokumentieren auch Unterschiede hinsichtlich des Anwendungsfokus in Simulationsstudien, des zugrundeliegenden Untersuchungsansatzes und der Größe des untersuchten Lösungsraums zwischen den verschiedenen Experimentplanungsmethoden. Tabelle D.4 (vgl. Anhang D.3) fasst die literaturgestützte Charakterisierungen der hier betrachteten Lösungsvarianten zusammen. Aus diesen sowie auf Grundlage weiterer Überlegungen zum resultierenden Simulationsaufwand der jeweiligen Methoden wurden die nachfolgenden **Entscheidungskriterien** abgeleitet. Zur strukturierten Prüfung ebendieser und zur Unterstützung der Methodenauswahl dient der Ablauf[37] in Abbildung 4.5. Relevante Entscheidungskriterien sind demnach:

- *Art der zu untersuchenden Alternativen lt. Hypothese (SE.10):* Zunächst ist zu klären, um welche Art von Entscheidungsproblem es sich beim Gegenstand des Planungsprojektes handelt (vgl. Fußnote 36). Sind nur wenige komplexe Handlungsalternativen (z. B. unterschiedliche Steuerungsstrategien) mittels Simulation zu vergleichen, handelt es sich um ein MADM-Problem. Beinhaltet die Hypothese zur Effizienzmaßnahme hingegen eine Fragestellung hinsichtlich der Parameter (z. B. Bestimmung optimaler Losgrößen), so handelt es sich um ein MODM-Problem. Handelt es sich um eine Kombination beider Arten, ist zunächst zu klären, ob eine sequentielle oder integrierte Problemlösung angestrebt wird (s. o.).
- *Untersuchungsziel (SE.11):* Wird von einem MODM-Problem ausgegangen, ist zu prüfen, ob die Simulation lediglich zur Analyse des Systemverhaltens oder unmittelbar zur Findung der besten Parameter eingesetzt werden soll.
- *Anzahl relevanter Parameter (SE.12):* Wird nur das Systemverhalten untersucht, so gibt diese Prüfung Auskunft darüber, wie viele unabhängige Parameter Teil der Hypothese sind. Ist deren Anzahl gering, so kann eine

36 Multi-Objektiv-Entscheidungen (engl.: Multi-objective decision-making; kurz: MODM)) beziehen sich auf die Bestimmung einer geeigneten Lösung in einem sehr großen (unendlichen) Lösungsraum unter Beachtung mehrerer Zielkriterien. Im Gegensatz dazu wird bei MADM-Entscheidungen eine Alternative aus einem kleineren Lösungsraum ausgewählt. [184]

37 Die genutzten Grenzen (etwa für Anzahl von Parametern oder Parameterkombinationen) wurden auf Grundlage der bekannten Simulationsarbeiten in diesem Bereich (vgl. Abschnitt 2.3.3) abgeleitet und sind keinesfalls dogmatisch, sondern als Richtgrößen zu verstehen.

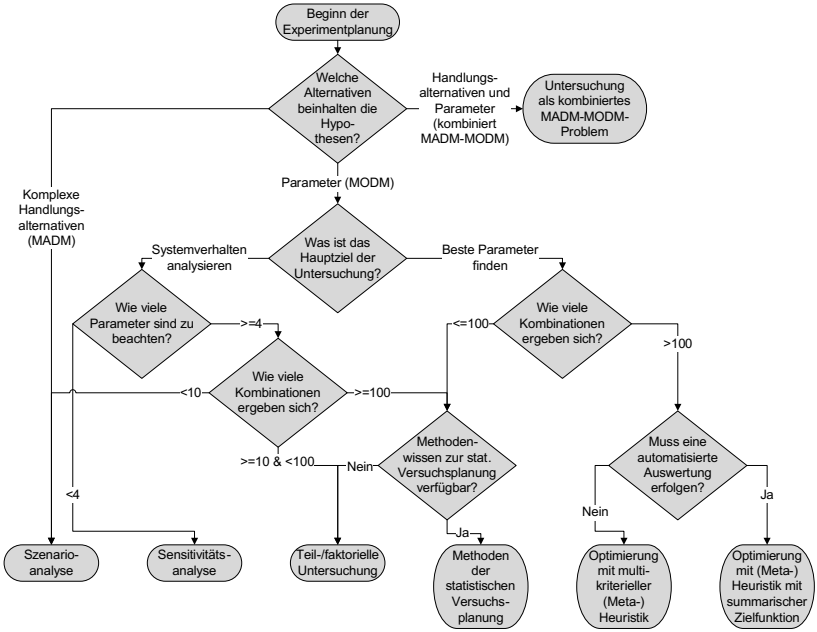


Abbildung 4.5: Flussdiagramm zur Auswahl der Experimentplanungsmethode

Sensitivitätsanalyse mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden. Andernfalls ist die Anzahl der Parameterkombinationen (unter Beachtung der möglichen Parameterstufen) zu prüfen.

- *Anzahl möglicher Parameterkombinationen (SE.13):* Hierbei wird geprüft, ob der Lösungsraum abhängig von dessen Größe gänzlich, teilweise oder möglichst gezielt (Optimierung) durchsucht werden sollte.
- *Methodenkenntnis des Anwenders (SE.14):* Im Falle eines nicht zu großen Lösungsraums kann der Einsatz von Methoden der statistischen Versuchsplanung (vgl. [20], [131]) den Aufwand verringern. Sind jedoch keine Methodenkenntnisse vorhanden, besteht die Gefahr fehlerhafter Anwendung und es ist zudem mit einem Aufwand zur Erlernung der Methoden zu rechnen, sodass umfänglichere Simulationsexperimente effizienter sein können.
- *Automatisierbarkeit der Auswertung (SE.15):* Ist eine Optimierung grundsätzlich empfehlenswert, wird geprüft, ob nachfolgend eine manuelle oder eine automatisierte Auswertung ohne Abwägung der einzelnen Bestandteile des Zielsystems angestrebt wird. Im letztgenannten Fall ist die Ermittlung mehrerer Lösungen auf Pareto-Fronten unzweckmäßig, da

hierbei nachgelagert eine von mehreren bestimmten Lösungen zu priorisieren und auszuwählen ist. Es sollte dann bevorzugt eine summarische Zielfunktion genutzt werden, mittels welcher eine unmittelbare Auswahl durch Rangfolgebildung möglich ist. Dies ist typischerweise der Fall, wenn eine Vielzahl von Zielkriterien zu beachten sind oder die Optimierung von Simulationsparametern in ein übergeordnetes Entscheidungsunterstützungssystem (vgl. [198, S. 45 f.]) integriert wird, z. B. zur Bestimmung der Auftragsreihenfolge mittels betriebsbegleitender Simulation.

Gerade die Anzahl der Parameter und deren Stufen, also die diskreten Werte, die sie annehmen können, sind durch den Simulationsanwender zu beeinflussen. Zugleich stellen auch die einzuhaltenden Grenzen für die Dauer und den Aufwand der Simulationsstudie **Umwelteinflüsse** für die Entscheidung zur einzusetzenden Experimentplanungsmethode dar. Folglich besteht die Möglichkeit, dass unterschiedliche Umfeldszenarien gebildet werden, in denen unterschiedliche Größenordnungen von Parameterkombinationen und Grenzen für Zeit- und Kapazitätsbedarf zur Durchführung der Simulationsstudie die Randbedingungen abbilden.

Somit erfolgt letztlich die **Auswahl der Experimentplanungsmethode** (SE.16) unter Abwägung von Aufwand (insbesondere zur Experimentplanung und -durchführung) und Nutzen (ausgehend von der in der Hypothese formulierten Untersuchungsfrage) anhand des zuvor erläuterten Ablaufs. Daran anschließend ist ein **initialer Experimentplan** (SE.17) mittels der selektierten Methode zu entwickeln und zu dokumentieren.

4.3.2 Systemanalyse

Schritt 7 hat die Entwicklung eines Konzeptmodells für das untersuchte System zum Ziel. Dieses umfasst, in Erweiterung zur Aufgabenspezifikation, die Modellierung der Systemstruktur sowie der Teilsysteme, eine systematische Zusammenstellung der erforderlichen Modelldaten sowie eine Übersicht über wiederverwendbare Komponenten (vgl. [138, S. 66 ff.], [162, S. 180]). Die Gestaltungsmethodik geht dabei primär auf Entscheidungen bezüglich der drei folgenden Aspekte ein, die in früheren Vorgehensmodellen aufgrund zugehöriger Modellierungsansätze zumeist vorweggenommen wurden (vgl. Abschnitt 2.4):

- Systemgrenzen der Energieflusssysteme
- Energiemodell
- Werkzeug/-architektur zur Simulation

Die Bestimmung der Systemgrenzen der Energieflusssysteme folgt einem Middle-Out-Ansatz (vgl. [162, S. 127]), bei dem ausgehend von den Elementen des Materialflusssystems (Maschinen und Anlagen) die einzubeziehenden Strukturebenen und Elemente der Energieflusssysteme ermittelt werden. Der Steckbrief des zugehörigen Lösungsmoduls ist in Tabelle 4.9 gezeigt.

Tabelle 4.9: Steckbrief des Lösungsmoduls Systemgrenzen der Energieflusssysteme

Lösungsmodul	Systemgrenzen der Energieflusssysteme	
Entscheidungs-kriterien	• Untersuchungsrelevanz • IVS-Bezug der Veränderung • Systemdynamik • Aggregationsbedarf von Ergebnisdaten	• Verbrauchsvariabilität • Datenverfügbarkeit • Aktor-Bezug der Veränderung
Lösungsvarianten	Systemgrenze flussaufwärts: • Erzeuger • Verteilung • Verbraucher	Systemgrenze flussabwärts: • Aktoren bzw. Teile von Verbrauchern • Verbraucher
Umwelteinflüsse	• Verfolgte abstrahierte Effizienzmaßnahme	• Hypothese(n) für Effizienz-maßnahme(n)
Entscheidungs-verfahren	• Flussdiagramm und Entscheidungsvorschläge auf Grundlage der ausgewählten Maßnahme	

Kern des Lösungsmoduls ist das in Abbildung 4.6 gezeigte Flussdiagramm. Dieses zeigt im linken Bereich die Folge, nach denen die vier hauptsächlichen Teilaspekte zu entscheiden sind: simulationsrelevante Energieflusssysteme, Systemgrenze stromaufwärts des Energieflusssystems, Systemgrenze stromabwärts sowie untersuchungsrelevante Systemelemente. Für die Bestimmung der Systemgrenzen sind zudem rechts die Sequenzen zur Prüfung der bedeutendsten Kriterien als Entscheidungsknoten nebst der Lösungsvarianten aufgezeigt.

Voraussetzung zum Einsatz des Lösungsmoduls ist die Bestimmung der **Systemgrenzen des Materialflusssystems** (SE.18). Diese wurden entweder im Rahmen der Aufgabenspezifikation bereits festgelegt oder sind in diesem Schritt noch zu konkretisieren. Ausgehend davon kann die **Identifikation simulationsrelevanter Energieflusssysteme** (SE.19) erfolgen. Ziel dabei ist es, eine Auswahl der mit den Materialflusselementen verbundenen Systeme zu treffen, die unmittelbar in der Simulation zu betrachten sind. Gemäß dem Zielsystem des Simulationsanwenders und den Leitsätzen der Simulation (vgl. [19, S. 6]) sind nur jene Energieflusssysteme als relevant zu betrachten, in denen

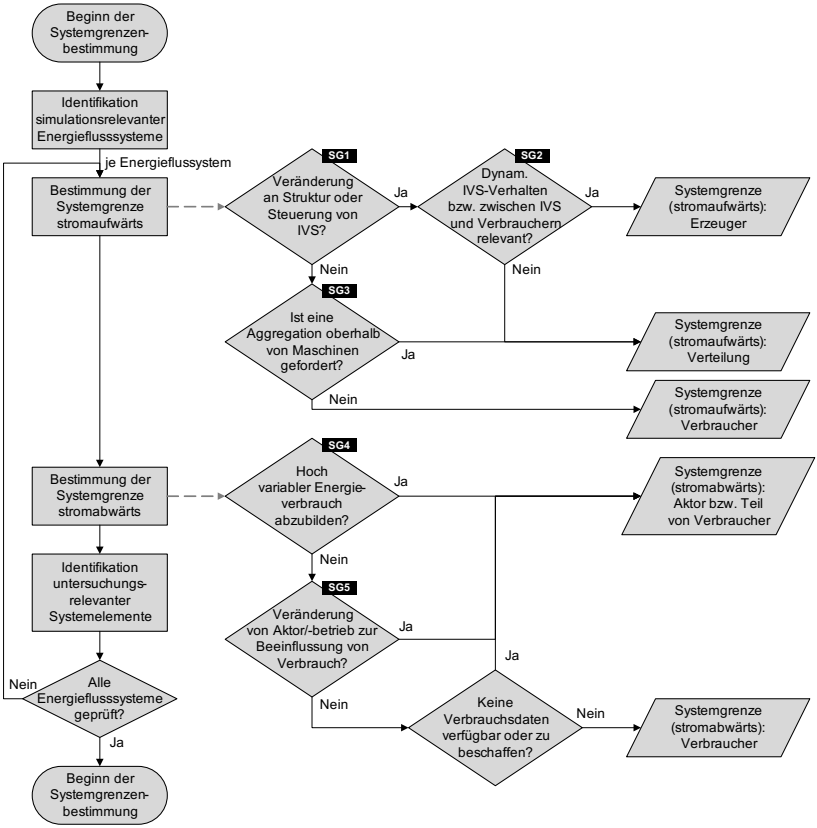


Abbildung 4.6: Flussdiagramm zur Bestimmung der Systemgrenzen der Energieflusssysteme

entweder laut Zielsystem eine unmittelbare Veränderung angestrebt wird oder deren Arbeitsweise sich derart verändert, dass dies wiederum Auswirkungen auf andere Energieflusssysteme bzw. das Zielsystem der Simulationsstudie hat.

Für jedes Energieflusssystem sind im Weiteren die Systemgrenzen stromauf- und stromabwärts sowie die relevanten Systemelemente zu bestimmen. Den Ausgangspunkt stellt wiederum der Verbraucher im Materialflusssystem, d. h. die Maschine bzw. die Produktionsanlage, dar. Für die **Systemgrenze stromaufwärts** (SE.23) ergeben sich dabei die **Lösungsvarianten** Verbraucher, Verteilung und Erzeuger. Es werden somit die Möglichkeiten der singulären Abbildung von Verbrauchern, der Abbildung einer (daten-)aggregierenden Verteilungsebene und der funktionalen Modellierung der tatsächlichen Erzeu-

ger unterschieden. Der für die Simulation zu betreibende Aufwand steigt dabei an, sodass die Systemgrenzen nur dann weiter stromaufwärts verlagert werden sollten, wenn dadurch auch ein bedeutender Erkenntnisgewinn zu erwarten ist. Nachstehende **Entscheidungskriterien**[38] dienen der Prüfung ebendieses:

- *IVS-Bezug der Veränderung (SE.20):* Initial wird geprüft, ob die Hypothesen gemäß Schritt 4 einen unmittelbaren Bezug zu Veränderungen des versorgenden Teils des Energieflusssystems haben. Diese können sich potenziell auf die Struktur oder auch die Steuerung beziehen.
- *Systemdynamik (SE.21):* Sind IVS-Anpassungen vorgesehen, so ist abzuwägen, ob das dynamische Verhalten der Versorgung bzw. zwischen Versorgung und Verbrauchern eine tatsächliche Relevanz für die Simulation hat, die die Abbildung der Erzeuger notwendig macht. Dies ist etwa der Fall, wenn eine bedarfsgesteuerte Medienerzeugung, z. B. für Druckluft, Untersuchungsgegenstand oder ein Erzeuger im Sinne der Untersuchung als endliche Kapazität zu betrachten ist. Andernfalls genügt zumeist die Aggregation der Ergebnisdaten auf Ebene der Verteilung, wobei der Erzeuger vereinfachend als unendliche Kapazität betrachtet wird.
- *Aggregationsbedarf von Ergebnisdaten (SE.22):* Wird die Versorgung eines Energieflusssystems nicht verändert, so können dennoch Ergebnisdaten auf der Verteilungsebene notwendig sein, etwa zur Bestimmung der Bedarfe unabhängiger Versorgungskreisläufe. Besteht hingegen kein solcher Aggregationsbedarf, so genügt die alleinige Abbildung der Verbraucher.

Im Weiteren ist die **Systemgrenze stromabwärts** (SE.27) zu bestimmen, wobei die **Lösungsvarianten** wiederum die Verbraucher als Ganzes oder in einer weiter untergliederten Form als Aktoren bzw. Bestandteile sind. Die Entwicklung von Modellen auf Aktorenebene (vgl. z. B. [199]) stellt einen signifikanten Aufwand dar, der im Kontext der (mit Materialflusssimulation) zu bearbeitenden Fragestellungen zumeist unzweckmäßig ist. Zugleich ist festzustellen, dass damit mitunter größere physikalische Genauigkeit erreicht werden kann. Den Ausführungen von Thiede [23, S. 135 ff.] folgend kann es daher zweckmäßig sein, energieintensive Systembestandteile detaillierter zu modellieren als andere. Zur grundsätzlichen Entscheidungsfindung sind, wie auch in Abbildung 4.6 gezeigt, folgende **Kriterien**[39] heranzuziehen:

38 Die Kriterien wurden mittels eines deduktiven Ansatzes identifiziert, bei dem hinterfragt wurde, unter welchen Bedingungen eine aufwändigere Modellierung (Systemgrenze stromaufwärts verschoben) notwendig ist, um den untersuchten Sachverhalt ausreichend genau abzubilden.

39 In Analogie zu den Entscheidungskriterien für die Systemgrenze stromaufwärts wurden auch die Kriterien hier mittels eines deduktiven Ansatzes identifiziert. Hierbei wurde hinterfragt, unter welchen Bedingungen eine aufwändigere Modellierung (Systemgrenze stromabwärts verschoben) notwendig ist, um den zu untersuchenden Sachverhalt ausreichend genau abzubilden.

- *Verbrauchsvariabilität (SE.24):* Es ist zu prüfen, ob der Leistungsverlauf einzelner Verbraucher sehr variabel ist und von nicht wiederkehrenden Bedingungen abhängt, sodass die Bildung einer überschaubaren Menge von Lastprofilen unpraktikabel oder sogar unmöglich wird. Dies kann beispielsweise bei der Modellierung einer Unikatfertigung der Fall sein, bei der Bearbeitungszeit und Energieverbrauch unmittelbar aus Produktdaten (Arbeitsplänen) abgeleitet werden. Eine Abbildung der Variabilität ist nicht notwendig, wenn die Untersuchung nicht primär auf diese variablen Verbrauchszeiträume abzielt, sondern z. B. auf Pausenverbräuche o. ä.
- *Aktor-Bezug der Veränderung (SE.25):* Trifft Voranstehendes nicht zu, kann es ebenfalls zielführend sein, Teile von Verbrauchern zu modellieren, wenn die Effizienzmaßnahme auf eine Veränderung von Aktoren bzw. deren Betrieb abzielt. Ein Beispiel dafür ist die Veränderung der Produktionsgeschwindigkeit zur zeitweisen Verringerung des Leistungsbedarfs. Dabei ist anzumerken, dass dies nur dann relevant ist, wenn Effekte einer Prozessanpassung auf den Verbrauch nicht mit vertretbarem Aufwand vorweggenommen werden können, sondern sich einfacher ad hoc auf der Aktorenebene bestimmen lassen.
- *Datenverfügbarkeit (SE.26):* In Analogie zum vorherigen Kriterium kann eine mangelnde Verfügbarkeit von Daten und Messmöglichkeiten für die Modellierung auf Aktorenebene sprechen. Soll beispielsweise eine Maschine durch eine komplett neu entwickelte Maschine mit Prozessintegration ersetzt werden, können auf diese Weise auch vor Fertigstellung der Maschine Simulationen durchgeführt werden.

Wurden die Systemgrenzen abstrakt festgelegt, sind die **untersuchungsrelevanten Systemelemente** (SE.28) zu identifizieren. Dazu ist wiederum ausgehend von den Elementen des Materialflusssystems zu bestimmen, welche weiteren Elemente der Infrastruktur- und Versorgungssysteme dem jeweiligen Energieflusssystem zugehörig und im Sinne der Hypothesen sowie Systemgrenzen für die Untersuchung relevant sind.

Analog zum Lösungsmodul Simulationswürdigkeit stellen die verfolgte abstrahierte Effizienzmaßnahme und die Hypothesen **Umwelteinflüsse** dar. Für Erstgenannte lassen sich Bewertungsindikatoren zur Unterstützung der Entscheidungsfindung ableiten. Konkret ist dies für die in Abbildung 4.6 gezeigten Entscheidungsknoten möglich, die durch die Ordnungsnummern SG1 bis SG5 gekennzeichnet sind. Die Grundlage zur Bestimmung der **Bewertungsindikatoren** bildet wiederum eine Analyse der abstrahierten Maßnahmen entsprechend Tabelle D.3 (vgl. Anhang D.2). Tabelle 4.10 zeigt mögliche Indikatoren, die in die Entscheidungsfindung einbezogen werden

können, jedoch keine dogmatische Vorgabe darstellen und problemspezifisch zu hinterfragen sind. Für Planungsfall 4 ist dabei auf die Indikatoren für die Fälle 2 und 3 zurückzugreifen. Insgesamt ist (auf Grundlage von Tabelle D.3) festzustellen, dass die funktionale Modellierung von Erzeugern eher in den hier nicht betrachteten Planungsfällen 5 – 8 (vgl. Abschnitt 3.2.3) notwendig scheint.

Tabelle 4.10:Maßnahmenbezogene Bewertungsindikatoren zu Systemgrenzen

Planungsfall	**1**				**2**		**3**								
Abstrahierte Effizienzmaßnahme / **Kriterien in Flussdiagramm (verkürzt)**	**Optimierte Auftragssteuerung**	**Optimierte Anlagensteuerung**	**Veränderte Prozessparameter**	**Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten**	**Optimierte Auftragssteuerung**	**Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten**	**Prozess-/-kettenanpassung**	**Veränderter Rohteil-/Rohmaterialbedarf**	**Prozessintegration**	**Substitution**	**Prozessicherheit/Fehlerrobustheit**	**Sophistication**	**Veränderte Prozesse/Prozessparameter**	**Vermeidung von Umgebungsverlusten**	**Vermeidung von Verlustleistung**
SG1 – IVS-Bezug der Veränderung	○	□	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SG2 – Systemdynamik	□	□	□	○	□	○	○	○	□	□	○	○	□	□	○
SG3 – Aggregationsbedarf von Ergebnisdaten	□	▣	□	○	□	○	○	○	▣	□	○	□	□	▣	○
SG4 – Verbrauchsvariabilität	□	□	□	○	□	○	□	□	□	○	○	○	□	○	○
SG5 – Aktor-Bezug der Veränderung	○	○	▣	○	○	○	□	□	▣	○	○	□	▣	○	○

Legende:
○ – unwahrscheinlich
□ – möglich
▣ – wahrscheinlich
■ – anzunehmen

Soweit **mehrere Hypothesen** zu untersuchen sind, werden diese als Umfeldszenarien betrachtet, die für sich genommen gemäß dem Ablauf in Abbildung 4.6 zu prüfen sind. Aus der so gewonnenen Schar von Systemgrenzen und -elemente für alle relevanten Energieflusssysteme ist ein final zu modellierendes Gesamtsystem abzuleiten. Typischerweise umfasst dieses eine Kombination aus Festlegungen zu Systemgrenzen und -elementen, mit der sich alle Hypothesen in geeigneter Weise untersuchen lassen. Erfordert also beispielsweise nur eine von fünf Hypothesen die Modellierung von Erzeugern, so sollte die Simulationsstudie unter der Prämisse vorangetrieben werden, dass Erzeuger zu modellieren sind. Von diesem Grundsatz kann abgewichen werden, wird die Hypothese in Anbetracht des Mehraufwands verworfen bzw. modifiziert.

Die **Struktur aller betrachteten Systemelemente** (SE.29), die in dem Modell abgebildet werden sollen, ist zu dokumentieren. Dazu kann beispielsweise eine Visualisierung wie die von Reinhart et al. vorgeschlagenen Energiewertstrommethodik eingesetzt werden [37], aber auch einfachere Darstellungsformen, wie etwa von Haag beschrieben [93, S. 86], können Einsatz finden. Ein Einsatz der Methodik von Hopf [15] ist zwar denkbar, erscheint aber aufgrund ihrer Komplexität unzweckmäßig. Von Bedeutung ist letztlich, dass erkenntlich wird, welche Elemente über alle Flusssysteme hinweg zu modellieren sind und welche Verbindungen zwischen ihnen bestehen bzw. zu beachten sind.

Nach Bestimmung der einzubeziehenden Elemente und Systemgrenzen stellt sich die Frage nach dem Modellierungsansatz für die Energieflusssysteme, dem **Energiemodell** (SE.30). Dazu wurde das in Tabelle 4.11 zusammengefasste Lösungsmodul entwickelt.

Tabelle 4.11: Steckbrief des Lösungsmoduls Energiemodell

Lösungsmodul	Energiemodell	
Entscheidungs-kriterien	• Datenbeschaffungsaufwand • Modellerstellungsaufwand • Verifikations- und Validierungsaufwand • Simulationsaufwand • Realitätstreue des Energieflussmodells	• Abbildungsmöglichkeiten Infrastruktur • Abbildungsmöglichkeiten Aktorik • Flexibilität für Experimentieren
Lösungsvarianten	• Äquivalente • Betriebszustände mit Durchschnittsleistung • Betriebszustände mit Leistungsverläufen	• Betriebszustände mit mathematischem Ersatzmodellen • Kontinuierliche/physikalische Modelle • Rein Betriebszustände
Umwelteinflüsse	• Systemgrenzen • Systemelemente	• Zielsystem für Simulation • Hypothese(n) für Effizienzmaßnahme(n)
Entscheidungs-verfahren	• Vorauswahl von Lösungsvarianten und AHP	

Die **Lösungsvarianten** lehnen sich dabei an die im Rahmen der Literaturanalyse erfassten Ausprägungen der Kategorie Energiemodell (vgl. Tabelle 2.10) an. Sie unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Form der abgebildeten physikalischen Größen und deren Verlauf über die Zeit. Dies wirkt sich einerseits auf den zu betreibenden Aufwand für deren Einsatz in Simulationsstudien und andererseits auf deren Fähigkeit zur Detaillierung der Energieflüsse sowie deren Flexibilität für das Experimentieren aus. Bezogen auf das Zielsystem des Simulationsanwenders (vgl. Abschnitt 3.2.1) entsprechen diese Aspekte den Dimensionen Aufwand und Zusatznutzen (Erkenntnisgewinn und Genauigkeit), respektive. Davon lässt sich ein die einzelnen **Entscheidungskriterien** strukturierendes, hierarchisches Zielsystem ableiten (vgl. Abbildung 4.7). Hierzu wurde der in Abbildung 3.3 angeführte Modellierungsaufwand nochmals untergliedert in Modellerstellungs-, Verifikations- und Validierungsaufwand, da diese entsprechend dem Vorgehensmodell gesondert Beachtung finden. Weiterhin wurde die Dimension des Zusatznutzens so untergliedert, dass eine Einschätzung des möglichen Erkenntnisgewinns und der erreichbaren Genauigkeit leichter möglich wird. Die Abbildungsmöglichkeiten beziehen sich dabei unmittelbar auf die im vorangehenden Lösungsmodul ausgewählten Systemgrenzen.

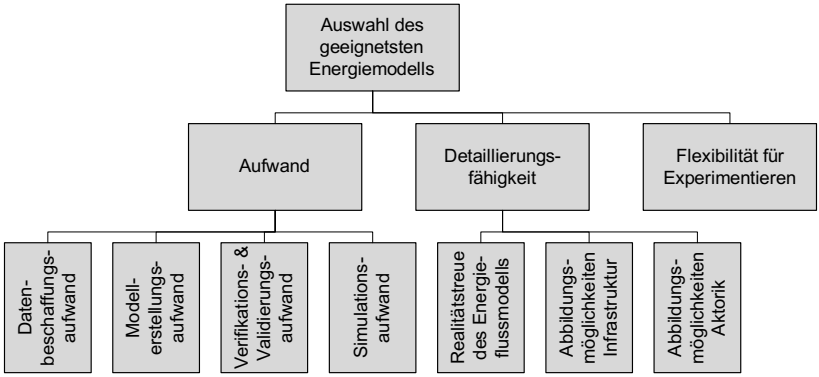


Abbildung 4.7: Zielsystem für die Auswahl des Energiemodells

Für die Auswahl je eines geeigneten Energiemodells zur Abbildung der jeweiligen Energieflusssysteme wird ein zweistufiger Prozess vorgeschlagen, in dem die relevanten **Umwelteinflüsse** entsprechend Beachtung finden:

1. *Vorauswahl:* Hierbei werden zunächst jene Lösungsvarianten eliminiert, die den Mindestanforderungen der Modellierung entsprechend den zuvor bestimmten Systemgrenzen und -elementen nicht genügen[40]. Hierzu lassen sich u. a. die in Tabelle D.6 (Anhang D.4) gezeigten Einschätzungen der Energiemodelle hinsichtlich der Entscheidungskriterien und die definierten Systemgrenzen der Energieflusssysteme heranziehen. Zudem können weitere vom Anwender der Gestaltungsmethodik identifizierte Lösungsvarianten hinzugefügt werden.
2. *Priorisierung und Auswahl:* Unter Anwendung des AHP wird eine Priorisierung der einzelnen Varianten vorgenommen. Hierzu sind die Kriterien zu gewichten und die betrachteten Energiemodelle entsprechend den Kriterien paarweisen Vergleichen zu unterziehen (vgl. Abschnitt 3.2.4). Ausgangspunkt dafür sind einerseits das Zielsystem für die Simulation sowie die Hypothesen für die Effizienzmaßnahmen und andererseits die Eigenschaften der einzelnen Energiemodelle. Letztere wurden in Tabelle D.6 (Anhang D.4) hinsichtlich der Entscheidungskriterien eingeschätzt. Nach erfolgter Berechnung der idealisierten Priorität erfolgt schließlich die Auswahl des einzusetzenden Energiemodells.

40 Es sei angemerkt, dass die weitere Einschränkung der zu betrachtenden Lösungsvarianten auf Grundlage der verfolgten abstrahierten Effizienzmaßnahme möglich scheint. Das im Weiteren verfolgte Entscheidungsverfahren bedarf jedoch nicht zwingend einer umfänglichen Vorauswahl, sodass diese Möglichkeit hier nicht weiter verfolgt wird.

Zur Unterstützung des praktischen Auswahlprozesses mit AHP wurde eine **Tabellenkalkulation** in LibreOffice Calc entwickelt (siehe Anhang D.4, Abbildung D.1 bis Abbildung D.3). Diese stellt geeignete Eingabemasken bereit, verarbeitet getätigte Eingaben und berechnet somit idealisierte Prioritäten für die betrachteten Alternativen entsprechend der Berechnungsvorschriften aus Abschnitt 3.2.4.

Zur weiter vereinfachten Anwendung des Lösungsmoduls wurden zudem auf Grundlage von Erkenntnissen der Literaturanalyse (vgl. Abschnitt 2.3.3), des Austauschs mit anderen Fachexperten sowie von Projekterfahrungen des Autors **globale Prioritäten** (Gewichtungen) für die angeführten Kriterien entwickelt. Die Ergebnisse der so getätigten paarweisen Vergleiche (gemäß Abschnitt 3.2.4) sind in der Tabellenkalkulation voreingetragen. Der resultierende und in Tabelle 4.12 gezeigte Vorschlag ist jedoch keineswegs dogmatisch zu sehen und kann ebenso durch den Anwender projektspezifisch angepasst werden. Die Details zur Bestimmung dieser Prioritäten sind in Anhang D.4 genauer erläutert.

Tabelle 4.12:Globale Priorität der Entscheidungskriterien zur Auswahl des Energiemodells

	Aufwand				**Detaillierungsfähigkeit**			
	Datenbeschaffungsaufwand	**Modellerstellungsaufwand**	**Verifikations- und Validierungsaufwand**	**Simulationsaufwand**	**Realitätstreue des Energieflussmodells**	**Abbildungsmöglichkeiten Infrastruktur**	**Abbildungsmöglichkeiten Aktorik**	**Flexibilität für Experimentieren**
Globale Priorität	0,306	0,026	0,060	0,135	0,243	0,063	0,027	0,140

Ist der Modellierungsansatz je Energieflusssystem ausgewählt, sind die Architektur der Simulationsumgebung und die konkrete Software, d. h. **Werkzeug und dessen Architektur** (SE.31), auszuwählen. Dazu ist festzustellen, dass Unternehmen, in denen Simulationen Einsatz finden, zumeist bereits über eine Simulationssoftware verfügen oder einen Dienstleister einbinden, der wiederum über ein oder mehrere Softwarepakete verfügt. Für die Gestaltungsmethodik wird angenommen, dass der Anwender selbst über eine Materialflusssimulationssoftware verfügt und keine weitere Software auszuwählen ist. Trifft dies nicht zu, so sei auf die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 für relevante Kriterien verwiesen [130], um zunächst eine geeignete Software festzulegen.

Unter Beachtung dieser Annahme reduziert sich der Entscheidungsbedarf auf die Auswahl einer Architektur. Dazu dient das in Tabelle 4.13 überblicksweise gezeigte Lösungsmodul. Anzumerken ist, dass die Auswahl einiger möglicher Architekturansätze den Einsatz ergänzender Simulationssoftware erforderlich macht. Inwieweit daraus zusätzliche Kosten folgen, hängt insbesondere von der Verfügbarkeit geeigneter Softwarepakete im Unternehmen ab.

Tabelle 4.13: Steckbrief des Lösungsmoduls Werkzeug/-architektur

Lösungsmodul	Werkzeug/-architektur	
Entscheidungs-kriterien	• Modellerstellungsaufwand • Simulationsaufwand • Zusatzkosten	• Eignung für Energiemodelle • Flexibilität für Experimentieren
Lösungsvarianten	• Materialflusssimulation mit Auswertung von Ersatzgrößen • Materialflusssimulation mit nachgelagerter Auswertung von Energie-Kennzahlen • Materialflusssimulation mit integrierter Energiebewertung • Mehrere Simulationsmodelle mit Offline-Kopplung	• Mehrere Simulationsmodelle mit Online-Kopplung • Simulationswerkzeug mit mehreren Simulationsmethoden • Alternative Simulationsmethoden (z. B. kontinuierliche Simulation)
Umwelteinflüsse	• Energiemodell • Verfügbarkeit von Software	• Systemelemente • Hypothese(n) für Effizienzmaßnahme(n)
Entscheidungs-verfahren	• Vorauswahl von Lösungsvarianten und AHP	

In Abschnitt 2.3.3 wurden bisherige Simulationsstudien zunächst vornehmlich nach der eingesetzten Simulationsmethode differenziert. Da es bei deren Einsatz jedoch mitunter deutliche Unterschiede gibt, wird hier auf die in Tabelle 4.13 aufgeführten **Lösungsvarianten**[41] zurückgegriffen. Gemäß der Erkenntnisse der systematischen Literaturanalyse wird jedoch die Möglichkeit des Einsatzes alternativer Simulationsmethoden im Weiteren vernachlässigt (vgl. Tabelle 3.1). Weiterhin ist festzustellen, dass den Ausführungen von Schritt 5 folgend hier eigentlich nur die iSvMEF im Fokus ist und die zwei

41 Diese leiten sich aus den „eingesetzten Simulationswerkzeugen" ab, die von der ASIM Arbeitsgruppe „Betrachtung energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik" identifiziert wurden (vgl. [103]).

erstgenannten Lösungsvarianten (Ersatzgrößen bzw. nachgelagerte Auswertung) alternativ dazu Ansätze ohne iSvMEF darstellen. Sie finden hiernach dennoch Beachtung, da eine genauere Systemanalyse – unabhängig von der Prüfung in Schritt 5 – durchaus zeigen kann, dass diese Alternativen für die Untersuchung praktikabler sind. Alle Lösungsvarianten sind in Anhang D.5, Tabelle D.12, genauer erläutert.

Die Lösungsvarianten können hinsichtlich des notwendigen Aufwands zur Modellerstellung, Simulation und etwaigen Softwarebeschaffung sowie ihrer Eignung zur Umsetzung der zuvor ausgewählten Energiemodelle und der Flexibilität für das Experimentieren eingeschätzt werden. Es ergibt sich somit ein Zielsystem in Analogie zur Auswahl der Energiemodelle. Abbildung 4.8 zeigt dazu, wie die **Entscheidungskriterien** in einer hierarchischen Struktur dargestellt werden können. Die Bestimmung des Werkzeugs und dessen Architektur erfolgt dann anhand folgender Teilschritte und unter Verwendung des AHP:

1. *Identifikation geeigneter Lösungsvarianten:* Ausgehend von den zuvor bestimmten Energiemodellen werden zunächst jene Architekturen bestimmt, die grundsätzlich in Frage kommen, d. h. nicht ungeeignet sind. Ausgangspunkt für diese Einschätzung ist Tabelle D.14, die wiederum auf den in Anhang D.5 zusammengefassten Erkenntnissen aus der Literaturanalyse und weiteren Quellen basiert. Soweit unterschiedliche Energiemodelle für die einzubeziehenden Energieflusssysteme gewählt wurden, wird eine Priorisierung empfohlen, sodass letztlich ein konkretes Energiemodell/-flusssystem als Referenz für das weitere Vorgehen dient. Ausgeschlossen werden können dabei jene Lösungsvarianten, mit denen sich die zuvor bestimmten Systemelemente nicht in geeigneter Weise modellieren lassen. Ist beispielsweise die Abbildung des Energieverbrauchs der Materialflusselemente auf Aktorenebene mittels physikalischer Modelle notwendig, wobei Wechselwirkungen bidirektional relevant sind, so kann die „Offline-Kopplung“ als ausgeschlossen werden. Auch die Verfügbarkeit von Software bzw. die Notwendigkeit der Anschaffung zusätzlicher Software kann als Ausschlusskriterium herangezogen werden.
2. *Auswahl einer Werkzeugarchitektur:* Die verbliebenen Lösungsvarianten sind mithilfe des AHP zu priorisieren. Die Gewichtung der einzelnen Entscheidungskriterien ist hierbei jedoch spezifisch für die Untersuchung, sodass sich keine Bewertungsvorschläge erarbeiten lassen. Folglich muss der Anwender unter Beachtung der Hypothesen für Effizienzmaßnahmen entscheiden, welche Bedeutung insbesondere die

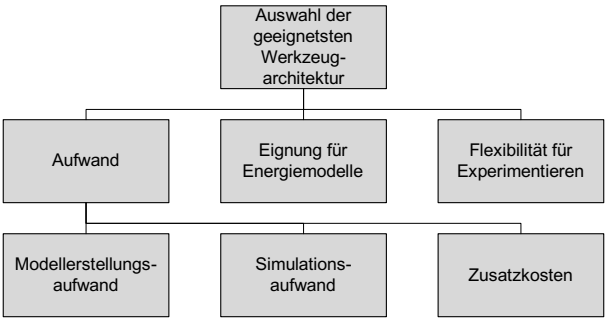


Abbildung 4.8: Zielsystem zur Auswahl eines Ansatzes für die Werkzeugarchitektur

Flexibilität für das Experimentieren sowie der Aufwand (und dessen sekundäre Kriterien) haben. Anschließend sind die Lösungsvarianten anhand der Kriterien zu vergleichen. Einen Anhaltspunkt für die Kriterien Modellerstellungs- und Simulationsaufwand sowie Flexibilität für Experimentieren bietet Tabelle D.13 (Anhang D.5), in der die Architekturansätze diesbezüglich verglichen werden. Hinsichtlich der Eignung für Energiemodelle kann wiederum Tabelle D.14 Beachtung finden. Zur Unterstützung des AHP wurde analog zum Lösungsmodul Energiemodell eine Tabellenkalkulation in LibreOffice Calc entwickelt (vgl. Anhang D.4).

3. *Evtl. Auswahl weiterer Software:* Wurde eine Architektur mit Online- oder Offline-Kopplung ausgewählt, kann es notwendig sein, weitere einzusetzende Software auszuwählen. Diese dient dann typischerweise der Simulation bzw. Berechnung der Energieverbräuche. Anhaltspunkte dazu können bisherige Arbeiten in diesem Themengebiet liefern (vgl. Liste der analysierten Simulationsstudien in Anhang A).

Abschließend sind die **einzusetzende Software** (SE.32) und die **Architektur** (SE.31) des Simulationssystems zu dokumentieren. Weiterhin sollte je Energieflusssystem eine genauere **Spezifikation des Modellierungsansatzes** (SE.33) erfolgen. Hierunter fallen etwa Festlegungen zur Diskretisierung von Leistungsverläufen, zu einzubeziehenden Betriebszuständen oder zur Realisierung einer kontinuierlichen Modellierung. Daraus sind wiederum die **erforderlichen Modelldaten** (SE.34), insbesondere bezüglich zu erhebender Energiedaten, sowie eine Liste **wiederverwendbarer Komponenten** (SE.35) zur Modellierung der Energieflusssysteme abzuleiten.

4.3.3 Modellformalisierung

Ausgehend vom zuvor entwickelten Konzeptmodell und unter Beachtung des einzusetzenden Simulationswerkzeugs sind in Schritt 8 Formalisierungen der abzubildenden Systemelemente und der zu implementierenden Ablauflogik vorzunehmen. Diese dienen als Voraussetzung für die folgende Implementierung. Hinweise zur Formalisierung der Materialflusselemente und notwendiger Steuerungen (z. B. zur Abbildung der PPS) finden sich in der Literatur, z. B.: [19, S. 31], [78, S. 155 ff.], [138, S. 74 ff.], [162, S. 133 ff.]. Zum Einsatz der iSvMEF sind insbesondere folgende Aspekte zu konkretisieren:

- Ablauflogik zur Interaktion der einzelnen Flusssysteme
- Modellierung der Energieflusssystemelemente
- Ablauflogik zur Steuerung von Energieflusselementen

Von zentraler Bedeutung ist die Abbildung von Wechselwirkungen zwischen Material- und Energieflusselementen, insbesondere da, wo diese sich auf das gleiche reale Objekt bzw. Teilsystem beziehen. Aus der Literatur heraus konnten dabei folgende grundsätzliche Ansätze für die **Ablauflogik zur Interaktion der einzelnen Flusssysteme** (SE.36) identifiziert werden:

- *Simulation von Energiefluss folgt Betriebszuständen im Materialfluss:* Änderungen des Leistungsbedarfs einzelner Elemente ergeben sich unmittelbar aus Ereignissen, die den Zustand des Materialflusselements verändern, oder infolge ebendieser, z. B. zeitgesteuert, sodass eine direkte Zuordnung von Energieflussintensität und Betriebszustand im Materialfluss existiert (z. B. [90, S. 106 ff.])
- *Simulation von Energiefluss wird beeinflusst durch Materialflussereignisse:* Änderungen von energetischen Kenngrößen ergeben sich aus bisherigem Simulationsverlauf (Zustände der Energie-/Materialflusssystemelemente) und Veränderungen, die als Ereignis im Materialfluss auftreten, z. B. aus dem Eintreffen eines weiteren Fördergutes am Bandförderer, sodass Energieflussintensität nur mittelbar vom Materialfluss abhängt (z. B. thermische Gebäudesimulation in Fabrik [84, S. 79 ff.])
- *Simulation von Material- und Energiefluss beeinflussen sich gegenseitig:* Energieflusssystem wird entsprechend einem der voranstehenden Ansätze beeinflusst, zugleich nimmt es aber auch Einfluss auf Materialfluss, sodass Kongruenz der Zustände zwischen Flusssystemen erzwungen wird (z. B. [128])

Abhängig vom verfolgten Ansatz zur Ablauflogik ergeben sich einerseits Unterschiede hinsichtlich der möglichen Detailtreue sowie der Konsistenz im Simulationsverlauf und andererseits bezüglich der Anforderungen an die Modellierung der Energieflusselemente. Eine reine Zuordnung von Betriebs-

zuständen ist beispielsweise einfacher umzusetzen, erlaubt aber keine Betrachtung von dynamischem Verhalten von Verbrauchern, Erzeugern oder dem Zusammenspiel ebendieser. Die weiteren Ansätze erlauben dafür respektive eine bedingte oder fortschreitende Simulation der Energieflüsse (z. B. für thermische Energie) bzw. die Modellierung von Energieangebotsengpässen. Welcher Ansatz letztlich Anwendung findet, ist zentral von den zu untersuchenden Hypothesen für die vorausgewählten Effizienzmaßnahmen abhängig und sollte einer Aufwand-Nutzen-Abwägung folgen. Diese wird in hohem Maße durch diverse projektspezifische Aspekte beeinflusst. Deshalb kann an dieser Stelle kein formelles Vorgehen zur Unterstützung der Entscheidung vorgegeben werden.

Unter Beachtung der vorausgehend festgelegten Ablauflogik und der in Schritt 7 erstellten Liste von wiederverwendbaren Komponenten ist die **Modellierung der Energieflusselemente** (SE.37) vorzunehmen. Ziel ist eine formale Spezifikation der zu simulierenden Elemente, wobei auf das ausgewählte Energiemodell sowie die festgelegte Software zurückzugreifen ist. Ausgehend von aus der Literatur bekannten Implementationen (vgl. u. a. [23], [84], [86], [88]–[91], [93], [94], [96], [97]) ist insbesondere Folgendes zu klären:

- Welche *softwarespezifischen Möglichkeiten zur Modellierung* (vorhandene Simulationselemente, Programmiersprachen etc.) sind für die Simulation der Energieflüsse zu nutzen?
- Wie erfolgt die *Parametrierung und Berechnung bzw. Erfassung der Energieflüsse* in einzelnen Elementen und insgesamt (Berechnungsvorschriften, Diskretisierung etc.)?
- Welche *Wirkungszusammenhänge* bestehen zwischen Material- und Energieflusssystemen (beispielsweise für Regression von Anlageninhalt und Leistungsaufnahme, vgl. [200])?
- Welche Notwendigkeiten und Möglichkeiten zur *Abbildung stochastischer Komponenten* bestehen (beispielsweise für stochastische Lastprofile, vgl. [94, S. 56 ff.])?
- Welche *Schnittstellen zur Interaktion* mit anderen Material- oder Energieflusselementen sind vorzusehen und wie sind diese auszuführen?
- Welche *Ablauflogik* ist zur Simulation der Energieflüsse in Elementen notwendig?

Der Rückgriff auf bereits etablierte bzw. erprobte Ansätze kann dabei den zu betreibenden Aufwand verringern, soweit die verwendete Software nicht ohnehin ausreichende Möglichkeiten bietet. Dazu zeigt Tabelle 4.14 eine Über-

sicht ausführlich beschriebener Modellierungsansätze für ausgewählte Energieflusssysteme. Die formalisierten Energieflusselemente sind in geeigneter Weise zu dokumentieren.

Tabelle 4.14:Modellierungsansätze für Energieflusselemente

Allgemeine Ansätze	**Elektrische Energie**	**Druckluft**	**Thermische Energie / Klimatechnik**	**Fluide (Dampf, Gas, Wasser usw.)**
• Hopf [15, S. 64 ff.] • Stoldt et al. [128], [201] • Weinert [88, S. 59 ff.]	• Beier [97, S. 116 ff.] • Haag [93, S. 75 ff.] • Junge [84, S. 56 ff.] • Khalaf [90, S. 92 ff.] • Kohl [96, S. 56 ff.] • Schacht [94, S. 56 ff.] • Solding [86, S. 66 ff.] • Thiede [23, S. 97 ff.]	• Beier [97, S. 125 ff.] • Haag [93, S. 81 ff.] • Thiede [23, S. 108 ff.]	• Junge [84, S. 44 ff.]	• Haag [93, S. 78 ff.] • Khalaf [90, S. 92 ff.] • Thiede [23, S. 114 ff.]

Soweit die Ablauflogik zur Interaktion der Flusssysteme nicht nur eine reine Zuordnung auf Grundlage der Betriebszustände im Materialflusssystem vorsieht, ist auch eine **Ablauflogik für die Steuerung von Energieflusselementen** (SE.38) zu definieren. Dies kann im Zuge der Modellierung der einzelnen Elemente geschehen, jedoch ist auch die Entwicklung unabhängiger Steuerungsalgorithmen denkbar. Dies entspricht der Modellierung von Gebäudeleittechnik, Kopfsteuerungen oder Leitständen. Sie können etwa zur zentralen Steuerung von Elementen der Infrastruktur- und Versorgungssysteme oder der Betriebszustände von Betriebsmitteln dienen (vgl. z. B. [202]). Die Form der Beschreibung und das Vorgehen zur Spezifikation kann dabei weitgehend frei gewählt werden, hierzu „gibt es […] kein allgemeingültiges Verfahren“ [162, S. 133] (vgl. auch [78, S. 155 ff.]).

4.3.4 Datenbeschaffung

Parallel und in Rückkopplung mit der Systemanalyse sowie der Modellformalisierung verläuft die Datenbeschaffung. Die beiden zuerst angeführten Schritte geben den zentralen Input für die in Schritt 9 des Vorgehensmodells zu definierenden Anforderungen hinsichtlich der zu beschaffenden Daten. Nach Khalaf erfordert die um energetische Betrachtungen erweiterte Simulation die Beschaffung von technischen Daten, Organisationsdaten, Systemlastdaten und Energiedaten [90, S. 64 ff.]. Die drei erstgenannten sind stets für Materialflusssimulationen zu beschaffen und Hinweise dazu finden sich in der relevanten Literatur (vgl. [19, S. 33 ff.], [78, S. 158 ff.], [138, S. 86 ff.], [162, S. 119 ff.]). Folglich liegt der Fokus im Weiteren auf den Energiedaten und konkreter der Energiedatenakquisemethode, mit der diese zu beschaffen sind. Zu deren Auswahl wurde das in Tabelle 4.15 überblicksweise gezeigte Lösungsmodul entwickelt.

Tabelle 4.15: Steckbrief des Lösungsmoduls Energiedatenakquisemethode

Lösungsmodul	Energiedatenakquisemethode	
Entscheidungskriterien	• Grundsätzliche Eignung für Energiemodell • Planungs-/Vorbereitungsaufwand • Durchführungsaufwand • Beschaffungsaufwand	• Anwendbarkeit • Erfüllung von Randbedingungen • Erfüllung von Genauigkeitsanforderungen
Lösungsvarianten	• Herstellerangaben • LCI-Datenbanken • Analytisches/physikalisches Modell • Numerische Simulation • Historische Messungen	• Spot-Messungen • Dauerhafte Messungen • Historische Verbrauchsdaten • Umlage/kalkulatorische Ermittlung • Vergleichen und Schätzen
Umwelteinflüsse	• Gewähltes Energiemodell • Zugang zu Messmitteln/Software/Anlagen	• Datenverfügbarkeit
Entscheidungsverfahren	• Entscheidungsvorgehen zur effizienten Datenakquise nach Süße et al. [203], [204]	

Ausgangspunkt für die **Identifikation der Lösungsvarianten** war eine Literaturrecherche. Auf deren Ergebnissen aufbauend wurden weitere Möglichkeiten zur Datenakquise mittels freier Assoziation (vgl. [180, S. 85 f.]) eruiert. Vier zentrale Arbeiten ließen sich hierbei in der Literatur ausfindig

machen. Kouki et al. beschreiben vier grundsätzliche Ansätze zur Energiedatenakquise: LCI-Datenbanken[42], technische Dokumentation, mathematische Modelle und Messungen [101]. Als Ausgangspunkt zur Energiebedarfsprognose von Maschinen diskutieren Schmidt et al. wiederum Exergieanalysen, Nennleistung, Simulation und empirische Methoden [205]. Weinert differenziert hingegen nach praktischer (betriebsbegleitende Erfassung und Analysemessungen) und theoretischer Profilermittlung (numerische Simulation, analytische Berechnung und Abschätzung) [88, S. 67]. Kohl baut wiederum auf Weinert auf, ergänzt dabei aber keine weiteren Ansätze [96, S. 53].

Die jeweiligen Energiedatenakquisemethoden weisen, insbesondere mit Blick auf die möglichen Ergebnisdaten und den zu betreibenden Aufwand, unterschiedliche **Eigenschaften im Einsatz** auf. Weinert schätzt dazu die verschiedenen Ansätze hinsichtlich ihrer Eignung für das von ihm entwickelte Planungssystem ein [88, S. 69]. Dabei unterscheidet er die Anwendung auf Referenzprozess oder Realprozess. Für die vorliegende Arbeit wird jedoch festgestellt, dass Daten aus Referenzprozessen zum Zwecke einer detailgetreuen Simulation zumeist nicht unmittelbar nutzbar sind. Folglich wird eine derartige Differenzierung hier nicht weiter verfolgt. Kohl nimmt analog zu Weinert eine Bewertung der Methoden vor, nutzt dazu jedoch ein anderes Bewertungsschema [96, S. 53 ff.].

Eine Vielzahl der bisherigen Arbeiten zur iSvMEF geht davon aus, dass die Durchführung von Messungen das wichtigste, wenn nicht das einzige Mittel für die Energiedatenakquise zum Zwecke der Simulation ist [23, S. 137 ff.], [90, S. 68 ff.], [93, S. 87 ff.], [94, S. 62 ff.], [97, S. 164]. Nicht zuletzt infolge dessen gibt es bislang eine größere Zahl von Arbeiten, die sich konkret mit der Messung von Energiedaten beschäftigen bzw. Hinweise zur Durchführungen der Messungen geben [23, S. 137 ff.], [90, S. 68 ff.], [96, S. 93 ff.], [101], [206], [207]. Dennoch werden an dieser Stelle auch andere Methoden einbezogen, die in Tabelle D.15 (Anhang D.6) genauer charakterisiert sind. In analoger Weise zu Weinert und Kohl wird in Tabelle 4.16 die Eignung der **Lösungsvarianten** zur Energiedatenakquise für die verschiedenen Energiemodelle (vgl. Lösungsmodul Energiemodell in Abschnitt 4.3.2) abgeschätzt. Beachtung finden dabei die typischerweise möglichen Ergebnisdaten und die Relation ebendieser zum notwendigen Aufwand.

42 Datenbanken für Lebenszyklusinventare (vom englischen Life Cycle Inventory; kurz: LCI) stellen Daten zu Energieverbrauch und Umweltwirkungen für Materialien, Prozesse usw. zum Zwecke von LCA-Untersuchungen zur Verfügung.

Tabelle 4.16:Eignung der Energiedatenakquisemethoden für Rohdatenbeschaffung der Energiemodelle

Energiemodelle / **Energiedaten-akquisemethoden**	**Äquivalente**	**BZ mit Durch-schnittsleistung**	**BZ mit Leistungs-verläufen**	**BZ mit mathematischen Ersatzmodellen**	**Kontinuierliches/ physikalisches Modell**	**Rein Betriebszustände**
Herstellerangaben	++	++	+	++	++	n. r.
LCI-Datenbanken	++	-	-	-	-	n. r.
Analytisches/physikalisches Modell	+	+	++	+	++	n. r.
Numerische Simulation	-	-	++	+	++	n. r.
Historische Messungen	-	+	+	+	-	n. r.
Spot-Messungen	-	++	++	++	-	n. r.
Dauerhafte Messungen	-	++	++	++	-	n. r.
Historische Verbrauchsdaten	-	+	-	-	-	n. r.
Umlage/kalkulatorische Ermittlung	-	+	-	-	-	n. r.
Vergleichen und Schätzen	+	+	-	+	-	n. r.

Legende:
n. r. nicht relevant
\- ungeeignet
\+ eingeschränkt geeignet
++ geeignet

Die Übersicht zeigt, dass für jedes Energiemodell, welches Energiedaten als Eingangsdaten benötigt, unterschiedliche Energiedatenakquisemethoden in Frage kommen. Zur Auswahl einer effizienten Methode wird das von Süße et al. [203], [204] entwickelte Entscheidungsverfahren eingesetzt. Dessen Teilschritte sind im Folgenden auf Grundlage von Süße et al. [203] kurz erläutert, wobei ergänzend darauf eingegangen wird, wie sich diese in die Gestaltungsmethodik einfügen.

1. *Problemanalyse und Zielbestimmung:* Zunächst werden der Hintergrund und andere relevante Randbedingungen sowie klare Ziele für die vorzunehmende Datenakquise eruiert bzw. festgelegt.

2. In dieser Phase ist zunächst anhand der Liste zu modellierender Elemente (vgl. SE.28), des ausgewählten Energiemodells (vgl. SE.30), der Übersicht erforderlicher Modelldaten (vgl. SE.34) und der Modellierung der Energieflusselemente (vgl. SE.37) zu konkretisieren, welche Rohdaten notwendig sind und welche Bedingungen an sie gestellt werden. Relevant sind dabei insbesondere Festlegungen zu den aufzunehmenden Größen, deren Auflösung usw.
3. *Erarbeitung von Lösungsvarianten:* Ausgehend von den definierten Randbedingungen sind geeignete Energiedatenakquisemethoden zu identifizieren.
4. Dies kann unter Rückgriff auf die in Tabelle 4.16 angeführten Lösungsvarianten sowie den zugehörigen Eignungsabschätzungen geschehen. Inwieweit dabei nur ungeeignete oder auch eingeschränkt geeignete Methoden ausgeschlossen werden, obliegt dem Anwender. Zwingend sind dabei die Lösungsvarianten auszuschließen, die nicht zu realisieren sind, da Know-How, Messmöglichkeiten o. ä. fehlen. Dabei ist eine Reevaluierung der gezeigten Eignungen durch den Anwender möglich, ebenso wie die Ergänzung weiterer Methoden.
5. *Festlegung von Entscheidungskriterien:* Unter Berücksichtigung der eingangs definierten Ziele sind operationalisierbare Kriterien zu identifizieren, die in ein widerspruchs- und überschneidungsfreies, vollständiges, hierarchisches Zielsystem integriert werden. Süße et al. [203] schlagen dazu die Bildung unabhängiger Zielsysteme für die Bewertung der Inputs bzw. Outputs des Methodeneinsatzes vor.
6. Im Rahmen der Gestaltungsmethodik wird davon abweichend die Verwendung nur eines – in Abbildung 4.9 gezeigten – Zielsystems vorgeschlagen. Dessen **Entscheidungskriterien** orientieren sich wiederum am grundlegenden Zielsystem des Simulationsanwenders. Neben der Aufwandsdimension werden die grundsätzliche Eignung der Methoden zur Datenbeschaffung für ein Modell (z. B. nach Tabelle 4.16) als Maß für dessen erwartete Effizienz und die Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen für das konkrete Projekt als Nutzendimension einbezogen.
7. *Festlegung von Umfeldszenarien:* In dieser Phase werden weitere Umwelteinflüsse erfasst und in Umfeldszenarien abgebildet. Auf diese Weise lassen sich Unsicherheiten in der Bewertung berücksichtigen.
8. Für die Anwendung der entsprechenden Methoden stellen insbesondere die bereits bestehende Verfügbarkeit von Daten und der Zugang zu Messmitteln, Software oder Anlagen relevante **Umwelteinflüsse**

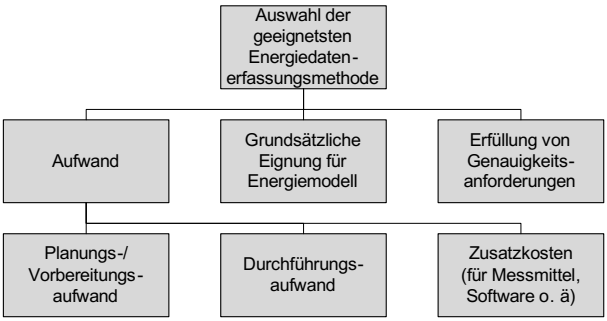


Abbildung 4.9: Zielsystem für die Auswahl von Energiedatenakquisemethode

dar, die prospektiv nicht immer gut abgeschätzt werden können. Für diese kann eine Sensitivitätsanalyse erfolgen oder es können Umfeldszenarien aufgebaut und unabhängig bewertet werden.

9. *Gesamtbeurteilung und Entscheidung:* Abschließend erfolgt eine Bewertung der ausgewählten Energiedatenakquisemethoden mittels des AHP unter Beachtung des entwickelten Zielsystems und ggf. der Umfeldszenarien. Auf Grundlage der erfolgten Bewertung wird entschieden, welche Methode einzusetzen ist.
10. Analog zu den Lösungsmodulen Energiemodell (vgl. Anhang D.4) und Werkzeug/-architektur wurde auch für diesen Gestaltungsaspekt eine Tabellenkalkulation in LibreOffice Calc entwickelt. Diese kann genutzt werden, um die einzelnen Zielkriterien und anschließend die ausgewählten Lösungsvarianten zu priorisieren.

Die **Auswahl der Energiedatenakquisemethode** (SE.39) erfolgt für jedes Energieflusssystem unabhängig, wobei eventuelle Synergieeffekte bei der Datenakquise in die Bewertung einzubeziehen sind. Anschließend werden die relevanten Energiedaten erfasst und die gewonnenen **Rohdaten** (SE.40) für die anschließende Aufbereitung abgelegt. Insbesondere für größere Projekte können dabei Fragestellungen zur notwendigen Speichermenge und zu einzusetzenden Datenstrukturen entstehen, die frühzeitig zu klären sind.

4.3.5 Datenaufbereitung

Ziel von Schritt 10 ist es, die Rohdaten in Eingangsdaten für die Simulation umzuwandeln. Hierzu sind folgende Aktivitäten notwendig:

- Planung und Vorbereitung
- Durchführung
- Verifikation und Validierung

Ausgehend von der Modellformalisierung und ggf. auch von der Implementierung ist zunächst die **Planung der Datenaufbereitung** (SE.41) notwendig. Nach Rabe et al. umfasst dies u. a. die Benennung von Entitätentypen, die Beschreibung von Datenstrukturen und die Festlegung des Aufbereitungsvorgehens für alle Datenentitäten [138, S. 91]. Mit Blick auf die erhobenen Energiedaten ist also zu klären, welches Datenformat aus den Rohdaten zu erzeugen ist und wie dies geschehen muss (vgl. dazu Tabelle 4.17). Notwendige **Vorbereitung** (SE.42), wie etwa die Bereitstellung von geeigneter Software zur Messdatenauswertung, sind ebenfalls planungsbegleitend zu treffen.

Tabelle 4.17: Typische Eingangsdaten und Verarbeitungsansätze für Energiemodelle[43]

Energiemodell	Simulationseingangsdaten	Typische Verarbeitungsansätze
Äquivalente	• Parameter definiert als Äquivalenzmenge je Bezugsgröße (z. B. Energie je kg Schmelze) [108]	• Auslesen aus technischer Dokumentation oder LCI-Datenbanken und ggf. weitere Aggregation [101] • Analytisch ausgehend von bekannten Parametern, z. B. [179, S. 125 ff.]
Betriebszustände mit Durchschnittsleistung	• Liste von Betriebszuständen und zugehörigen Durchschnittsverbräuchen [191]	• Auswertung von Messungen und weiteren (Steuerungs-)Daten zur Identifikation von Betriebszuständen und Verbräuchen [90, S. 92 ff.] • Übernahme von Herstellerangaben bzw. Ableitung von ebendiesen (z. B. als anteilige Nennleistung) [101]
Betriebszustände mit Leistungsverläufen	• Listen von Leistungsbedarf je Betriebszustand als Zeitreihen bzw. als Folge analytischer Funktionen [192]	• Auswertung von Messungen und weiteren Daten zur Identifikation zu differenzierender Betriebszustände und Diskretisierung von Leistungsverläufen [192] • Auswertung von Messungen und weiteren Daten zur Identifikation zu differenzierender Betriebszustände und Entwicklung von Folgen von Leistungsfunktionen [101] • Nutzung von analytischer Berechnung oder numerischer Simulation zur Ermittlung eines diskretisierten Leistungsverlauf ebenso möglich [88, S. 66 ff.]

43 Die gezeigte Übersicht basiert auf der Analyse von Modellierungsansätze in Arbeiten, die im Rahmen der systematischen Literaturanalyse (vgl. Abschnitt 2.3.3) identifiziert wurden, sowie weiteren relevanten Literaturquellen.

Tabelle 4.17:(Fortsetzung)

Energiemodell	Simulationseingangsdaten	Typische Verarbeitungsansätze
Betriebszustände mit mathematischen Ersatzmodellen	• Liste von Betriebszuständen und zugehörigen Funktionen für Leistungsbedarf in Abhängigkeit von Zeit oder anderen Parametern [185]	• Übernahme von Ersatzmodellen, die von Herstellern zur Verfügung gestellt werden [208] • Auswertung von Messungen und weiteren Daten zur Identifikation zu differenzierender Betriebszustände und von Funktionen zu deren Approximation [185] • Auswertungen von Messungen und weiterer Daten zur Identifikation zu differenzierender Betriebszustände und Adaption von bekannten mathematischen Modellen zur Approximation der Leistung (Parametrierung o. ä.)
Kontinuierliches/physikalisches Modell	• Liste von mathematischen Modellen für einzelne Komponenten und Systemparameter aus Messungen oder Datenblättern (bzw. analogen Quellen) [112]	• Übertragung der mathematischen Modelle in eine geeignete Simulation unter Verwendung der Modellierungsmöglichkeiten der eingesetzten Simulationssoftware (z. B. Programmiersprachen) und Adaption anhand von Messungen (vgl. [176] und darin zitierte Werke)
Rein Betriebszustände	• Liste von Schaltzuständen je Maschine/Anlage [109]	• Logische Ableitung von Liste relevanter Betriebszustände für Betrachtung

Die eigentliche **Durchführung der Datenaufbereitung** (SE.43) muss im Weiteren entsprechend der Planung erfolgen. Im Ergebnis stehen Daten in einer Form, die unmittelbar in das implementierte Simulationsmodell eingebunden werden können.

Bevor basierend auf den aufbereiteten Daten experimentiert wird, ist für die Energiedaten (und auch weitere Daten) eine **Verifikation und Validierung** (SE.44) durchzuführen. Hierzu haben sich summarische Betrachtungen (z. B. gemäß der Frage „Gesamtenergieverbrauch für einen Referenzzeitraum stimmt überein?“) [106] und Betrachtungen über den Zeitverlauf hinweg (z. B. gemäß der Frage „Leistungsverlauf in einem Referenzzeitraum stimmt überein?“) [200] als probate Ansätze etabliert. Eine ausführlichere Liste möglicher Methoden zur Verifikation und Validierung stellen Rabe et al. vor [138, S. 93 ff.].

Eine besondere Herausforderung geht von der Abbildung genauer Leistungsverläufe aus, die von einer Vielzahl von Faktoren (Produkt, Steuerungsprogramm der Maschine, Umgebungsbedingungen usw.) beeinflusst werden. Eine Erfassung der möglichen Einflüsse erscheint dringend empfehlenswert, da andernfalls bei Veränderung von (vermeintlich unabhängigen) Simulationsparametern die Validität der Energieflussmodellierung beeinträchtigt wird. Die Dokumentation solcher Aspekte sollte daher in geeigneter Form erfolgen, um eine unintendierte Modellnutzung und daraus resultierende Fehler zu vermeiden.

4.3.6 Implementierung

In Schritt 11 wird das experimentierfähige Simulationsmodell entwickelt, wobei auf das Konzeptmodell, die Ergebnisse der Modellformalisierung und die Datenaufbereitung zurückgegriffen wird. Bevor mit den Implementierungsarbeiten begonnen wird, ist zunächst eine **Prüfung der Realisierbarkeit der vorgenommenen Modellierung** (SE.45) mittels der ausgewählten Simulationssoftware durchzuführen. Nach Wenzel et al. ist dabei insbesondere auf folgende Aspekte zu achten [162, S. 135 f.]:

- Ausreichende *Erweiterbarkeit* der Software gegeben
- *Modellierungsansätze* sind mit gewählter Software umsetzbar
- Etwaige *Kopplung* mehrerer Simulationen untereinander oder mit Optimierungslösung realisierbar

In diesem Zusammenhang ist folglich auch zu prüfen, ob das Konzeptmodell und die Ergebnisse der Formalisierung ausreichend Dokumentation für die Implementierung bieten oder ob weitere Aspekte zu klären sind. Bei Bedarf ist eine Rückkehr zu vorherigen Schritten des Vorgehensmodells notwendig.

Zur Verringerung des Aufwands sind die Modellwelten der ausgewählten Simulationssoftwarelösungen (vordefinierte Bausteine o. ä.) auszunutzen, soweit sich der formale Modellentwurf mit diesen umsetzen lässt. Ist dies nicht möglich, so sollten entwickelte Erweiterungen möglichst generische Ansätze verfolgen und als wiederverwendbare Klassen, Schnittstellen usw. umgesetzt werden. Als weitere qualitätssteigernde Handlungsansätze benennen Wenzel et al. u. a. die Trennung von Daten und Modell sowie die Trennung von physikalischem Modell und Steuerungsregeln [162, S. 136 f.].

Von zentraler Bedeutung ist zudem die Integration von **Messpunkten** (z. B. zur Ermittlung von Energieverbrauchsprofilen) in das Simulationsmodell bzw. die -modelle. Dies muss unter Berücksichtigung des in Schritt 6 definierten Zielsystems geschehen.

Wurde ein Optimierungsansatz zur Experimentplanung ausgewählt bzw. ist eine **Optimierung** als integraler Teil der Simulation notwendig, muss über die eigentliche Simulation hinaus auch die Optimierungslösung realisiert bzw. integriert werden. Typische Problemklassen, die dies erfordern, sind Reihenfolge- oder Zuordnungsprobleme bzw. Parametervariationen [209, S. 45], welche sich ggf. in den Hypothesen zur Effizienzmaßnahme widerspiegeln. Ausgehend von den Kopplungsarten für Optimierung und Simulation (vgl. Abschnitt 2.3.1) werden zumeist drei typische Implementierungsansätze verfolgt, aus denen ein geeigneter Ansatz auszuwählen[44] und umzusetzen ist:

- *Verwendung einer in Simulationssoftware integrierten Optimierungslösung* (z. B. [23, S. 141]): geringer Aufwand, aber oft nur ausgewählte Optimierungsansätze
- *Verwendung von proprietären, eigenständigen Optimierungslösungen* (z. B. [111]): höherer Aufwand auf Grund zu entwickelnder Kopplungsfunktionalitäten, dafür zumeist größerer Umfang möglicher Optimierungsansätze
- *Aufbau einer eigenen Optimierungslösung* (unter Rückgriff auf existierende Optimierungspakete) (z. B. [184]): höherer Aufwand zur Kopplung und Entwicklung der Optimierungslogik, dafür freie Wahl und auch Kombination von Optimierungsansätzen

Das entwickelte Modell ist final zu verifizieren, zu validieren und sollte eine interne Abnahme durchlaufen. Dabei sind gegenüber sonst üblichen Simulationsstudien bzw. über den vorherigen Schritt hinaus keine zusätzlichen Aspekte beim Einsatz von iSvMEF einzubeziehen. Mit Blick auf die zu untersuchenden Hypothesen für die Effizienzmaßnahmen ist insbesondere zu prüfen, ob Systemgrenzen, Detaillierungsgrad, Steuerungsstrategien, Struktur und Komponenten, Messpunkte für Statistiken, Parameter und Lastprofile stimmen sowie die gewünschten Untersuchungen mittels des Modells durchgeführt werden können [162, S. 207]. Identifizierte Mängel sind abzustellen und **Ergebnisse der Modellverifikation und -modellierung sowie Grenzen des Modells** (SE.46), etwa hinsichtlich der Validität bei Veränderung der Parametrierung, in geeigneter Weise zu dokumentieren.

4.3.7 Experimente und Analyse

Nach erfolgter Implementierung, Verifikation und Validierung des Simulationsmodells beginnt in Schritt 12 die eigentliche Nutzung des Simulationsmodells. Diese orientiert sich grundsätzlich am initialen Experimentplan, lebt

44 Für die zugrundeliegende Auswahlentscheidung kann an dieser Stelle keine Hilfestellung gegeben werden, da diese von diversen projektspezifischen Aspekten (z. B. Werkzeug/-architektur, Inhalt der Hypothesen, Mittelverfügbarkeit für neue Software) beeinflusst wird. Eine entscheidungsvorbereitende Aufwand-Nutzen-Abwägung kann beispielsweise mittels AHP erfolgen.

aber vorrangig von der iterativen Planung neuer Experimente (vgl. [19, S. 36]), deren Durchführung und der anschließenden Auswertung sowie Ergebnisanalyse. Übergeordnetes Ziel ist es dabei, stets die richtigen Ausgangsinformationen zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit der ausgeplanten Effizienzmaßnahme zu generieren. Entsprechend ist eine enge Orientierung an den Hypothesen aus Schritt 4 (vgl. PE.18 bzw. Abschnitt 4.2.4) unabdingbar.

Bevor überhaupt Simulationsexperimente durchgeführt werden, sind zunächst **Randbedingungen für die Simulationsläufe** (SE.47) zu bestimmen. Nach Wenzel et al. fallen darunter die Länge der Einschwingphase, das Vorgehen zur Erfassung von Messwerten mit unterschiedlichen Zufallszahlen[45] sowie die Länge und die Anzahl von Simulationsläufen [162, S. 139 ff.]. Auf eine ausführliche Diskussion dieser Aspekte wird hierin mit Verweis auf die einschlägige Literatur (vgl. z. B. [19, S. 35 f.], [78, S. 173 ff.], [162, S. 139 ff.]) verzichtet.

Die Modellparametrierung für die jeweiligen Simulationsexperimente ergibt sich aus der Experimentplanung. Zur Identifikation einer geeigneten Methode, soweit eine Reevaluierung notwendig erscheint, kann an dieser Stelle wiederum auf das in Abschnitt 4.3.1 vorgestellte Lösungsmodul Experimentplanungsmethode zurückgegriffen werden. Mittels der ausgewählten Methode sind praktikable **Experimentpläne** (SE.48) zu entwickeln. Speziell für größere Pläne ist dabei die Abschätzung der notwendigen Zeit empfehlenswert. Dies ist für die iSvMEF besonders relevant, da die Integration der Energiemodelle zumeist einen signifikanten Einfluss auf die Laufzeit eines Simulationslaufs hat (vgl. [96, S. 81 ff.], [128]).

Die **Abschätzung des Zeitaufwands** ist unter Rückgriff auf Formel 4.1 möglich, wobei die Simulationsdauer je Lauf überschlägig experimentell zu ermitteln ist. Die Formel zeigt zugleich, dass die Durchführung parallelisierter Simulationen in Abhängigkeit der eingesetzten Software möglich ist. In der Praxis ist jedoch damit zu rechnen, dass bei Nutzung paralleler Threads aufgrund von Overhead und anderem Taktungsverhalten bei Mehrkernprozessoren die mittlere Simulationsdauer je Lauf mitunter über der Dauer liegt, die bei der Durchführung eines einzigen Simulationslaufs gemessen wird. Dies ist durch den Wirkungsgrad der Parallelisierung $\eta_{\text{Parallelisierung}}$ ausgedrückt. Eine empirisch gestützte Abschätzung dieses Faktors vor der Simulation sehr großer Experimentpläne ist empfehlenswert.

45 Üblich ist die Wiederholung mit unterschiedlichen Zufallszahlenströmen oder die Bildung von Messwertgruppen in einem längeren Simulationslauf.

$$Zeitbedarf = \frac{\left(\begin{array}{c} mittlere\ Simulationsdauer\ je\ Lauf \times \frac{1}{\eta_{\text{Parallelisierung}}} \times \\ Anzahl\ der\ Experimente \times Anzahl\ der\ Läufe\ je\ Experiment \end{array} \right)}{Anzahl\ paralleler\ Simulationen} \tag{4.1}$$

Nach Durchführung der Simulationen erfolgt die **Auswertung der Ergebnisdaten** (SE.49). Soweit dies nicht im Simulationsmodell erfolgen kann bzw. soll, sind die Daten dazu zu exportieren, bei Bedarf nachzubearbeiten (Aggregation o. ä.) und hinsichtlich des Zielsystems für die Simulation aufzubereiten. In welcher Form dies erfolgt, ist letztlich projektspezifisch zu klären. In Arbeiten mit um energetische Betrachtungen erweiterter Materialflusssimulation werden dabei häufig Vergleiche ausgewählter Hypothesen mit einem Referenzszenario genutzt (vgl. z. B. [148], [210]–[212]). Die Art der Datenaufbereitung für energiebezogene Größen unterscheidet sich generell nicht oder nur unwesentlich zu der anderer typischer Kennzahlen in Simulationsstudien. Insofern erfolgt an dieser Stelle mit Verweis auf die Literatur (z. B. [78], [144], [162]) keine weitere Diskussion.

Auf Grundlage einer anschließenden **Analyse der Ergebnisse der Simulationsstudie** ist zu entscheiden, ob ebendiese als Entscheidungsgrundlage bezüglich der Umsetzung der ausgeplanten Effizienzmaßnahme (vgl. PE.17) dienlich sind. Ist dies nicht der Fall, so muss untersucht werden, ob dies auf einen Modellierungs- bzw. Implementierungsfehler, eine ungünstige Parametrierung oder eine ungeeignete Hypothese zurückzuführen ist. Ein Rückschritt auf Schritt 11 bzw. 8, Schritt 9 bzw. 10 oder Schritt 4, respektive, wird in so einem Falle nötig. Genügen die **bewerteten Simulationsergebnisse** (SE.50) den Erwartungen, so ist eine Abschlusspräsentation vorzubereiten und durchzuführen (vgl. [162, S. 149 f.]), um im Zuge dieser die eigentliche Investitionsentscheidung herbeizuführen.

4.3.8 Investitionsentscheidung und Realisierung

Obwohl mit dem vorherigen Schritt die eigentliche Simulationsstudie endet, wird Schritt 13 des Vorgehensmodells hier noch der Durchführung ebendieser zugerechnet. Dies wird in Anlehnung an Beier (vgl. Abschnitt 2.4.8 sowie [97, S. 161 ff.]) mit der Möglichkeit der simulationsgestützten Verifikation und Validierung der Maßnahmenrealisierung begründet. Bevor darauf genauer eingegangen wird, folgt zunächst eine Diskussion der zu treffenden Investitionsentscheidung.

Diese ist auf Grundlage oder im Rahmen der Abschlusspräsentation zur Simulationsstudie und unter Beachtung der Projektziele (vgl. Abschnitt 4.2.1) vorzunehmen. In Anlehnung an den in Abbildung 3.6 gezeigten Problemlösungszyklus erfolgt also die „Auswahl des optimalen Konzeptes und/oder Systems". Dabei handelt es sich um eine vorrangig betriebswirtschaftliche Entscheidung, die unter Beachtung verschiedener Gesichtspunkte mit einer Vielzahl von Methoden vorbereitet werden kann. Genauere Erläuterungen der Methoden finden sich in der Literatur (z. B. [28]) sowie in Abschnitt 2.2. Da aufgrund der modellhaften Abbildung des realen Systems zum Zwecke der Simulation stets eine Unsicherheit bezüglich der Ergebnisse besteht, sei jedoch nochmals explizit auf Methoden zur Entscheidungsvorbereitung unter Unsicherheit verwiesen[46]. Zudem sei die Dissertation von Meynerts erwähnt, in welcher ein „geschlossenes lebenszyklus- und energiebezogenes Bewertungsinstrumentarium für die Fabrikplanung" vorgestellt wird [49], das ebenfalls zu Vorbereitung der zu treffenden **Investitionsentscheidung** eingesetzt werden kann.

In Vorbereitung der Entscheidung ist zu prüfen, inwieweit die Simulationsergebnisse anhand des Zielsystems für die Simulation nochmals aufzubereiten sind, um die **Bewertungskriterien der Planungslösung zusammenzustellen** (SE.51). Notwendige Aggregationen, Umrechnungen, Skalierungen usw. sind entsprechend vorzunehmen (z. B. zur Vergleichsdarstellung des Status quo mit dem erwarteten Ergebnis nach Einführung der Maßnahme oder zur Ermittlung von Amortisationszeiträumen). Überdies oder auch als Eingangsgrößen dazu müssen weitere Bewertungskriterien, die nicht im Rahmen der Simulationsstudie zu ermitteln waren (z. B. Flächenbedarfe, Realisierungsdauer etc.), quantifiziert werden. Wie die gewonnenen Daten und Informationen in der Entscheidungsfindung genutzt werden, ist schlussendlich von der eingesetzten Methode zur Entscheidungsvorbereitung abhängig. Wird im Zuge dessen jedoch festgestellt, dass unzureichend Daten oder Informationen vorliegen, so ist ein Rückschritt im Vorgehensmodell der Gestaltungsmethodik vorzunehmen (für Simulationsergebnisdaten insbesondere zu Schritt 11 oder 12), um diese nachträglich zu generieren.

Wurde die Realisierung der ausgeplanten Effizienzmaßnahme beschlossen, so kann die Simulation auch in dieser Phase eingesetzt werden. Die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 präsentiert dazu eine Auswahl von typischen Anwendungsfeldern [19, S. 7 f.]. Für die Gestaltungsmethodik ist in Erweite-

46 Als Ausgangspunkt für die Auswahl einer geeigneten Methode dieses Typs kann die Dissertation von Schmidt dienen, in welcher eine vergleichende Gegenüberstellung von Konzeptionen zur Vorbereitung von Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit vorgestellt wird [65].

rung dieser die **Verifikation und Validierung der Realisierung** besonders wichtig. Hierbei ist nach Umsetzung der Maßnahme im realen System deren Effekt zu messen und mit dem Ergebnis der Simulation zu vergleichen. Zeigen sich dabei signifikante Abweichungen, so spricht dies für eine mangelhafte Umsetzung oder eine inkorrekte Modellierung der Simulation (vgl. [97, S. 161 ff.]). Unter dieser Maßgabe ist daher zu prüfen, ob und wie die Realisierung nachzubessern oder das Simulationsmodell bzw. dessen Parametrierung zu überarbeiten ist. Auf diese Weise kann einerseits der Effekt der Effizienzmaßnahme maximiert und andererseits das Simulationsmodell für eine Folgenutzung verbessert werden.

Zuletzt erfolgt der formale **Projektabschluss** (SE.52). Dieser umfasst nach VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1 eine Projektbewertung sowie ein geeignetes Wissensmanagement und resultiert in einen Projektabschlussbericht [24, S. 21]. Die Bewertung prüft dabei die Einhaltung der Projektziele, besonders hinsichtlich zeitlicher und monetärer Aspekte [24, S. 21 f.]. Das Wissensmanagement soll wiederum gewonnenes Wissen so aufbereiten, dass es für zukünftige Planungsprojekte nutzbar wird [24, S. 22]. Damit endet das Vorgehensmodell der Gestaltungsmethodik und die **Systemanpassung** wird als realisiert betrachtet.

4.4 Zwischenfazit

Unter Berücksichtigung der eingangs formulierten Forschungsfragen legt Kapitel 2 eine Auseinandersetzung mit dem Stand von Wissenschaft und Technik dar. Besondere Beachtung finden dabei die Betriebswissenschaft und die Fabrikplanung, die Entscheidungstheorie sowie die Digitale Fabrik und die Simulationstechnik. Die Würdigung der Erkenntnisse in Abschnitt 3.1 bestätigt die Relevanz der aufgeworfenen Forschungsfragen und dient zugleich der Konkretisierung selbiger. Daraus leitete sich der in Abschnitt 3.2 vorgestellte Lösungsansatz ab, der im weiteren Verlauf der Arbeit präzisiert wird. Dieser lehnt sich an das allgemeine heuristische Entscheidungsverfahren von Grünig und Kühn an (vgl. Abschnitt 2.2.2). Der Ansatz zielt demnach auf die Konzeptionierung und die Systematisierung eines speziellen heuristischen Entscheidungsverfahren ab. Die Ergebnisse sind im Folgenden bezugnehmend auf die Forschungsfragen zusammengefasst.

Ausgehend von der übergeordneten Anforderung des effizienten Einsatzes von Simulation zeigt Abschnitt 3.2.1 ein grundlegendes **Zielsystem** des Simulationsanwenders. Dieses ist an einer Aufwand-Nutzen-Abschätzung unter Einbezug unterschiedlicher Facetten von Simulationsstudien ausgerichtet. Es

diente in der Konzeptionierung der Gestaltungsmethodik allgemein als Orientierung. Zudem fand es Beachtung bei der Bestimmung von spezifischen Zielsystemen zur Entscheidungsfindung für einzelne Gestaltungsaspekte.

Zur Identifikation geeigneter Ansätze für die Umplanung von Fabriken mit dem Ziel der Steigerung der Energieeffizienz führt Abschnitt 3.2.3 acht **Planungsfälle** ein. Diese leiten sich aus der Bestimmtheit des Fertigungsablaufs, des Produktionssystems und der Infrastruktur- und Versorgungssysteme im Planungsprojekt ab. Das zugrundeliegende Vorgehen adaptiert dabei eine von Förster und Wirth [57] beschriebene Systematik zur flexiblen Produktionssystemplanung.

Jedem Planungsfall sind mögliche **Handlungsansätze** zugeordnet (Abschnitt 3.2.3), wobei auf bekannte Zusammenstellungen aus der Literatur zurückgegriffen wird. Mittels dieser sowie einer Abschätzung der Bestimmtheit des betrachteten Systems wird es so möglich, eine Effizienzmaßnahme zu finden und diese zu konkretisieren.

Die notwendigen Aktivitäten zur Auswahl und Planung einer Systemanpassung (fabrikplanerische Vorarbeiten) sowie zur bewertungsunterstützenden Durchführung der Simulationsstudie sind in ein übergeordnetes Vorgehensmodell (Abschnitt 3.3) integriert. Es setzt alle notwendigen Aktivitäten und Entscheidungen in Kontext miteinander und umfasst 13 Schritte. Den Letztgenannten sind die identifizierten **Gestaltungsaspekte** für die iSvMEF in geeigneter Folge zugeordnet. Die Abschnitte 4.2 und 4.3 detaillieren diese und erläutern das Vorgehen zur Bearbeitung der Schrittfolge. Insbesondere zur Unterstützung von Entscheidungen bezüglich der Gestaltungsaspekte wurden neun Lösungsmodule entwickelt. Sie systematisieren einerseits die identifizierten **Lösungsvarianten**, Entscheidungskriterien sowie Umwelteinflüsse und andererseits das Vorgehen für die letztendliche **Entscheidung zur Auswahl**. Eines dieser Lösungsmodule geht dabei explizit auf die Prüfung der **Simulationswürdigkeit** ein, einer zentralen Entscheidung im Vorgehensmodell.

Bezüglich der in Abschnitt 3.1.2 bestimmten Anforderungen an die Gestaltungsmethodik werden die **Synthese** und der **Methodeneinsatz** an dieser Stelle als erfüllt betrachtet. Unter Rückgriff auf Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse zu Arbeiten, die um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation einsetzten, (vgl. Abschnitt 2.3.3) und bestehende Vorgehensmodelle in diesem Bereich (vgl. Abschnitt 2.4), wurden vorhandene Methoden sowie geeignete Lösungsvarianten identifiziert und in einen durchgängigen Ablauf vom Eintreten des Planungsanlasses bis zur Realisierung integriert.

Um der bereits in Kapitel 1 formulierten Erwartung, dass die Gestaltungsmethodik eine hohe Komplexität aufweist, Rechnung zu tragen, wurden neben Checklisten zur systematischen Bearbeitung der einzelnen Schritte auch Tabellenkalkulationen zur Entscheidungsunterstützung mittels AHP entwickelt. Diese vereinfachen eine händische Anwendung. Zugleich finden sich in den vorangehenden Abschnitten sowie in den Anhängen zur Arbeit vielfältige ergänzende Informationen (z. B. zu möglichen Lösungsvarianten), die sich aufgrund ihrer Fülle nicht unmittelbar in die Checklisten integrieren lassen. Die literaturgestützte Systematisierung in den Ausführungen sowie die darüber hinausgehend dargestellten Ergebnisse ermöglichen jedoch zukünftig eine detailreiche Überführung der Methodik in ein **Expertensystem**. Ein solches kann das entwickelte Vorgehensmodell implementieren – sodass es sich schrittweise bearbeiten lässt –, relevante Informationen an geeigneten Stellen darstellen und notwendige Berechnungen (z. B. zum AHP) integrieren.

Auf Grundlage der Ausführungen und des methodischen Ergebnisses konnten bisher nicht alle Anforderungen eingeschätzt werden. Folglich ist die Gestaltungsmethodik im Weiteren hinsichtlich der Übertragbarkeit, der Rationalität, der Realitätsnähe, der Anwendbarkeit, der Einfachheit und der Flexibilität zu prüfen. Als Ansatz dazu wurde eine exemplarische Erprobung gewählt, die im Folgekapitel genauer dargelegt ist.

5 Exemplarische Erprobung der Gestaltungsmethodik

Das folgende Kapitel fasst die Erprobung der entwickelten Gestaltungsmethodik zusammen. Anhand dieser werden einerseits Erkenntnisse zur Erfüllung weiterer, bislang nicht bewerteter Anforderungen an das Ergebnis der Konzeptionierung präsentiert. Andererseits wird auf das in der Einleitung formulierte Ziel eingegangen, dass unter Anwendung der Methodik zu zeigen ist, wie bei Nutzung der Methodik zusammen mit einer generischen Simulationslösung durchaus unterschiedliche Simulationsstudien im Ergebnis stehen können. Dazu wird zunächst das grundsätzliche methodische Vorgehen vorgestellt. Abschnitt 5.2 erörtert die generische Simulationslösung eniBRIC, welche im Weiteren Anwendung findet. Anhand dreier Fallstudien werden in Abschnitt 5.3 die Erprobung und deren Ergebnisse erläutert. Abschließend erfolgt eine Diskussion der Erkenntnisse.

5.1 Methodisches Vorgehen

Abschnitt 4.4 zeigte auf, dass von den in Abschnitt 3.1.2 erläuterten Anforderungen bisher nur die **Synthese** und der **Methodeneinsatz** als erfüllt identifiziert werden konnten. Die Erprobung dient folglich der Informationsgewinnung zur Bewertung aller weiteren ebenda formulierten Anforderungen, die in nachstehenden Thesen konkretisiert sind:

These 1: **Übertragbarkeit** ist gegeben, wenn die Gestaltungsmethodik für Fallbeispiele in zumindest zwei Branchen angewandt werden kann[47].

These 2: **Rationalität** ist gegeben, wenn jeder relevanten Entscheidung ein Zielsystem zur Bewertung der optimalen Lösung zugrunde liegt, der Anwender zugleich die Möglichkeit hat, dieses nach seinen Präferenzen zu verändern, und die Entscheidungsverfahren auch auf dieses Zielsystem zurückgreifen.

These 3: **Realitätsnähe** ist gegeben, wenn die Elemente der Gestaltungsmethodik die notwendigen energiebezogenen Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien beinhalten und diese so genau abbilden, dass eine korrekte, fundierte Entscheidung getroffen wird bzw. die richtigen Aktivitäten abgeleitet werden.

47 In Abschnitt 3.1.2 wird zur Übertragbarkeit gefordert, dass keine Bezüge zu konkreten Simulationslösung in die Gestaltungsmethodik Einzug finden. Die Erläuterungen in den vorangegangenen Kapiteln sind frei von derartigen Verknüpfungen, aus welchem Grunde dieser Teil der Anforderung als erfüllt betrachtet wird und keinen Einzug in die Formulierung der These findet.

These 4: **Anwendbarkeit** ist gegeben, wenn das entwickelte Vorgehen eine durchgängige Ausführung aller einbezogenen Aktivitäten bzw. Entscheidungen unter möglichst optimalen (d. h. effizienten) Bedingungen ermöglicht.

These 5: **Einfachheit** ist gegeben, wenn sich (Einzel-)Entscheidungen, die mit Lösungsmodulen unterstützt werden, mit geringem Aufwand zur Informationsbeschaffung und Alternativenbewertung fällen lassen.

These 6: **Flexibilität** ist gegeben, wenn die Anwendung der Gestaltungsmethodik abhängig vom Anwendungsfall z. B. zu unterschiedlichen Zielsystemen für die Simulation oder zu unterschiedlichen Energiemodellen führen kann.

Aus diesen Thesen wird ersichtlich, dass die Untersuchung mehrerer unabhängiger Fallstudien in unterschiedlichen Branchen notwendig ist. Zugleich gilt für die Gestaltungsmethodik der Anspruch, dass sie einer **ergebniseffizienten Entscheidungsfindung** bei der Alternativenauswahl für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien dient. Der Vergleich mit früheren Fallstudien erlaubt eine Abwägung dieses Effizienzmaßes, indem das Ergebnis der Fallstudie, dessen gewählte Ausprägungen der Gestaltungsaspekte, und die mittels der Gestaltungsmethodik ausgewählte Ausprägungen verglichen werden. Folgende Auflistung erläutert den Zusammenhang:

- Hat sich die in einer Fallstudie gewählte Ausprägung als zu aufwändig oder zu wenig nutzbringend mit Blick auf das letztliche Ergebnis herausgestellt[48], während die Gestaltungsmethodik zu einer besser geeigneten Auswahl geführt hätte, so ist das Ergebnis der Anwendung der Methodik effizienter.
- Stimmen die mit und ohne Gestaltungsmethodik bestimmten Ausprägungen überein und sind sie mit Blick auf das Ergebnis auch als effizient für die Simulationsstudie zu betrachten, so erlaubt die Methodik gleiche Effizienz.
- Wird mit der Gestaltungsmethodik eine unzweckmäßige Ausprägung bestimmt, so ist sie (unabhängig von der Auswahl in der referenzierten Fallstudie) ineffizient.

48 Eine solche Einschätzung kann im Ergebnis des Wissensmanagements am Ende eines Planungsprojektes (vgl. Abschnitt 4.3.8) stehen. Beispielhaft sei dazu die Arbeit von Peter und Wenzel angeführt, die in einer von zwei Fallstudien zu dem Schluss kommen, dass der Einsatz der integrierten Simulation von Material- und Energieflüssen (iSvMEF) nicht zwingend notwendig gewesen wäre, um zu den letztendlichen Ergebnissen ihrer Simulationsstudie zu gelangen (vgl. [213]).

Da zur Anwendung der entwickelten Methodik sehr detailliertes Wissen zur untersuchten Fallstudie notwendig ist, kann eine Erprobung nicht auf Grundlage einer in der Literatur zu findenden Arbeit (z. B. einer der in Abschnitt 2.3.3 eingeflossenen) erfolgen. Diese sind in Publikationen meist verkürzt dargestellt und die genaue Motivation aller Beteiligten ist nicht hinreichend bekannt. Entsprechend erfolgt eine Erprobung für drei **Fallstudien**, die der Autor der vorliegenden Arbeit selbst durchgeführt, anleitend betreut oder beratend unterstützt hat. Die angeführte Unterscheidung nach dem Grad der Einbindung des Autors soll der Plausibilisierung der Ergebnisse bei der Erprobung dienen. Dazu wird unterstellt, dass bei weniger direkter Einbindung in das ursprüngliche Simulationsprojekt eine objektivere Erprobung der Gestaltungsmethodik erfolgen kann. Zugleich wird auf diesem Wege ein Vergleich von mittels der Lösungsmodule getroffenen Entscheidungen mit den ursprünglich (z. T. durch andere Simulationsanwender) getroffenen ermöglicht.

Kritisch anzumerken ist, dass dieses Vorgehen, unabhängig des Grads der Einbindung des Autors, methodisch nicht einwandfrei ist. Zum einen kann bei diesem Ansatz nicht zweifelsfrei geklärt werden, welchen Einfluss das bestehende Wissen über die ursprünglichen Projekte auf die Erprobung der Gestaltungsmethodik, insbesondere die Entscheidungsfindung mittels der Lösungsmodule, hat. Zum anderen liegen alle relevanten Informationen für das gesamte Projekt bereits vor, sodass nicht hinreichend eruiert werden kann, inwieweit die Informationsbeschaffung durch die Methodik unterstützt wird. Letztlich ist auch festzustellen, dass die Erfahrungen des Autors aus den im Weiteren behandelten Fallstudien in die Entwicklung des Vorgehensmodells und der Lösungsmodule eingeflossen sind. Somit lässt sich bei diesem Vorgehen nur ungenau einschätzen, ob die Gestaltungsmethodik in anderen Anwendungen qualitativ ähnliche Ergebnisse zeigt oder sie nur in den zugrunde liegenden Fallstudien zu derartigen Ergebnissen führt.

Da zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit keine Möglichkeit für die Durchführung eines gänzlich neuen Umplanungsprojekts bestand und Fallstudien aus der Literatur nicht herangezogen werden konnten (s. o.), wurde dennoch die ex-post-Erprobung an drei bekannten Fallstudien durchgeführt. Hiermit kann insbesondere untersucht bzw. gezeigt werden, wie die einzelnen Schritte und Lösungsmodule ineinandergreifen, zu welchen Resultaten sie in unterschiedlichen Anwendungsfällen kommen und welche Form beispielsweise die in den Checklisten dokumentierten Entscheidungen haben können.

Diese Auswahl erlaubt es dahingegen, gemäß der Forderung aus Abschnitt 1.2 zu zeigen, wie die Gestaltungsmethodik zu durchaus unterschiedlich ausgeprägten Simulationsstudien (hinsichtlich bestimmter Gestaltungsaspekte) führt.

Hierzu kann keine Simulationslösung eingesetzt werden, die bereits einzelne Gestaltungsaspekte vorwegnimmt, beispielsweise das eingesetzte Energiemodell. Die generische Simulationslösung eniBRIC, die auch in den drei im Weiteren diskutierten Fallstudien Anwendung fand, ist weitgehend frei von derlei Einschränkungen und kann zur Implementierung der Mehrzahl identifizierter Lösungsvarianten für die einzelnen Gestaltungsaspekte eingesetzt werden. Sie wird im nachfolgenden Abschnitt 5.2 überblicksweise vorgestellt. Anschließend werden drei Fallstudien und die Anwendung der Gestaltungsmethodik auf diese vorgestellt, wobei einerseits obige Thesen und andererseits die der Methodik inhärente Effizienz geprüft werden.

5.2 Kurzvorstellung der generischen Simulationslösung eniBRIC

Die Entwicklung der generischen Simulationslösung eniBRIC für Siemens Tecnomatix Plant Simulation (kurz: Plant Simulation) wurde 2012 initiiert, um zwei zentralen Defiziten entgegenzutreten. Zum einen war es mit der Modellwelt der seinerzeit verfügbaren Version 10 von Plant Simulation nicht möglich, Energieverbräuche zu modellieren, zum anderen gab es für diese Simulationsumgebung keine Lösung, die auch die Abbildung von Energieerzeugern ermöglicht. Die Details zu eniBRICs Umsetzung sind in [128], [214], [215] erläutert, die Erweiterung für volatile erneuerbare Energieerzeuger und Energiespeicher in [201]. Daher wird (mit Verweis auf ebendiese Veröffentlichungen) der grundsätzliche Modellierungsansatz hier lediglich verkürzt und überblicksweise erläutert.

Eine fundamentale Prämisse der Entwicklung von eniBRIC war, dass eine Betrachtung von Angebot und Nachfrage aller Energieflusselemente auf einen gemittelten Leistungsvergleich über eine definierte Zeit reduziert werden kann. Dazu wurde zunächst das in Abbildung 5.1 a) dargestellte Komponentenmodell für konventionelle Erzeuger und Verbraucher entwickelt. Die darin gezeigten Materialflüsse in der Horizontalen stellen eine typische Funktionalität der Modellwelt von Plant Simulation, speziell der Materialflusselemente, dar. Energieerzeuger wiederum können zur Untersuchung von Fabriken zumeist ohne Materialflüsse modelliert werden. Entsprechend waren vorrangig die Funktionalitäten zur Modellierung der Energieflüsse zu realisieren, welche in einem generischen eniBRIC-Grundbaustein (Klasse) implementiert wurden. Dieser kann zusammen mit vorhandenen Plant Simulation Materialflusselementen zur Modellierung von Produktionskomponenten eingesetzt werden, ist aber auch für sich genommen zur Modellierung von Infrastrukturkomponenten nutzbar. Darüber hinaus wurden weitere übergeordnete Bausteine (d. h.

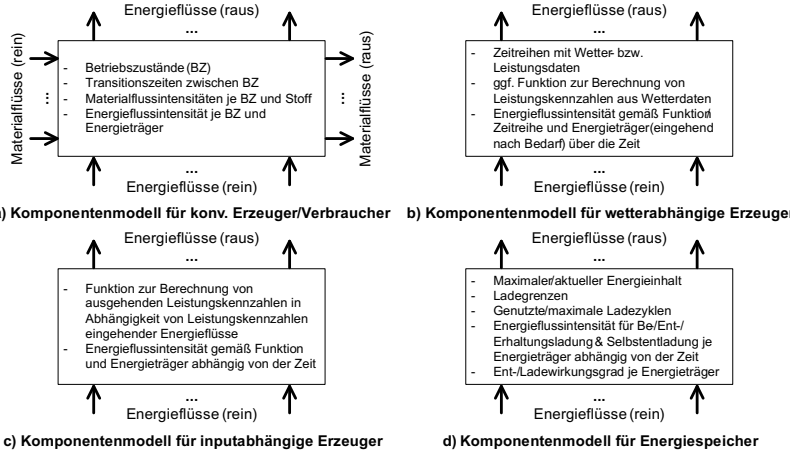


Abbildung 5.1: In eniBRIC implementierte Komponentenmodelle nach [201]

Klassen) zur Konfiguration sowie Auswertung energiebezogener Simulationsdaten entwickelt. Das Zusammenwirken dieser Bausteine ist in Abbildung 5.2 gezeigt.

Dem gezeigten Komponentenmodell folgend, wird jede Instanz von eniBRIC mit einer Reihe von Betriebszuständen und u. a. einem dazugehörigen mittleren Leistungsbedarf parametriert. Der Betriebszustand (BZ) während der Simulation ergibt sich wiederum als Ergebnis von Signalen, die von Instanzen des eniBRIC-Grundbausteins über definierte Schnittstellen entgegengenommen und verarbeitet werden. Diese stammen entweder von separaten Steuerungsinstanzen oder aus Ereignissen im Materialfluss (z. B. Bearbeitungsbeginn/-ende) und umgekehrt ist ein Materialfluss (d. h. Bearbeitung oder Transport) nur dann möglich, wenn der aktuelle Betriebszustand dies auch zulässt. Unter Rückgriff auf die Schnittstelle für separate Steuerungsinstanzen ist es zudem auf verschiedenen Wegen (vgl. Beispiele zu Öfen in [128], [214], [215] bzw. Modellierung von Förderanlagen in [200]) möglich, auch komplexere Verbrauchsprofile bzw. -zusammenhänge abzubilden.

Die Erweiterung für volatile erneuerbare Energiequellen (Abbildung 5.1 b) bzw. c)) baut darauf auf und implementiert eine einfach zu parametrierende Logik zur Modellierung von vordefinierten Angebotsprofilen als neuen Erzeuger-Baustein (Klasse). Aufgrund volatiler Leistungsbedarfe und -bereitstellung ist im Verlauf einer Simulation mit unterschiedlichen Belastungszuständen einzelner Erzeuger zu rechnen, der sich u. a. aus dem Gesamtbedarf

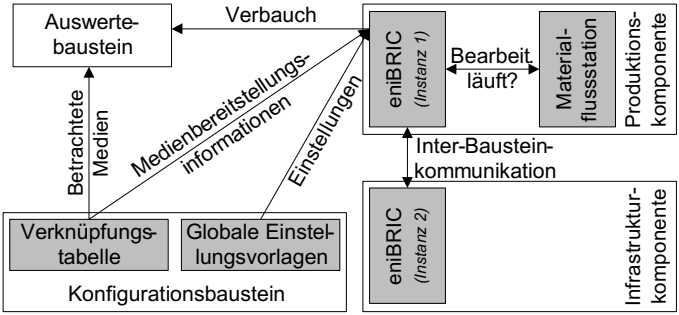


Abbildung 5.2: Zusammenwirken der eniBRIC-Bausteine [214]

und dem individuellen Angebot ableitet. Mit dem Energy Supply Manager wurde daher eine regelbasierte Steuerung zur Lastverteilung in der Simulation implementiert.

Weiterhin wurde im Rahmen dieser Erweiterung auch eine Klasse zur Modellierung von Energiespeichern mit linearem Ent-/Ladeverhalten realisiert (Abbildung 5.1 d)). Zu deren Nutzung ist wiederum der Einsatz des Energy Supply Managers notwendig.

5.3 Ergebnisse der Erprobung

Die vorgestellte Simulationslösung eniBRIC wurde bereits in mehreren Fallstudien eingesetzt. Nachstehend werden zum Zweck der Erprobung der Gestaltungsmethodik gemäß Abschnitt 5.1 drei dieser Fallstudien herangezogen. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Art der betrachteten Produktionssysteme, den betrachteten Branchen und dem Grad der Beteiligung des Autors an deren Bearbeitung. Gemein ist ihnen, dass der Untersuchungsgegenstand ein bestehendes Produktionssystem ist, für das eine Energieeffizienzverbesserung geplant bzw. zumindest ein Potenzial dazu identifiziert werden soll. In allen Fällen werden dauerhafte Veränderungen der Aufbau- oder Ablaufstruktur angestrebt, weshalb sie als Umplanungsprojekte zu betrachten sind.

Da die den Fallstudien zugrundeliegenden Simulationsstudien bereits publiziert wurden (s. u.), erfolgt hier keine ausführliche Darstellung von deren Untersuchungsgegenstand und der mittels Simulation gewonnenen Ergebnisse. Der Betrachtungsfokus liegt vornehmlich auf der Erprobung der Gestaltungsmethodik, insbesondere den Lösungsmodulen, und der Darstellung der dabei getroffenen Entscheidungen. Ausführliche Übersichten zu Ergebnissen der Erprobung finden sich als vervollständigte Checklisten in Anhang E.

5.3.1 Fallstudie 1: Energiesensitive Fertigungssteuerung in einer Karosserieendmontage

Die erste Fallstudie wurde vom Autor selbst bearbeitet und stellt einen Anwendungsfall dar, der über mehrere Phasen hinweg weiterentwickelt wurde[49]. Für die folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die betrachtete Umplanung sich ausschließlich auf den in [184] beschriebenen Fall beschränkt[50]. Zur Erprobung der Gestaltungsmethodik wurden deren einzelne Schritte jeweils unter der Annahme abgearbeitet, dass spätere Ergebnisse bzw. Erkenntnisse noch nicht bekannt sind. Zudem wurde davon ausgegangen, dass das Umplanungsprojekt in einem typischen Automobilbauunternehmen durchgeführt wird. Durch die genaue Kenntnis des Autors über die ursprüngliche Fallstudie war es dabei möglich, abzuschätzen, welche Informationen zum jeweiligen Zeitpunkt in der Anwendung der Methodik vorlagen. Eine Übersicht der getroffenen Entscheidungen und Zwischenergebnisse in Form von bearbeiteten Checklisten findet sich in Anhang E.1.

Ausgangspunkt für die Fallstudie ist die Bestrebung zur Steigerung der Nachhaltigkeit in einem Karosseriebau. Repräsentativ für die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (vgl. Abschnitt 2.1.2) werden dabei die Bewertungskriterien Gewinn (ökonomisch), CO_2-Äquivalent aus zeitbezogenem Energieeinsatz (ökologisch) und Nachtarbeit (sozial) zugrunde gelegt. Als Betrachtungsbereich wurde der Montage- und Finish-Bereich eines Karosseriebaus inklusive der Subsysteme zur Fertigung der Anbauteile ausgewählt. Für diesen wurden die Bestimmtheitsgrade insgesamt als sehr hoch eingeschätzt, sodass letztlich der **Planungsfall** 1 (Fabrik- und Anlagensteuerung) ausgewählt wurde, wobei der Fokus auf den Subsystemen liegen sollte.

Unter Anwendung des Lösungsmoduls 2 konnten Maßnahmenvorschläge für den Handlungsansatz „energiesparende Fahrweise“ mit den abstrahierten Maßnahmen „optimierte Auftragssteuerung“ sowie „optimierte Anlagensteuerung“ entwickelt werden. Die Auswahl zweier abstrahierter Maßnahmen ergab sich aus der Konkretisierung der **Effizienzmaßnahme**: die Einführung einer energieorientierten PPS-Strategie kombiniert mit einer übergeordneten Anlagensteuerung. Deren Ausplanung umfasste insbesondere die Entwicklung eines Anlagensteuerungskonzeptes mit eniMES sowie ein Konzept zur Umset-

49 Folgende Publikationen fassen die verschiedene Untersuchungen zusammen, die ausgehend von dem initial entwickelten Simulationsmodell durchgeführt wurden: [184], [202], [216]–[223].

50 Eine erste Version dieser Fallstudie zum Einsatz der Gestaltungsmethodik wurde bereits in [163] publiziert, basierte jedoch auf einem früheren Konzeptionierungsstand der Methodik.

zung der PPS-Strategien eniKanban [217] bzw. ConEnIP [222]. Daraus wurden zwei Hypothesen zur Wirksamkeit der jeweiligen PPS-Strategie in Kombination mit eniMES abgeleitet.

Die Prüfung der **Simulationswürdigkeit** erfolgt für beide Hypothesen. Da mit eniMES auch die Anlagenschaltung von Infrastrukturelementen erfolgen sollte, konnten die Entscheidungen SW1 und SW3 gemäß der Vorschläge in Tabelle 4.5 jeweils bejaht werden. Somit war die Anwendung der iSvMEF als empfehlenswert anzusehen und es wurde dementsprechend entschieden.

Nach erfolgter Aufgabenspezifikation wurden die Bewertungskriterien der Planungslösung unter Anwendung des Lösungsmoduls 4 (**Zielsystem für die Simulation**) untersetzt. Dabei waren über energiebezogene Größen hinaus auch weitere Kennzahlen einzubeziehen (Nachtarbeitsstunden, Bestände etc.). Das vollständige Zielsystem ist in Tabelle E.2 (Nr. SE.9) gezeigt.

Bei Anwendung des Lösungsmoduls **Experimentplanungsmethode** wurde ersichtlich, dass es sich um ein kombiniertes MADM-MODM-Problem handelte: die zu präferierende PPS-Strategie war auszuwählen und die jeweils optimalen Parameter zu finden. Auf Grundlage früherer Untersuchungen (vgl. [202], [223]) wurde zunächst ConEnIP als Ansatz mit dem größten Potenzial ausgewählt, da er eine Beeinflussung des Systemgesamtverbrauchs über die Zeit (z. B. in der Nacht) erlaubt. Das verbleibende Parametrierungsproblem war derart komplex (ca. 1,6 Mrd. Parameterkombinationen), dass eine Entscheidung für den Einsatz von Optimierung mit multikriterieller Metaheuristik gefällt und ein initialer Experimentplan ausgearbeitet wurde.

Zur Bestimmung der **Systemgrenzen der Energieflusssysteme** wurde das entsprechende Lösungsmodul eingesetzt. Insbesondere die Prüfung des Umsetzungskonzeptes für eniMES machte demzufolge den Einbezug aller bekannten Energieflusssysteme (vgl. SE.19 in Tabelle E.2) notwendig und zumeist waren auch die Erzeuger zu modellieren.

Für die Auswahl des **Energiemodells** wurden zunächst die Lösungsvarianten „Äquivalente“ und „rein Betriebszustände“ ausgeschlossen. Die Ergebnisse des AHP zeigten dabei eine Präferenz für „kontinuierliche/physikalische Modelle“ und „Betriebszustände mit Durchschnittsleistung“ (idealisierte Priorität 1,000 bzw. 0,963). Die finale Auswahl fiel dabei auf letztere Lösungsvariante, da für diese ein geringerer Aufwand abgeschätzt und für sie zugleich eine ähnlich hohe Priorität ermittelt wurde.

Analog dazu wurde das Lösungsmodul **Werkzeug/-architektur** mit einem weiteren AHP angewandt. Die Lösungsvarianten „Ersatzgrößen“ und „Offline-Kopplung“ wurden dabei als unzweckmäßig ausgeschlossen. Die

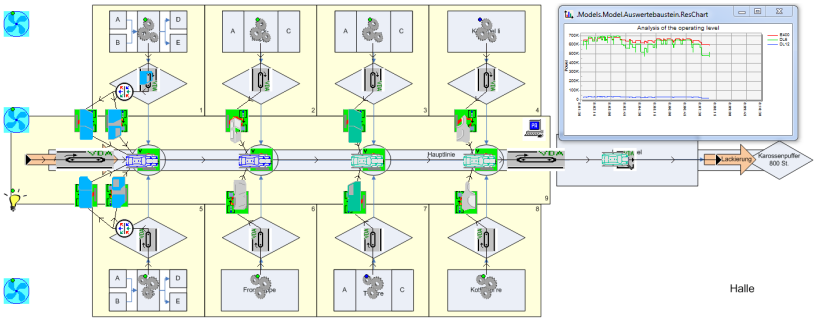


Abbildung 5.3: Entwickeltes Simulationsmodell für Fallstudie 1 [214]

Materialflusssimulation mit integrierter Energiebewertung konnte als ideale Lösungsvariante identifiziert werden und wurde entsprechend unter Einsatz von Plant Simulation festgelegt.

An die Formalisierung anschließend, wurde unter Einsatz des entsprechenden Lösungsmoduls eine geeignete **Energiedatenakquisemethode** bestimmt. Einbezogen wurden für das Energieflusssystem Elektrizität mit 400 V (E400) die Lösungsvarianten „analytisches/physikalisches Modell", „historische Messungen", „Spot-Messungen" sowie „Vergleichen und Schätzen". Deren idealisierte Prioritäten wurden mit 0,577; 0,821; 1,000 und 0,504 ermittelt. Obwohl Spot-Messungen demzufolge zu bevorzugen wären, wurden in der ursprünglichen Simulationsstudie letztendlich aber „historische Messungen" und „Vergleichen und Schätzen" herangezogen, auch wenn deren Eignung weniger gut war. Die Gründe dafür lagen im Projektmanagement des Forschungsprojekts, in dessen Rahmen die Fallstudie entstand.

Das Ergebnis der Datenbeschaffung und -aufbereitung sowie die Implementation führten zur Realisierung des in Abbildung 5.3 gezeigten Simulationsmodells. Dieses wurde vor dem Experimentieren verifiziert und validiert, wobei der Fokus insbesondere auf der realisierten Ablauflogik der einzelnen Systemelemente bzw. der übergeordneten Steuerung lag. Die Simulationsergebnisse sind in [184] dokumentiert und werden an dieser Stelle nicht tiefer gehend diskutiert.

Um abzuschätzen, inwieweit die Gestaltungsmethodik zur **ergebniseffizienten Entscheidungsfindung** beiträgt, sind in Tabelle 5.1 für alle durch Lösungsmodule unterstützte Gestaltungsaspekte die ursprünglich sowie die in der Erprobung ausgewählten Ausprägungen gegenüber gestellt. Ein Vergleich für die Lösungsmodule Planungsfall, Effizienzmaßnahme und Simulationswürdigkeit ist hier nicht zielführend und wird daher nicht durchgeführt, da diese Aspekte bereits vor Beginn der ursprünglichen Simulationsprojekte

entschieden waren. Unterschiede zeigen sich in Tabelle 5.1 lediglich bei der Energiedatenakquisemethode, wobei festzustellen ist, dass der Einsatz von Spot-Messungen größere Genauigkeit in der Modellerstellung bewirkt hätte, deren Vorteilhaftigkeit auch zusätzliche, erwartbare Aufwände aufwiegt. Die Gestaltungsmethodik führt folglich teilweise zu einem gleich effizienten und teilweise zu einem effizienteren Einsatz von Simulation.

Tabelle 5.1: Vergleich der gewählten Ausprägung für Gestaltungsaspekte der Simulationsstudie in Fallstudie 1

Gestaltungsaspekt	**Realisiert in ursprünglichem Simulationsprojekt**	**Auswahl mit Lösungsmodul**
Zielsystem	Kennzahlen in Simulation: Puffergröße, Ausbringung, Bestand, Elektrizität (Energieverbrauch), Anteil erneuerbarer Energie (vgl. SE.9 in Tabelle E.2)	gleich
Experiment-planungsmethode	• Optimierung mittels Kopplung mit multikriterieller (Meta-)Heuristik	gleich
Systemgrenzen	• stromaufwärts: Verteilung • stromabwärts: Verbraucher	gleich
Energiemodell	• Betriebszustände mit Durchschnittsleistung	gleich
Werkzeug/ -architektur	• Materialflusssimulation mit integrierter Energiebewertung	gleich
Energiedaten-akquisemethode	• historische Messungen • Vergleichen und Schätzen	• Spot-Messungen

In dieser Fallstudie konnte positiv geprüft werden, dass **Realitätsnähe** gegeben ist, da einerseits alle für das Planungsprojekt und die Simulationsstudie relevanten Aspekte bei Einsatz der Gestaltungsmethodik berücksichtigt sind und auch geeignete Unterstützung für notwendige Entscheidungen gegeben wird. Es hat sich zudem gezeigt, dass die Anforderung der **Rationalität** aufgrund des durchgängigen Einbezugs der Anwenderpräferenzen erfüllt ist. Letztlich konnten auch die **Anwendbarkeit** und die **Einfachheit** unter Beachtung der in Abschnitt 5.1 formulierten Thesen positiv geprüft werden.

5.3.2 Fallstudie 2: Energieangebotsorientierte Produktionsplanung und -steuerung in einer Werkstattfertigung

Die Bearbeitung der Simulationsstudie, die der zweiten Fallstudie zugrunde liegt, wurde, im Gegensatz zu der im vorherigen Abschnitt behandelten, lediglich durch den Autor angeleitet. Alle Entscheidungen wurden durch den verantwortlichen Bearbeiter vorbereitet und nach Konsultation der Beteiligten getroffen. Das Ergebnis der Modellentwicklung wurde in [224] publiziert. Als Studienobjekt diente dabei ein an die E³-Forschungsfabrik des Fraunhofer IWU [225] angelehntes Produktionssystem, welches einem mittelständigen Auftragsfertiger für rotationssymmetrische Getriebeteile nachempfunden wurde. In diesem war vorrangig die Resource Networks Methodik (speziell die Steuerung von Resource Networks) [226]–[229] zu untersuchen. Analog zur ersten Fallstudie galt für die Erprobung der Gestaltungsmethodik auch hier die Annahme, dass erst später gewonnene Ergebnisse bzw. Erkenntnisse als unbekannt betrachtet wurden. Die vervollständigten Checklisten finden sich in Anhang E.2, wobei im Folgenden insbesondere auf die Gestaltungsaspekte der Simulationsstudie eingegangen wird, für die Lösungsmodule entwickelt wurden.

Für die Fallstudie 2 wurde zunächst folgendes Projektziel definiert: Entwicklung von Möglichkeiten zur energieangebotsorientierten Flexibilisierung des Energiebedarfs. Damit sollten Fremdbezugsanteil für Energie und Energiekosten ohne signifikante Beeinflussung von Liefertreue bzw. Durchlaufzeiten gesenkt werden. Als Betrachtungsbereich wurde dafür der Bereich der Getriebekomponentenfertigung definiert. Nach Abschätzung der Bestimmtheitsgrade konnte dafür der **Planungsfall** 2 (Produktionsplanung) als relevant identifiziert werden.

Die Anwendung des Lösungsmoduls **Effizienzmaßnahme** führte letztlich zur Auswahl des Handlungsansatzes „energiesparende Fahrweisen“ mit der abstrahierten Effizienzmaßnahme „Optimierte Auftragssteuerung“. Als konkrete Maßnahme wurde dabei die Umsetzung der Resource Networks Methodik zur Anpassung der gesamten PPS-Logik im System mit dem Ziel der Flexibilisierung über Schichtzeitanpassungen sowie die Umsetzung einer angebotsabhängig parametrierten ConEnIP-Steuerung definiert. Die daraus abgeleitete Hypothese postuliert, dass sich durch diese Systemanpassung der Fremdbezugsanteil verringern lässt, ohne die logistischen Kennzahlen negativ zu beeinflussen.

Da die festgelegten Anpassungen für die PPS-Logik grundsätzlich einer dynamischen Untersuchung bedürfen, war **Simulationswürdigkeit** auch ohne Betrachtung von Energie als gegeben zu betrachten. Die Energieangebotsorientierung der Planungslösung erforderte darüber hinaus die Erfassung des Energiebedarfs über die Zeit, sodass die iSvMEF als Untersuchungsansatz ausgewählt wurde.

Folglich wurde eine Aufgabenspezifikation als Grundlage für die Modellierung und Simulation erstellt. Ein **Zielsystem für die Simulationsstudie** wurde mittels des entsprechenden Lösungsmoduls entwickelt, wobei aus der Hypothese die Aufgabenkategorien Untersuchung von Verbrauchsprofilen sowie Kostenermittlung abgeleitet wurden. Daraus konnten die Kennzahlengruppen Energieverbrauch pro Zeiteinheit, Zusammensetzung von Energieträgern sowie Energiekosten pro Zeit abgeleitet und (ergänzt um nicht energiebezogene Aspekte) in geeignete Kennzahlendefinitionen überführt werden.

In Vorbereitung der Erstellung eines initialen Experimentplans wurde zudem eine **Experimentplanungsmethode** ausgewählt. Da hier insbesondere der Vergleich des Status Quo mit der überarbeiteten PPS-Logik (also komplexe Handlungsalternativen) im Vordergrund stand, entfiel die Wahl auf die Szenarioanalyse. Weitere Szenarien sollten dabei durch Wahl unterschiedlicher Lastgrenzen für ConEnIP bzw. von Schichtzeiten zur explorativen Untersuchung des Potenzials der Resource Networks Methodik abgeleitet werden.

Bei der Systemanalyse wurde festgestellt, dass lediglich elektrische Energie einzubeziehen waren, da die betrachteten Maschinen bzw. Arbeitsplätze fast ausschließlich diese nutzen. Im Weiteren konnte mittels des Lösungsmoduls **Systemgrenzen der Energieflusssysteme** bestimmt werden, dass neben den Verbrauchern lediglich die Verteilungsebene zum Zwecke der Datenaggregation (für den Abgleich von Energieangebot und -bedarf) einzubeziehen war.

Die Auswahl eines geeigneten **Energiemodells** erfolgte wiederum mittels des AHP, wobei neben den unterschiedlichen Ansätzen zur Nutzung von Betriebszuständen nur noch kontinuierliche/physikalische Module als Lösungsvarianten einbezogen wurden. Als ideale Lösung wurde dabei die Verwendung von Durchschnittsleistung je Betriebszustand identifiziert, was insbesondere auf die geringen Genauigkeitsanforderungen in der Konzeptplanung für einen typischen PPS-Horizont (> 1 Minute) zurückzuführen ist. Diese relativierte die Vorteile der weiteren Lösungsvarianten bezüglich ihrer Realitätstreue.

Mittels des Lösungsmoduls **Werkzeug/-architektur** wurde weiterhin bestimmt, welcher Ansatz zum Aufbau der Simulationsumgebung anzuwenden war. Die Wahl fiel dabei nach vorherigem Ausschluss der ungeeigneten

Lösungsvarianten „Auswertung von Ersatzgrößen“ und „nachgelagerte Auswertung“ auf die „Materialflusssimulation mit integrierter Energiebewertung“. Diese wurde (nicht zuletzt aufgrund der vorhandenen Simulationslösung eniBRIC und fehlender alternativer Simulationssysteme) mit besonderem Blick auf einen geringeren Aufwand im Vergleich zu weiteren Alternativen priorisiert.

Der Schritt Modellformalisierung erfolgte gemäß den Ausführungen der Gestaltungsmethodik, bevor das Lösungsmodul **Energiedatenakquisemethode** Anwendung fand. Dabei wurden die Lösungsvarianten „Historische Messungen“, „Spot-Messungen“, „Dauerhafte Messungen“ sowie „Vergleichen und Schätzen“ einbezogen. Dem durchgeführten AHP zufolge wäre die Realisierung dauerhafter Messungen zu priorisieren gewesen (idealisierte Prioritäten: 0,647; 0,871; 1,000; 0,721), da mit diesen eine größere Genauigkeit zu erreichen gewesen wäre und zugleich ein Großteil der notwendigen Messstellen in der E³-Forschungsfabrik bereits existiert (vgl. [224]). Für das zunächst aufgebaute Modell konnte dies organisatorisch nicht realisiert werden und es wurde auf historische Messdaten sowie Vergleichen und Schätzen zurückgegriffen. Am Fraunhofer IWU wird jedoch an der Integration der existierenden Datenpunkte gearbeitet, u. a. mit dem Ziel, sie als dauerhafte Datenlieferanten für die Simulation nutzen zu können.

Das aus der Datenbeschaffung und -aufbereitung sowie der Implementation mit eniBRIC in Plant Simulation resultierende Simulationsmodell ist in Abbildung 5.4 gezeigt. Die Korrektheit dieses Modells wurde insbesondere mit Blick auf die Ablauflogik erfolgreich geprüft. Auf eine Diskussion der experimentell ermittelten Simulationsergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet, da ihre Publikation zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit in Vorbereitung ist.

Tabelle 5.2 zeigt (analog zu Fallstudie 1) einen Vergleich der ursprünglich realisierten und der mittels der Lösungsmodule identifizierten Ausprägungen. Wie bereits in der vorherigen Fallstudie gibt es Unterschiede bei der Energiedatenakquisemethode, wobei abermals unter Anwendung des entsprechenden Lösungsmoduls eine effizientere Lösung ausgewählt worden wäre. Die Dominanz hinsichtlich der idealisierten Priorität der bestmöglichen Lösung hätte im ursprünglichen Simulationsprojekt durchaus den Entscheidungsprozess beeinflussen und die schnellere Umsetzung dauerhafter Messungen begünstigen können. Unabhängig dieser hypothetischen Diskussion zeigt sich, dass die Gestaltungsmethodik wiederum zumindest zu einer gleich **ergebniseffizienten Entscheidungsfindung** zur anwendungsspezifischen Ausprägung der Simulationsstudie führt.

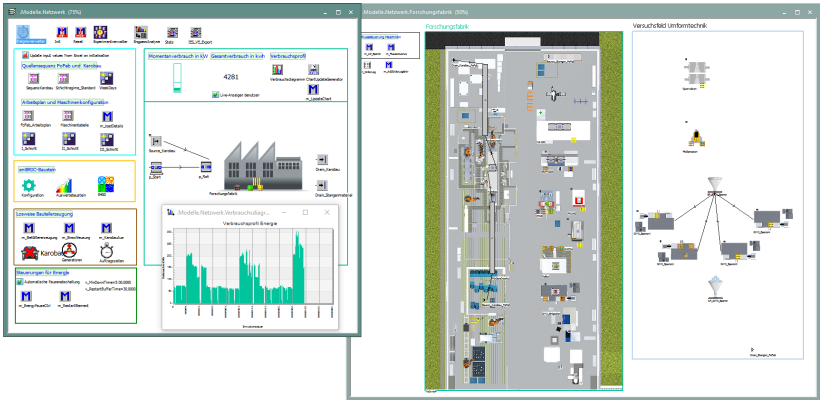


Abbildung 5.4: Entwickeltes Simulationsmodell für Fallstudie 2 [224]

Auf Grundlage der hier diskutierten zweiten Fallstudie kann die **Übertragbarkeit** der Gestaltungsmethodik als gegeben betrachtet werden. Dies folgt der in Abschnitt 5.1 angeführten These 1, nach der die Anwendbarkeit in zumindest einer zweiten Branche gegeben sein sollte. Analog zur vorherigen Fallstudie konnten auch hier **Rationalität**, **Realitätsnähe**, **Anwendbarkeit** und **Einfachheit** positiv geprüft werden. Die Anforderung zur **Flexibilität** kann zumindest teilweise als erfüllt betrachtet werden, da das hier genutzte Zielsystem für die Simulation neu und anwendungsspezifisch entwickelt wurde.

Tabelle 5.2: Vergleich der gewählten Ausprägung für Gestaltungsaspekte der Simulationsstudie in Fallstudie 2

Gestaltungsaspekt	**Realisiert in ursprünglichem Simulationsprojekt**	**Auswahl mit Lösungsmodul**
Zielsystem	• Energiebedarf von Netzbetreiber reduzieren • Energiekosten über Zeit reduzieren • Durchlaufzeiten je Produkttyp konstant halten • Liefertreue je Produkttyp konstant halten	gleich
Experiment-planungsmethode	• Szenarioanalyse	gleich
Systemgrenzen	• stromaufwärts: Verteilung • stromabwärts: Verbraucher	gleich
Energiemodell	• Betriebszustände mit Durchschnittsleistung	gleich

Tabelle 5.2: (Fortsetzung)

Gestaltungsaspekt	Realisiert in ursprünglichem Simulationsprojekt	Auswahl mit Lösungsmodul
Werkzeug/ -architektur	• Materialflusssimulation mit integrierter Energiebewertung	gleich
Energiedaten-akquisemethode	• historische Messungen • Vergleichen und Schätzen	• Dauerhafte Messungen

5.3.3 Fallstudie 3: Flexibilitätsanalyse in einem Tagebaubetrieb

Als dritte Fallstudie wird eine Simulationsstudie herangezogen, bei deren Bearbeitung der Autor nur beratend unterstützte. Alle ursprünglich getroffenen Entscheidungen wurden somit nur durch die verantwortlichen Bearbeiter vorbereitet und getroffen. Die Erprobung der Gestaltungsmethodik an diesem Beispiel erlaubte folglich eine von der ursprünglichen Bearbeitung noch unabhängigere Perspektive. Das Studienobjekt war in diesem Fall ein Braunkohletagebau, für den energiebezogene Flexibilitätspotenziale zu identifizieren waren, um somit unter Beachtung des Zusammenspiels aus Energiemarkt, Braunkohlekraftwerk und Tagebau einen ökonomischeren Betrieb zu realisieren. Publikationen zu der Simulationsstudie gehen detailliert auf die Hintergründe, Rahmenbedingungen und Ergebnisse ein (vgl. [115], [200], [230]–[233]), weshalb an dieser Stelle wiederum vorrangig auf die Ergebnisse der Erprobung der Gestaltungsmethodik, insbesondere der Lösungsmodule, eingegangen wird. Die vervollständigten Checklisten dazu finden sich in Anhang E.3.

Dem o. g. Projektziel gemäß dienten die Versorgungssicherheit des Kraftwerks sowie der Gewinn des Gesamtsystems als Bewertungskriterien in der Fallstudie. Der Energieeffizienzfokus lag somit gleichsam auf der Reduktion von Energiekosten und der Flexibilisierung im Verbrauch. Als Betrachtungsbereich wurde explizit der Tagebau Welzow-Süd ausgewählt. Eine Einschätzung der Bestimmtheitsgrade für diesen zeigte, dass das Materialflusssystem als quasi unveränderlich anzunehmen war und auch im Fertigungsablauf sowie in den Infrastruktur- und Versorgungssystemen nur geringe Änderungsmöglichkeiten bestanden. Folglich handelte es sich um **Planungsfall** 1 (Fabrik- und Anlagensteuerung).

In Abstimmung mit dem Tagebaubetreiber wurde früh deutlich, dass eine Optimierung der Anlagensteuerung und die Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten kaum mehr möglich waren, da etwaige Potenziale schon weitgehend ausgeschöpft wurden. Vorschläge für die **Effizienzmaßnahmen** bezogen sich daher vorwiegend auf eine optimierte Auftragssteuerung, speziell die Übertragung von Ansätzen aus dem Automobilbau auf den Tagebau. Die Untersuchung diente der Identifikation dazu bestehender Potenziale, weshalb zunächst keine Ausplanung der Effizienzmaßnahme erfolgte. Als Hypothese wurde daher die Grundannahme genutzt, die ursprünglich zur Initiation des Projekts führte. Nach dieser sollte unter Nutzung weiterer Informationen (Energiepreise, Bedarfe usw.) ein ökonomischerer Betrieb des verbundenen Tagebau-Braunkohlekraftwerk-Systems möglich sein.

Aufgrund der ungenauen Datenlage innerhalb des Systems (z. B. zu welcher Zeit sich welche Materialmenge in welchem Teil des Systems befindet) bestand auch ohne Betrachtung von Energie **Simulationswürdigkeit**. Da die Flexibilisierung auch unter dem Eindruck des zunehmend volatilen Energieangebots untersucht werden sollte, war die Erfassung energetischer Größen über die Zeit hinweg notwendig. Dem folgend wurde unter Nutzung des entsprechenden Lösungsmoduls die iSvMEF als geeignete Untersuchungsmethode ausgewählt.

Nach Erstellung der Aufgabenspezifikation für die Simulationsstudie erfolgte eine Überführung der Bewertungskriterien für das Projekt in ein **Zielsystem für die Simulation**, wobei das entsprechende Lösungsmodul zur Anwendung kam. Mittels Simulation waren demzufolge vor allem eine Prognose von Verbrauchsprofilen sowie eine Bewertung der ökonomischen Effizienz vorzunehmen. Hierzu wurden Kennzahlen zum Energieverbrauch pro Produkt (Fördermengeneinheit), Energieverbrauch pro Zeiteinheit pro Anlage/System, Zusammensetzung der Energieträger und zu den Energiekosten je Produkt spezifiziert.

Aufgrund des explorativen Charakters des Umplanungsprojekts waren insbesondere komplexe Handlungsalternativen zu vergleichen. Dem folgend wurde die Szenarioanalyse als **Experimentplanungsmethode** ausgewählt. Neben dem Status Quo sollte dabei der Einfluss veränderlicher Energiepreise, Bedarfe sowie Betriebsmittelverfügbarkeiten untersucht werden.

Ausgehend von den Systemgrenzen zur Abbildung des Materialflusssystems konnte elektrische Energie als einzig relevantes Energieflusssystem identifiziert werden. Da der Energiebedarf der Systemelemente jedoch stark vom abzutragenden (Bagger) bzw. transportierten Material (Förderanlagen/Brücke) abhängig ist, war eine Prognose des Verbrauchs auf Verbraucherebene nicht

mittels einer überschaubaren Menge von Lastprofilen realisierbar. Folglich wurden stromabwärts „Teile der Verbraucher“ (insbesondere Bandabschnitte) als **Systemgrenze des Energieflusssystems** definiert. Eine Abbildung von Erzeugern oder Verteilungsebene konnte hingegen als unzweckmäßig identifiziert werden und es wurde die Systemgrenze flussaufwärts auf die Verbraucher festgelegt.

Die Auswahl des **Energiemodells** wurde unter der Maßgabe durchgeführt, dass Betriebszustände zu nutzen waren, weil die Systemelemente aufgrund ihrer Komplexität nicht zweckmäßig mit kontinuierlichen/physikalischen Modellen zu simulieren waren. Da (im Gegensatz zu Maschinen in der typischen diskreten Produktion) eine große Abhängigkeit zwischen dem Belastungszustand und dem Energieverbrauch der Systemelemente bestand, versprach die Verwendung von Betriebszuständen mit mathematischen Ersatzmodellen die größte Detaillierungsfähigkeit. Folglich wurde dieses Energiemodell im AHP (vgl. Anhang D.4, Abbildung D.1 bis Abbildung D.3) als ideale Lösung identifiziert. Dessen idealisierte Priorität wurde dabei nur geringfügig größer bewertet als die der Lösungsvariante durchschnittliche Leistungsbedarfe, welche zugleich weniger aufwändiger ist.

Unter Anwendung des Lösungsmoduls **Werkzeug/-architektur** konnte wiederum die integrierte Energiebewertung als geeignetster Ansatz identifiziert werden. Hauptgrund dafür war, dass die ebenfalls einbezogenen Lösungsvarianten zur Offline- bzw. Online-Kopplung sowie der Einsatz eines Werkzeugs mit mehreren Simulationsmethoden der Anschaffung neuer Software bedurft hätte. Da mit Plant Simulation und der Simulationslösung eniBRIC bereits ein geeignetes Werkzeug verfügbar war, zeigte dieses im AHP die höchste idealisierte Priorität.

Der letztendlich verfolgte Modellierungsansatz ist in Tabelle E.6 unter SE.33 kurz ausgeführt. Eine Modellformalisierung wurde ebenfalls in geeigneter Weise durchgeführt. Zur Auswahl einer **Energiedatenakquisemethode** wurden ausgehend vom entsprechenden Lösungsmodul (insbesondere Tabelle 4.16) und der Anforderung im Projekt, dass keine neuen zusätzlichen Messungen durchführbar waren, die Auswahl auf analytische/physikalische Modelle, numerische Simulation, historische Messungen sowie Vergleichen und Schätzen eingeschränkt. Unter Anwendung des AHP wurde aus diesen letztlich die Energiedatenakquise unter Rückgriff auf historische Messungen ausgewählt. Dies bestätigte zugleich die Vorauswahl zur Bestimmung des einzusetzenden Energiemodells, denn auch die einmalige Nutzung analy-

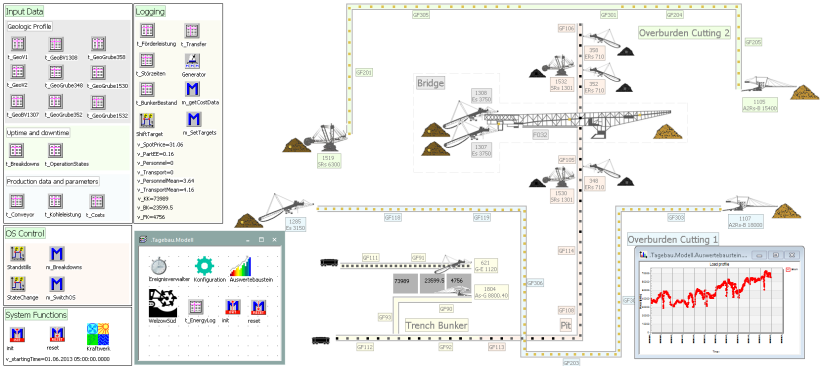


Abbildung 5.5: Entwickeltes Simulationsmodell für Fallstudie 3 [200]

tischer/kontinuierlicher Modelle bzw. der Aufbau einer numerischen Simulation zum Zwecke der Datenakquise wiesen eine deutlich geringere idealisierte Priorität auf (≤ 75 % der idealen Lösungsvariante).

Das letztlich implementierte Modell, in das die aufbereiteten Daten integriert wurden, ist in Abbildung 5.5 gezeigt. Die durchgeführten Verifikations- und Validierungsprüfungen zeigten dabei eine große Genauigkeit des Modells. Ergebnisse der Simulationsexperimente sind u. a. in [200] dokumentiert und werden an dieser Stelle nicht weiter dargestellt.

In Tabelle 5.3 werden die ursprünglich gewählten Ausprägungen wiederum denen gegenüber gestellt, die in der Erprobung der Gestaltungsmethodik im Ergebnis standen. Unterschiede können dabei nicht festgestellt werden. Folglich führt die Methodik zu einer gleich **ergebniseffizienten Entscheidungsfindung** für die Gestaltung der Simulationsstudie. Zugleich zeigt sich, dass für die Gestaltungsaspekte Systemgrenzen und Energiemodell jeweils Ausprägungen gewählt wurden, die in den vorherigen Fallstudien nicht priorisiert wurden. Dies belegt, dass die Gestaltungsmethodik zu durchaus unterschiedlich ausgeprägten Simulationsstudien führt. Obwohl die unterschiedlichen Ausprägungen großen Einfluss auf die Implementierung und die Funktionsweise des Simulationsmodells haben, konnten sie mit der generischen Simulationslösung eniBRIC umgesetzt werden.

Tabelle 5.3: Vergleich der gewählten Ausprägung für Gestaltungsaspekte der Simulationsstudie in Fallstudie 3

Gestaltungsaspekt	Realisiert in ursprünglichem Simulationsprojekt	Auswahl mit Lösungsmodul
Zielsystem	• Gesamtenergiebedarf je Fördermengeneinheit • Energiebedarf des Tagebau-Systems • Primärenergieanteil des Tagebau-Systems • Energiekosten • Abweichung von Baunkohlebedarf und -förderung • Durchlaufzeit je Fördermengeneinheit • Personal- und Transportkosten	gleich
Experimentplanungsmethode	• Szenarioanalyse	gleich
Systemgrenzen	• stromaufwärts: Verbraucher • stromabwärts: Aktor / Teil von Verbraucher	gleich
Energiemodell	• Betriebszustände mit mathematischen Ersatzmodellen	gleich
Werkzeug/ -architektur	• Materialflusssimulation mit integrierter Energiebewertung	gleich
Energiedatenakquisemethode	• historische Messungen	gleich

Die zuvor bereits positiv geprüften Anforderungen der **Übertragbarkeit**, **Rationalität**, **Realitätsnähe**, **Anwendbarkeit** und **Einfachheit** konnten auch in dieser Fallstudie erfolgreich geprüft werden. Mit Blick auf die **Flexibilität** ist zudem festzustellen, dass in diesem Beispiel gleichwohl ein anderes Zielsystem für die Simulation, andere Systemgrenzen sowie ein anderes Energiemodell bestimmt wurden. Dem folgend wird These 6 ebenfalls als verifiziert betrachtet.

5.4 Diskussion

Die vorangehend beschriebenen Fallstudien dienten der Erprobung der Gestaltungsmethodik und der Prüfung der in Abschnitt 5.1 angeführten Thesen. Im Folgenden wird die Erfüllung ebendieser Thesen und damit auch die Konformität der Methodik entsprechend der in Abschnitt 3.1.2 formulierten Anforderungen geprüft.

Mit Blick auf die **Übertragbarkeit** ist festzustellen, dass sich die drei durchgeführten Fallstudien auf Studienobjekte aus drei unterschiedliche Branchen beziehen: Automobilbau (speziell Karosseriebau), Metallbearbeitung und Bergbau. Die dort dominierenden Betriebsmittel (und damit deren Charakteristika) unterscheiden sich in signifikanter Weise. Dennoch konnte die Gestaltungsmethodik in alle Fällen eingesetzt werden. Angemerkt sei, dass die durchgeführte Erprobung keinen Rückschluss darauf gibt, ob die entwickelte Methodik universell übertragbar ist. Die gewonnenen Erkenntnisse deuten in diese Richtung, beruhen jedoch auf einer kleinen Stichprobe. Folglich ist die Erprobung in weiteren Branchen bzw. mit anderen Simulationslösungen notwendig, um besser fundierte Aussagen zur Universalität treffen zu können. Trotz dieser Einschränkungen wird These 1 insgesamt als erfüllt betrachtet.

Um die **Rationalität** der Gestaltungsmethodik und insbesondere der Lösungsmodule zu prüfen, ist zu verifizieren, dass stets ein Zielsystem als Entscheidungsgrundlage bestimmt ist und sich entsprechend der Anwenderpräferenzen anpassen lässt. Bereits die Steckbriefvorlage zur Zusammenfassung der Lösungsmodule führt dabei Entscheidungskriterien an, die zur Beachtung bei der Bestimmung der Ausprägungen für die jeweiligen Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien vorgeschlagen werden. Mit Hinweis auf deren undogmatische Natur steht es dem Anwender stets frei, sein Zielsystem beliebig anzupassen. Insbesondere für jene Lösungsmodule, für die der AHP zur Anwendung kommt, besteht auch die formalisierte Möglichkeit eine Gewichtung anhand der Anwenderpräferenzen vorzunehmen. Davon wurde in den Fallstudien anwendungsspezifisch Gebrauch gemacht, was letztlich auch zu unterschiedlichen Ergebnissen führte. Somit wird auch These 2 als erfüllt betrachtet.

Die Prüfung der **Realitätsnähe** erfolgte über den Vergleich der mittels der Gestaltungsmethodik bearbeiteten Fallstudien mit den ursprünglich durchgeführten Simulationsstudien. In der Erprobung zeigte sich, dass die Lösungsmodule die zentralen energiebezogenen Gestaltungsaspekte der Simulationsstudie in einer Weise abbilden, die eine stets effektive und effiziente Entscheidung unterstützt. Ausgehend von den jeweils benannten Lösungsvarianten und unter Rückgriff auf angeführte Publikationen war es möglich, grundsätzliche Handlungsansätze auszuwählen und durch Beispiele gestützt für den jeweiligen Anwendungsfall zu adaptieren. Daher wird auch These 3 als erfüllt betrachtet.

Bezüglich der **Anwendbarkeit** zeigte sich, dass insbesondere die Schritte in der Phase „fabrikplanerischen Vorarbeiten“ zu einer besser strukturierten Ableitung von Energieeffizienzmaßnahmen führen. Die Checkliste und die

Ausführungen zu den Arbeitsschritten sowie Lösungsmodulen tragen ebenso dazu bei. Dabei konnten in der Erprobung – auch unter Rückgriff auf die Kenntnisse über die den Fallstudien zugrundeliegenden Simulationsprojekte – keine Lücken oder Brüche im Vorgehen identifiziert werden. Insbesondere die Checklisten waren sogar einer verbesserten Dokumentation von Entscheidungen und Zwischenergebnissen dienlich. Analog dazu konnte der Einsatz des AHP in einzelnen Lösungsmodulen die Entscheidungsfindung für die entsprechenden Gestaltungsaspekte transparenter machen und insgesamt verbessern. Dem folgend wird auch These 4 als erfüllt betrachtet.

Bei ungenauer bzw. unvollständiger Kenntnis des Vorgehensmodells, der darin zu bearbeitenden Teilaufgaben und der verschiedenen Lösungsmodule ist ein nicht geringer Aufwand zum Erlernen ebendieser erforderlich. Die genaue Kenntnis der Methodik ist zugleich eine Voraussetzung für ihren effektiven Einsatz. Wie in den Abschnitten 1.2 sowie 3.1.2 angemerkt, ist es mit einem **Expertensystem** möglich, den Aufwand zum Erlernen signifikant zu verringern und die der Gestaltungsmethodik inhärente Komplexität gut handhabbar zu machen. Mit einem solchen lassen sich die vielfältigen Teilaufgaben entsprechend dem Vorgehensmodell in eine Folge einfacher grafischer Oberflächen überführen, die durch den Anwender sequentiell bearbeitet werden. Notwendige Informationen zu Herangehensweisen (etwa in der Modellierung) und Lösungsvarianten, wie sie in Kapitel 4 bzw. Anhang D bzw. in ebenda angeführter Literatur zu finden sind, können bedarfsmäßig (auch optional) in die einzelnen Oberflächen integriert werden. Die Entwicklung eines solchen Systems liegt nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit, jedoch stellt die literaturgestützte Systematisierung aller grundlegenden Bestandteile der Gestaltungsmethodik einen Ausgangspunkt für die zukünftige Implementierung eines solchen Expertensystems dar.

Die **Einfachheit** der Anwendung der Gestaltungsmethodik wurde vorrangig anhand des Informations- und Bewertungsbedarfs der Lösungsmodule geprüft. Unter Nutzung der Zusammenstellungen und Ausführungen der jeweils identifizierten Lösungsvarianten, Entscheidungskriterien, Umwelteinflüsse sowie weiteren Hilfestellungen (Flussdiagramme, Tabellenkalkulationen usw.) konnte der Vorbereitungsaufwand für zu treffende Entscheidungen gering gehalten werden. Die Anlehnung an bestehende Standards und Arbeiten sorgt zudem für Kongruenz mit bereits bekannten Handlungsweisen, was ebenfalls zur Vereinfachung beiträgt. Dennoch wurde bereits festgestellt, dass der Umfang der Methodik infolge der Komplexität in den betrachteten Umplanungsprojekten groß ist. Folglich stellt die genaue Kenntnis der Schritte und Lösungsmodule zunächst eine Hürde in der Anwendung dar. Dieser Umstand

wirkt sich auf die Planungseffizienz in der Anwendung aus, sodass diese bei vertiefter Methodenkenntnis oder beim Einsatz eines Expertensystems (s. o.) gesteigert wird. Die Bewertung der Einfachheit entsprechend These 5 fokussiert jedoch nicht auf diese Effizienz (insbesondere während einer ersten Nutzung), sondern primär auf den Aufwand zur Informationsbeschaffung, Alternativenbewertung und -auswahl eines vertrauten Anwenders. Sie wird somit an dieser Stelle als erfüllt betrachtet.

Flexibilität zeigt sich an den unterschiedlich ausgeprägten Zielsystemen für die Simulationsstudien in den drei erläuterten Fallstudien. Diese ergaben sich jeweils aus der Anwendung des entsprechenden Lösungsmoduls. Entgegen anderen bestehenden Vorgehensmodellen wurde dabei nicht durch einen konkreten Modellierungsansatz festgelegt, welche zusätzlichen energiebezogenen Kennzahlen durch die Simulation ermittelbar werden. In Erweiterung zeigt die Fallstudie 3 zudem, dass auf Grundlage der Gestaltungsmethodik unterschiedliche Energiemodelle beachtet, ausgewählt und eingesetzt werden können. Somit ist der Anwender der Methodik völlig frei in der Art seiner Modellierung und in der Zielkriterienauswahl für die Untersuchung. Folglich wird These 6 als erfüllt betrachtet.

Bei Untersuchung der Fallstudien 1 und 2 wurde unter Einsatz der Lösungsmodule deutlich, dass in den ursprünglichen Simulationsprojekten für den Gestaltungsaspekt Energiedatenakquisemethode nicht die effizienteste Lösungsvariante eingesetzt wurde. Dies resultierte auch, wie erläutert, zum Teil aus externen Restriktionen während der ursprünglichen Bearbeitung der zugrundeliegenden Simulationsstudien. Insbesondere die strukturierte Identifikation sowie Gegenüberstellung möglicher Lösungsvarianten und die Quantifizierung der Vorteilhaftigkeit (Priorität) ebendieser hat jedoch das Potenzial, eine objektivere und somit eine weniger intuitive bzw. situative Entscheidung herbeizuführen. Für alle anderen Gestaltungsaspekten von Simulationsstudien stimmte das Ergebnis der Anwendung der Gestaltungsmethodik mit den Entscheidungen in den ursprünglichen Simulationsprojekten überein und war zudem zweckmäßig. Daher ist weiterhin festzustellen, dass die Gestaltungsmethodik der **ergebniseffizienten Entscheidungsfindung** beiträgt.

In den drei Fallstudien konnte zudem gezeigt werden, wie die entwickelte Gestaltungsmethodik unter Nutzung der **Simulationslösung eniBRIC** zu durchaus unterschiedlichen Ausprägungen der Simulationsstudien führt. Neben den verschiedenen Branchen, die im Untersuchungsfokus lagen, ergaben sich insbesondere bei den Energiemodellen, den Energiedatenakquisemethoden, den Experimentplanungsmethoden und den Zielsystemen für die Simulation Unterschiede bei der Ausgestaltung der Simulationsstudien.

Die Anwendung des Lösungsmoduls Werkzeug/-architektur in den Fallstudien hat zudem gezeigt, dass die bereits in Abschnitt 4.3.2 angeführte, übliche Festlegung des Simulationsanwenders auf ein bestimmtes Werkzeug häufig den Lösungsraum zur Werkzeugauswahl bzw. zur Werkzeugarchitektur signifikant einschränkt, da der Anschaffungsaufwand zusätzlicher oder neuer Software etwaige Nutzenvorteile meist nicht aufwiegt. Dennoch erscheint es zielführend, auch diesen Gestaltungsaspekt bei jeder Anwendung der Gestaltungsmethodik zu beachten, da die bislang vorherrschende Diskretisierung von Energieflüssen (vgl. Abschnitt 2.3.3) nicht in jedem Falle wirklich zweckdienlich ist.

Nicht zuletzt muss an dieser Stelle eine **kritische Würdigung der methodischen Herangehensweise** bzw. der darin inhärenten Mängel erfolgen. Wie bereits in Abschnitt 5.1 diskutiert, ist die ex-post-Erprobung an Fallstudien, an deren ursprünglichen Simulationsprojekten der Autor selbst beteiligt war, methodisch nicht einwandfrei. Dieser Ansatz war dennoch notwendig, da keine Durchführung einer gänzlich neuen Studie zum Zwecke der Erprobung möglich war. Die sich daraus ergebenden potenziellen Konsequenzen sind bei der Wertung der zuvor diskutierten Ergebnisse einzubeziehen. Insbesondere bei Anwendung der Lösungsmodule Effizienzmaßnahme, Planungsfall und Zielsystem für Simulation ist nur schwer zu ergründen, inwieweit deren in Abschnitt 5.3 diskutierte Ergebnisse ohne Wissen über die ursprünglichen Simulationsprojekte anders ausgefallen wären. Da in allen ursprünglichen Projekten iSvMEF zum Einsatz kam, liegt es nahe, dass das Lösungsmodul Simulationswürdigkeit ebenfalls zu diesem Ergebnis führt, und es lässt sich keine Aussage treffen, ob sich auch eine andere Auswahl (z. B. Einsatz alternativer Methoden) richtigerweise ergeben hätte. Zugleich kann die große Übereinstimmung der Ergebnisse der Lösungsmodule Experimentplanungsmethode, Systemgrenzen, Energiemodell und Werkzeug/-architektur auch Zeugnis dafür sein, dass die Gestaltungsmethodik unter Einbezug von Wissen aus ebendiesen Fallstudien entwickelt wurde.

Ausgehend von den Anforderungen an die Konzeptionierung und die Systematisierung der Gestaltungsmethodik (vgl. Abschnitt 3.1.2) und der zur Prüfung ebendieser formulierten Thesen (vgl. Abschnitt 5.1) ist jedoch auch festzustellen, dass die angeführten Aspekte nur geringen bzw. begrenzten Einfluss auf das Ergebnis der Erprobung haben. Zusammenfassend werden daher alle an die Konzeptionierung der Gestaltungsmethodik gestellten Anforderungen als erfüllt betrachtet. Eine weiterführende Erprobung in einem gänzlich neuen Umplanungsprojekt ist aber dringend erforderlich. Welche weiteren Handlungsansätze darüber sowie über das Ergebnis dieser Arbeit hinaus abgeleitet werden können, wird im folgenden Kapitel diskutiert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Erreichung von in internationalen Klimaschutzverträgen definierten Zielen sind große umweltpolitische Anstrengungen aller Nationen notwendig. Die Energieeffizienzsteigerung in Industriebetrieben stellt dabei eine zentrale Notwendigkeit für Deutschland dar. Da entsprechende Unternehmensaktivitäten bislang vor allem ökonomisch motiviert sind, kommt der effizienten und qualitativ hochwertigen Planung von Effizienzmaßnahmen eine besondere Bedeutung zu. Der Einsatz von um energetische Betrachtungen erweiterte Materialflusssimulation ist ein Ansatz, der zur Verbesserung von Planungsergebnissen in diesem Kontext beitragen kann. Zugleich ist für dessen Anwendung bislang nur unzureichend methodische Unterstützung verfügbar.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Konzeptionierung und die Systematisierung einer Methodik, die der Erreichung eines ausgewogenen Aufwand-Nutzen-Verhältnisses bei der Ausgestaltung von Simulationsstudien in Umplanungsprojekten zur Energieeffizienzsteigerung in Fabriken dient. Diese unterstützt, unabhängig von Industriebranchen und Simulationslösungen, Entscheidungen zur Auswahl von geeigneten Effizienzmaßnahmen sowie zur Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind im folgenden Abschnitt zusammengefasst. Abschließend werden Ansätze für zukünftige Forschungsarbeiten vorgestellt.

6.1 Ergebnisse der Arbeit

Eingangs werden in Kapitel 1 zunächst sieben **Forschungsfragen** aufgeworfen. Diese beziehen sich auf ein *Zielsystem des Simulationsanwenders*, relevante *Planungsfälle*, *Handlungsansätze* zur Effizienzsteigerung in der Produktion, *Simulationswürdigkeit*, *Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien*, dazu bekannte *Lösungsvarianten* und Möglichkeiten *Entscheidungen zur Auswahl* ebendieser zu unterstützen.

Zur Fundierung der Relevanz dieser Forschungsfragen sowie zur Darstellung von einzubeziehenden Arbeiten erörtert Kapitel 2 den **Stand von Wissenschaft und Technik**. Die Analyse bezieht dabei insbesondere die Forschungsrichtungen Betriebswissenschaft und Fabrikplanung, Entscheidungstheorie sowie Digitale Fabrik und Simulationstechnik ein. Gezeigt wird u. a., dass bereits eine bedeutende Zahl von Arbeiten zur Planung energie- und ressourceneffizienter Fabrik- bzw. Produktionssysteme existiert. Gemein ist vielen dieser Ansätze, dass sie Defizite hinsichtlich der konkreten Gestaltung des Einsatzes von Planungsmethoden aufweisen. Der Einsatz von Simulation

ist zugleich ein durchaus häufig verwendeter Ansatz in diesem Kontext. Weiterhin werden die Ergebnisse einer eine umfangreichen systematischen Literaturanalyse vorgestellt, in der Fallstudien zum Einsatz der um energetische Betrachtungen erweiterten Simulation auf ihre Unterschiede hin untersucht werden. Darüber hinaus werden bestehende Vorgehensmodelle zum Einsatz dieser speziellen Form der Simulation analysiert. Ein zentrales Ergebnis ist dabei, dass die bestehenden Vorgehensmodelle trotz großer Diversität in bisherigen Simulationsanwendungen nur unzureichend auf die Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien eingehen.

Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 die identifizierten Defizite herausgestellt und die Forschungsfragen weiter konkretisiert. Anhand von Anforderungen an eine Gestaltungsmethodik wird dem folgend der **Handlungsbedarf** erläutert. Das abgeleitete **Lösungskonzept** beruht auf einem grundlegenden *Zielsystem des Simulationsanwenders*. Dieses resultiert aus der Prämisse, dass Simulation einen Zusatznutzen für die Bewertung eines Planungsergebnisses schafft, dem ein zusätzlicher Aufwand entgegensteht. Bei der Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien ist stets eine Abwägung des Verhältnis ebendieser vorzunehmen. Um dies für alle relevanten Gestaltungsaspekte zu strukturieren, umfasst das Grundkonzept der Gestaltungsmethodik ein übergeordnetes Vorgehensmodell, das durch Synthese aus der Struktur des Problemlösungszyklus und der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 entwickelt wurde. Es gibt einen Rahmen für die durch Lösungsmodule unterstützten Entscheidungen zur Ausgestaltung der Simulationsstudie. Unter Rückgriff auf eine von Förster und Wirth [57, S. 11 ff.] vorgestellte Systematik sind dazu acht *Planungsfälle* formuliert, auf Grundlage derer sich *Handlungsansätze* zur Effizienzverbesserung in Fabriken identifizieren lassen. Das in Abschnitt 3.3 eingeführte Vorgehensmodell umfasst zwei Phasen (vgl. Abbildung 6.1), die notwendige Eingangsinformation für die Investitionsentscheidung bezüglich der Energieeffizienzmaßnahme und die anschließende Realisierung liefern. Die fabrikplanerischen Vorarbeiten zielen, die zuvor angeführten Planungsfälle sowie identifizierte Handlungsansätze aufgreifend, zunächst auf die Entwicklung einer Effizienzmaßnahme ab. Auf Grundlage dieser ist über die *Simulationswürdigkeit zu* entscheiden. Erscheint der Einsatz von integrierter Simulation von Material- und Energieflüssen zielführend im Sinne der Planungseffizienz, so schließt sich die zweite Phase zur Durchführung der Simulationsstudie an. Andernfalls ist der Einsatz alternativer Planungsmethoden empfohlen, die ihrerseits nicht Betrachtungsgegenstand der Gestaltungsmethodik sind.

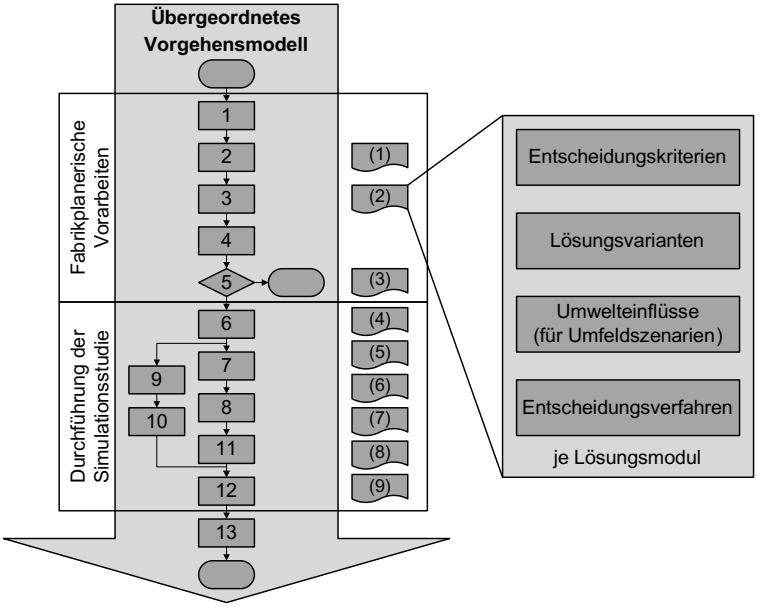


Abbildung 6.1: Überblick der Gestaltungsmethodik

Das **Vorgehen in den 13 Arbeitsschritte** des Vorgehensmodells ist in Kapitel 4 dargestellt, wobei insbesondere auf die neun entwickelten Lösungsmodule eingegangen wird. Diese umfassen jeweils eine Systematisierung von Entscheidungskriterien, *Lösungsvarianten*, Umwelteinflüssen und Entscheidungsverfahren (methodische Unterstützung für die *Entscheidung zur Auswahl*) zur Ausprägungsbestimmung für die identifizierten *Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien*. Dabei kommen insbesondere Strukturierungen in Form von Flussdiagrammen sowie der Analytische Hierarchie Prozess (AHP) zum Einsatz. Ergänzend dazu finden sich in Anhang D Checklisten und weiterführende Erläuterungen als Hilfestellung für die Anwendung der Gestaltungsmethodik. In Summe werden somit 78 einfache oder komplexe Entscheidungen und Aktivitäten unterstützt, wobei neben der Identifikation eines Planungsfalls und eines Handlungsansatzes zur Effizienzsteigerung die folgenden Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien einbezogen werden:

- Simulationswürdigkeit
- Zielsystem für die Simulation
- Experimentplanungsmethode
- Systemgrenzen (hinsichtlich der Energieflüsse)

- Energiemodell
- Werkzeug/-architektur
- Energiedatenbeschaffungsmethode

Zur Veranschaulichung sowie zur Prüfung des Ergebnisses der Konzeptionierung und der Systematisierung wird in Kapitel 5 die exemplarische **Erprobung** der Gestaltungsmethodik anhand von drei Fallstudien vorgestellt. Dies erfolgt insbesondere hinsichtlich der Anforderungen Übertragbarkeit, Synthese, Methodeneinsatz, Rationalität, Realitätsnähe, Anwendbarkeit, Einfachheit und Flexibilität. Dabei zeigt sich u. a., dass die Anwendung der Methodik unter Verwendung der generischen Simulationslösung eniBRIC zu unterschiedlich ausgeprägten Simulationsstudien führt. Der Vergleich mit den Simulationsprojekten, auf denen die Fallstudien aufbauen, zeigt zudem, dass die Lösungsmodule zu einer ergebniseffizienten Entscheidungsfindung beitragen. Die definierten Anforderungen sind folglich umfänglich erfüllt und die Zielstellung der Arbeit wird als erreicht betrachtet.

Die vorliegende Dissertation stellt einen **Beitrag zur Produktionsforschung** dar, der insbesondere der effizienten Planung von Energieeffizienzmaßnahmen dient. Die entwickelte Gestaltungsmethodik unterstützt die entscheidungstheoretisch fundierte Durchführung von Simulationsstudien unter besonderer Beachtung der wichtigsten Gestaltungsaspekte. Dazu wurden existierende wissenschaftliche Arbeiten und methodische Ansätze gezielt in ein – an geltenden Standards orientiertes – Vorgehensmodell integriert. Dieses ist durch Durchgängigkeit von der Projektinitiierung, über die Entwicklung einer geeigneten Effizienzmaßnahme bis hin zur simulationsgestützten Bewertung sowie Realisierung einer Investitionsentscheidung gekennzeichnet.

6.2 Ansätze für zukünftige Forschungsarbeiten

Infolge der allgemein großen Komplexität von energieeffizienzorientierten Umplanungsprojekten und Simulationsstudien ist die Gestaltungsmethodik sehr umfangreich. Entsprechend geht dessen Erlernung zum händischen Einsatz unter Verwendung der entwickelten Checklisten und Tabellenkalkulationen mit einem bedeutenden Aufwand einher. Dieser reduziert die Planungseffizienz in einer Erstanwendung, wird sich aber bei wiederholter Anwendung sukzessive reduzieren, sodass sich alle relevanten Entscheidungen schließlich strukturiert und schnell treffen lassen. Eine Möglichkeit, den Aufwand zur Erlernung signifikant zu reduzieren, stellt die Entwicklung eines **Expertensystems** dar. Ein solches kann das Vorgehensmodell mit allen Einzelentscheidungen und Aktivitäten zusammen mit dem akkumulierten Wissen zu Lösungsvarianten, Realisierungsansätzen usw. in eine Folge einfacher grafischer

Oberflächen integrieren, die den Nutzer bei der Durchführung des Umplanungsprojekts sowie der Simulationsstudie unterstützen. Die Entwicklung einer solchen Software war nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit, jedoch stellt die in Kapitel 4 sowie Anhang D dargestellte literaturgestützte Systematisierung der grundlegenden Bestandteile der Gestaltungsmethodik eine Basis hierzu bereit. Für die Realisierung eines solchen Expertensystems ist insbesondere die Softwarearchitektur und der Aufbau der einzelnen grafischen Oberflächen zu klären. Die unmittelbare Integration von gewonnenen Daten und Informationen (z. B. Energiedaten) zum Zwecke der Bereitstellung an die verwendete Simulationssoftware (ggf. inklusive Datenaufbereitung) kann darüber hinaus einen zusätzlichen Mehrwert für ein solches System darstellen.

Weiter ist festzustellen, dass im Zuge der Konkretisierung des Betrachtungsfokus (Abschnitt 3.2.3) für die vorliegende Arbeit eine Einschränkung hinsichtlich der einzubeziehenden Planungsfälle vorgenommen wird. Dieser folgend bezieht sich das Vorgehen der Arbeitsschritte und Lösungsmodule zunächst nur auf die Planungsfälle 1–4. Dem folgend kann die vorgestellte Gestaltungsmethodik hinsichtlich möglicher Hilfestellungen für die Planungsfälle 5 und 6, also **Umplanungen zur Anpassung von Infrastruktur- und Versorgungssystemen**, weiterentwickelt werden. Die Planungsfälle 7 und 8 sind dabei zunächst nicht notwendigerweise einzubeziehen, da diese durch einen Anpassungsumfang gekennzeichnet sind, der für Umplanungsprojekte untypisch ist (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Daraus ergibt sich zugleich ein weiterer Ansatz zum Ausbau der entwickelten Gestaltungsmethodik. Eine Grundprämisse ebendieser ist, dass der Problemrahmen sehr eng eingeschränkt sein muss, damit bedeutungsvolle Hilfestellungen formuliert werden können (vgl. Abschnitt 1.2). Daher erfolgte eine Einschränkung auf Umplanungsprojekte. Zugleich besteht ein Potenzial zur **Übertragung auf weitere Arten von Planungsprojekten** (Neuplanung, Revitalisierungsplanung usw.). Weitere Untersuchungen können dahingehend der Prüfung zur Anwendbarkeit, der Erweiterung und der Anpassung der Gestaltungsmethodik dienen.

Ebenso sind bislang vorrangig Fabriken betrachtet, obwohl die systematische Literaturanalyse auch eine (wenn doch geringere) Relevanz von **Supply Chain Management** Ansätzen nahelegt. Entsprechend kann auch untersucht werden, wie die Methodik zu erweitern ist, damit derartige Problemstellungen betrachtet werden können.

Die entwickelte Gestaltungsmethodik fokussiert vollständig auf Projekte, die Energieeffizienzsteigerung (ggf. mit unterschiedlichem Handlungsfokus) zum Ziel haben. Klassische Energiekosteneinsparungen fallen ebenso darunter, wie

die Verringerung von Treibhausgasemmissionen, die Reduzierung eingesetzter Rohstoffe bzw. Betriebsmittel und die Flexibilisierung des Energiebezugs. Zugleich gibt es andere Trends (z. B. Industrie 4.0), die sich auf die Weiterentwicklung von Fabriken und Produktionssystemen auswirken. Somit kann auch untersucht werden, wie die Gestaltungsmethodik auf **(Um-)Planungsprojekte mit anderem Handlungsfokus**, die sich aus ebendiesen Trends ergeben, übertragen lässt bzw. inwieweit eine Übertragung Mehrwerte bietet.

Der **praktische Einsatz der Gestaltungsmethodik** stellt einen weiteren Ansatz für zukünftige Forschungsarbeiten dar. So wurden die in Kapitel 5 vorgestellten Fallstudien ex post durchgeführt. Die Anwendung der Methodik in gänzlich neuen Planungsprojekten verspricht zusätzliche Erkenntnisse über etwaige Weiterentwicklungspotenziale. Zu prüfen ist insbesondere, ob das Vorgehen auch dabei den Anforderungen nach Abschnitt 3.1.2 genügt und ob es zu guten Ergebnissen in der Projektbearbeitung führt.

Literaturverzeichnis

[1] Die Vereinten Nationen, *Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimänderungen*. 1992.

[2] Die Vereinten Nationen, *Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen*. 1998.

[3] Die Vereinten Nationen, *Übereinkommen von Paris*. 2015.

[4] Europäische Kommission, „Klima- und Energiepaket 2020“, *Klima- und Energiepaket 2020*, 07.10.2016. [Online]. Verfügbar unter: http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_de.htm. [Zugegriffen: 10.10.2016].

[5] Europäische Kommission, „Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030“, *Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030*, 07.10.2016. [Online]. Verfügbar unter: http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/index_de.htm. [Zugegriffen: 10.10.2016].

[6] Statista und IEA, „Struktur des Stromverbrauchs weltweit nach Sektor im Jahr 2013“, 11.2015. [Online]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/279592/ umfrage/weltweiter-stromverbrauch-nach-sektoren/. [Zugegriffen: 11.10.2016].

[7] Statista und IEA, „Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland nach Sektor im Jahr 2015“, 07.2016. [Online]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200863/umfrage/struktur-des-energieverbrauchs-in-deutschland-nach-sektoren/. [Zugegriffen: 11.10.2016].

[8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“, *6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energieforschung-und-Innovationen/6-energieforschungsprogramm.html. [Zugegriffen: 12.10.2016].

[9] KfW, „KfW-Energieeffizienzprogramm – Produktionsanlagen/-prozesse“, *KfW-Energieeffizienzprogramm – Produktionsanlagen/-prozesse*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Förderprodukte/EE-Produktion-292-293/. [Zugegriffen: 12.10.2016].

[10] Deutsche Bundesstiftung Umwelt, „DBU - Förderthemen“, *DBU - Förderthemen*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dbu.de/foerderthemen. [Zugegriffen: 12.10.2016].

[11] Sächsische Aufbaubank, „Förderrichtlinie Zukunftsfähige Energieversorgung - RL Energie/2014“, *Förderrichtlinie Zukunftsfähige Energieversorgung - RL Energie/2014*, 24.05.2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sab.sachsen.de/unternehmen/förderprogramme/förderrichtlinie-zukunftsfähige-energieversorgung-rl-energie-2014.jsp?topicID=73026. [Zugegriffen: 12.10.2016].

[12] Statista und Statistisches Bundesamt, „Investitionen zur Energieeffizienzsteigerung im Verarbeitenden Gewerbe in Deutschland nach ausgewählten Branchen im Jahr 2013 (in Millionen Euro)“, 12.2015. [Online]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/ daten/studie/452545/umfrage/investitionen-zur-energieeffizienzsteigerung-der-industrie-in-deutschland-nach-branchen/. [Zugegriffen: 11.10.2016].

[13] E. Müller, J. Engelmann, T. Löffler, und J. Strauch, *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[14] C. Imgrund, „Ganzheitliche Ansätze und Methoden zur nachhaltigen Neuplanung einer energieeffizienten Fabrik mit besonderem Schwerpunkt auf die Automobilmontage“, Dissertation, TU Chemnitz, Chemnitz, 2014.

[15] H. Hopf, *Methodik zur Fabriksystemmodellierung im Kontext von Energie- und Ressourceneffizienz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.

[16] U. Bracht, D. Geckler, und S. Wenzel, *Digitale Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

[17] J. R. Duflou, J. W. Sutherland, D. Dornfeld, C. Herrmann, J. Jeswiet, S. Kara, M. Hauschild, und K. Kellens, „Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 61, Nr. 2, S. 587–609, Jan. 2012. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.002

[18] VDI 3633 (Entwurf):2013-12, „Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Begriffe“.

[19] VDI 3633, Blatt 1:2014-12, „Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Grundlagen“.

[20] VDI 3633, Blatt 3:1997-12, „Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Experimentplanung und -auswertung“.

[21] VDI 3633, Blatt 12 (Entwurf):2016-05, „Simulation von Logistik-, Materialfluß-und Produktionssystemen – Simulation und Optimierung“.

[22] M. Schenk, S. Wirth, und E. Müller, *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[23] S. Thiede, *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.

[24] VDI 5200, Blatt 1:2011-02, „Fabrikplanung – Planungsvorgehen".

[25] P. Mertens, F. Bodendorf, W. König, M. Schumann, T. Hess, und P. Buxmann, *Grundzüge der Wirtschaftsinformatik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-53362-8

[26] K.-I. Voigt, *Industrielles Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[27] E. Westkämper, *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin: Springer, 2006.

[28] U. Götze, *Investitionsrechnung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[29] Die Vereinten Nationen, *60/1. Ergebnis des Weltgipfels 2005*. 2005.

[30] R. Neugebauer und U. Götze, „Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung – Herausforderungen und Erkenntnisse", in *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung – Diskussion der Ergebnisse des Spitzentechnologieclusters eniPROD*, R. Neugebauer, U. Götze, und W.-G. Drossel, Hrsg. Chemnitz: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2014, S. 1–10.

[31] U. Dombrowski, S. Ernst, und A. Reimer, „A New Training for Factory Planning Engineers to Create Awareness of Climate Change", *Procedia CIRP*, Bd. 48, S. 443–448, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.083

[32] T. Bauernhansl, Hrsg., *Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[33] A. Fysikopoulos, G. Pastras, T. Alexopoulos, und G. Chryssolouris, „On a generalized approach to manufacturing energy efficiency", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 73, Nr. 9–12, S. 1437–1452, Aug. 2014. DOI: 10.1007/s00170-014-5818-3

[34] M. Blesl und A. Kessler, *Energieeffizienz in der Industrie*. Berlin: Springer-Vieweg, 2013.

[35] VDI 4661:2013-12, „Energiekenngrößen: Grundlagen – Begriffe".

[36] DIN EN ISO 50001:2011-12, „Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung".

[37] G. Reinhart, F. Karl, P. Krebs, und S. Reinhardt, „Energiewertstrom: Eine Methode zur ganzheitlichen Erhöhung der Energieproduktivität“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 105, Nr. 10, S. 870–875, Okt. 2010. DOI: 10.3139/104.110401

[38] T. Gutowski, J. Dahmus, und A. Thiriez, „Electrical energy requirements for manufacturing processes“, in *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Leuven, 2006, S. 623–638.

[39] DIN EN ISO 14040:2009-11, „Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen“.

[40] DIN EN ISO 14044:2006-10, „Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen“.

[41] DIN EN ISO 14045:2012-10, „Umweltmanagement – Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen – Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien“.

[42] D. Chen, T. Schudeleit, G. Posselt, und S. Thiede, „A State-of-the-art Review and Evaluation of Tools for Factory Sustainability Assessment“, *Procedia CIRP*, Bd. 9, S. 85–90, 2013. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.173

[43] M. Schenk, S. Wirth, und E. Müller, *Factory Planning Manual*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

[44] G. Pawellek, *Ganzheitliche Fabrikplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[45] H.-P. Wiendahl, J. Reichardt, und P. Nyhuis, *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*, 2., Überarb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2014.

[46] R. Neugebauer, Hrsg., *Handbuch Ressourcenorientierte Produktion*. München: Hanser, 2014.

[47] T. Löffler, „Integrierter Umweltschutz bei der Produktionsstättenplanung: Methode eines planungsintegrierten Umweltschutzes (PLIUS) und Branchenstudie zur spanenden Metallbearbeitung“, Dissertation, TU Chemnitz, Chemnitz, 2003.

[48] J. Engelmann, „Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken“, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2009.

[49] L. Meynerts, „Lebenszyklusorientierte Wirtschaftlichkeitsanalysen und -bewertungen im Rahmen der Fabrikplanung: Entwicklung eines Analyse- und Bewertungsinstrumentariums unter besonderer Berücksichtigung der Energieeffizienz“, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2015.

[50] P. Schnellbach, *Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme*. München: Herbert Utz Verlag, 2016.

[51] M. Krones, *A Method to Identify Energy Efficiency Measures for Factory Systems Based on Qualitative Modeling*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. DOI: 10.1007/978-3-658-18343-1

[52] D. Chen, S. Heyer, G. Seliger, und T. Kjellberg, „Integrating sustainability within the factory planning process“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 61, Nr. 1, S. 463–466, 2012. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.067

[53] F. Müller, A. Cannata, B. Stahl, M. Taisch, S. Thiede, und C. Herrmann, „Green Factory Planning: Framework and Modules for a Flexible Approach“, in *Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains*, Berlin, Heidelberg, 2013, Bd. 414, S. 167–174. DOI: 10.1007/978-3-642-41266-0_21

[54] F. Mueller, A. Cannata, und C. Herrmann, „Procedure of Modular Green Factory Planning to Enhance Collaboration and Decision Making“, *Procedia CIRP*, Bd. 15, S. 331–336, 2014. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.071

[55] C. Reinema, C. P. Schulze, und P. Nyhuis, „Energieeffiziente Fabriken: Ein Vorgehen zur integralen Gestaltung“, *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 101, Nr. 4, S. 249–252, 2011.

[56] T. AlGeddawy und H. ElMaraghy, „Design for energy sustainability in manufacturing systems“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 65, Nr. 1, S. 409–412, 2016. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.023

[57] A. Förster und S. Wirth, Hrsg., *Integrative modulare Produktionssystemplanung.* Chemnitz: Inst. für Betriebswiss. und Fabriksysteme, 2003.

[58] C.-G. Grundig, *Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*, 5., Aktualisierte Aufl. München: Hanser, 2015.

[59] C. Galitsky und E. Worrel, „Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Vehicle Assembly Industry: An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers“, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkley, LBNL-50939-Revision, März 2008.

[60] F. Seefeldt, M. Wünsch, U. Matthes, W. Baumgartner, C. Michelsen, E. Orsolya, P. Leybold, und T. Herz, „Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen“, Prognos AG, Basel und Berlin, Endbericht 18/06 33–6464, Aug. 2007.

[61] S. Schlund, F. Schnabel, und M. Rist, „Umsetzung der Ressourceneffizienz im Unternehmen“, in *Handbuch Ressourcenorientierte Produktion*, R. Neugebauer, Hrsg. München: Hanser, 2014, S. 91–124.

[62] H. Laux, R. M. Gillenkirch, und H. Y. Schenk-Mathes, *Entscheidungstheorie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[63] R. Grünig und R. Kühn, *Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[64] F. Eisenführ, M. Weber, und T. Langer, *Rationales Entscheiden*, 5. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

[65] S. Schmidt, *Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit: eine vergleichende Gegenüberstellung individueller und kapitalmarktorientierter Konzeptionen zur Entscheidungsvorbereitung*. Chemnitz: GUC - Verl. der Ges. für Unternehmensrechnung und Controlling, 2014.

[66] M. Wessler, *Entscheidungstheorie*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012.

[67] T. V. Guy, M. Kárný, und D. H. Wolpert, Hrsg., *Decision Making with Imperfect Decision Makers*, Bd. 28. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[68] G. Gigerenzer und P. M. Todd, *Simple heuristics that make us smart*, 1. issued as an Oxford Univ. Press paperback. Oxford: Oxford Univ. Press, 2001.

[69] J.-P. Thommen und M. Siepermann, „Heuristik“, *Gabler Wirtschaftslexikon*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.

[70] H. Streim, „Heuristische Lösungsverfahren Versuch einer Begriffsklärung“, *Zeitschrift für Operations Research*, Bd. 19, Nr. 5, S. 143–162, Okt. 1975. DOI: 10.1007/BF01999748

[71] L. Suhl und T. Mellouli, *Optimierungssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[72] J. Lentes, „Einsatz der ‚Digitalen Produktion' zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit", *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 98, Nr. 3, S. 163–164, 2008.

[73] J. Lentes und M. Dangelmaier, „Digitale Produkte", in *Digitale Produktion*, E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu, und J. Lentes, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 93–106.

[74] VDI 4499, Blatt 1:2008-02, „Digitale Fabrik – Grundlagen".

[75] M. Landherr, M. Neumann, J. Volkmann, und C. Constantinescu, „Digitale Fabrik", in *Digitale Produktion*, E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu, und J. Lentes, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 107–131.

[76] S. Kerber, *Prozessgestaltung zum Einsatz digitaler Fabrikgesamtmodelle*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.

[77] W. Kühn, *Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner*. München: Hanser, 2006.

[78] K. Gutenschwager, M. Rabe, S. Spieckermann, und S. Wenzel, *Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-55745-7

[79] VDI 4499, Blatt 2:2011-05, „Digitale Fabrik – Digitaler Fabrikbetrieb".

[80] B. Werners, *Grundlagen des Operations Research*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[81] V. Wohlgemuth und B. Page, „Einbettung von Transportmodellen und diskreten Simulationsmodellen in Stoffstromnetze", in *Umweltinformatik '00: Umweltinformation für Planung, Politik und Öffentlichkeit. 12. Internationales Symposium, Informatik für den Umweltschutz—der Gesellschaft für Informatik (GI)*, Bonn, 2000, S. 345–360.

[82] J. Hesselbach und M. Junge, „Reduzierung von Energiespitzen durch Fabriksimulation", *Industrie Management*, Bd. 21, Nr. 2, S. 35–37, 2005.

[83] P. Solding und D. Petku, „Applying Energy Aspects on Simulation of Energy Intensive Production Systems", in *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, Orlando, 2005, S. 1428–1432. DOI: 10.1109/WSC.2005.1574408

[84] M. Junge, *Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2007.

[85] M. Rager, *Energieorientierte Produktionsplanung: Analyse, Konzeption und Umsetzung*, 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2008.

[86] P. Solding, „Increased Energy Efficiency in Manufacturing Systems Using Discrete Event Simulation“, Dissertation, De Montfort University, Leicester, 2008.

[87] B. Löfgren, „Capturing the life cycle environmental performance of a company's manufacturing system“, Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2009.

[88] N. Weinert, *Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme*. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 2010.

[89] Y. Seow, „A framework for modelling embodied product energy to support energy efficient manufacturing“, Dissertation, Loughborough University, Leicestershire, 2011.

[90] S. Khalaf, *Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Erstellung energieeffizienter Fertigungsstrategien für verkettete Fertigungssysteme*. Aachen: Shaker, 2012.

[91] R. Larek, *Ressourceneffiziente Auslegung von fertigungstechnischen Prozessketten durch Simulation und numerische Optimierung*. Aachen: Shaker, 2012.

[92] N. Mardan, „Combining simulation and optimization for improved decision support on energy efficiency in industry“, Dissertation, Department of Management an Engineering, Linköping Institute of Technology, Linköping, 2012.

[93] H. Haag, *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013.

[94] M. Schacht, *Erweiterung des Planungsprozesses im Karosserierohbau um Energieaspekte zur Auslegung der Technischen Gebäudeausrüstung*. Herzogenrath: Shaker, 2014.

[95] A. Fysikopoulos, „Energy Efficiency in Manufacturing Systems“, Dissertation, University of Patras, Patras, 2014.

[96] J. Kohl, *Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik*. Bamberg: Meisenbach GmbH Verlag, 2016.

[97] J. Beier, *Simulation Approach Towards Energy Flexible Manufacturing Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-46639-2

[98] J. Andersson, A. Skoogh, und B. Johansson, „Evaluation of methods used for life-cycle assessments in Discrete Event Simulation“, in *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, Berlin, 2012. DOI: 10.1109/WSC.2012.6465094

[99] S. Thiede, Y. Seow, J. Andersson, und B. Johansson, „Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Bd. 6, Nr. 1, S. 78–87, Jan. 2013. DOI: 10.1016/j.cirpj.2012.10.004

[100] A. Sproedt, J. Plehn, P. Schönsleben, und C. Herrmann, „A simulation-based decision support for eco-efficiency improvements in production systems“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 105, S. 389–405, Okt. 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.082

[101] M. Kouki, O. Cardin, P. Castagna, und C. Cornardeau, „Input data management for energy related discrete event simulation modelling“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 141, S. 194–207, Jan. 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.061

[102] A. C. Roemer und S. Strassburger, „A review of literature on simulation-based optimization of the energy efficiency in production“, in *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, Washington DC, 2016, S. 1416–1427. DOI: 10.1109/WSC.2016.7822194

[103] S. Wenzel, T. Peter, J. Stoldt, A. Schlegel, G. Groß, H. Pitsch, M. Rabe, und M. Seewaldt, „Betrachtungen energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik: Eine Literaturanalyse“, in *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, Kassel, 2017, S. 9–18.

[104] T. L. Garwood, B. R. Hughes, M. R. Oates, D. O'Connor, und R. Hughes, „A review of energy simulation tools for the manufacturing sector“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 81, S. 895–911, Jan. 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.063

[105] Y. B. Moon, „Simulation modelling for sustainability: a review of the literature“, *International Journal of Sustainable Engineering*, Bd. 10, Nr. 1, S. 2–19, Jan. 2017. DOI: 10.1080/19397038.2016.1220990

[106] J. Wilson, A. Arokiam, H. Belaidi, und J. Ladbrook, „A simple energy usage toolkit from manufacturing simulation data“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 122, S. 266–276, Mai 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.11.071

[107] C. Herrmann, L. Bergmann, S. Thiede, und A. Zein, „Framework for Integrated Analysis of Production Systems“, in *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, S. Takata und Y. Umeda, Hrsg. London: Springer London, 2007, S. 195–200.

[108] S. Rahimifard, Y. Seow, und T. Childs, „Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 59, Nr. 1, S. 25–28, 2010. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.048

[109] R. Neugebauer, M. Putz, A. Schlegel, T. Langer, E. Franz, und S. Lorenz, „Energy-Sensitive Production Control in Mixed Model Manufacturing Processes“, in *Leveraging Technology for a Sustainable World*, D. A. Dornfeld und B. S. Linke, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 399–404.

[110] J. Heilala, S. Vatanen, H. Tonteri, J. Montonen, S. Lind, B. Johansson, und J. Stahre, „Simulation-based sustainable manufacturing system design“, in *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, Miami, 2008, S. 1922–1930. DOI: 10.1109/WSC.2008.4736284

[111] N. Diaz-Elsayed, A. Jondral, S. Greinacher, D. Dornfeld, und G. Lanza, „Assessment of lean and green strategies by simulation of manufacturing systems in discrete production environments“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 62, Nr. 1, S. 475–478, 2013. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.03.066

[112] S. Wenzel, F. Halfar, C. Pöge, und S. Spieckermann, „Simulationsgestützte Planung energieeffizienter Produktionssysteme“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 110, Nr. 7–8, S. 403–406, Aug. 2015. DOI: 10.3139/104.111367

[113] S. Spreng, J. Kohl, P. Proshkovsky, und J. Franke, „Simulation Based Evaluation of Energy Saving Potentials in the Field of Electric Drives Manufacturing“, *Applied Mechanics and Materials*, Bd. 805, S. 67–72, Nov. 2015. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.805.67

[114] B. Krückhans und H. Meier, „Industrie 4.0 – Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion“, in *Simulation in Produktion und Logistik 2013: [Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung; 15. ASIM Fachtagung]; Paderborn, 09. - 11. Oktober 2013*, Paderborn, 2013, S. 31–40.

[115] C. Fanghänel, A. Schlegel, J. Stoldt, M. Putz, H. R. Lange, und T. Woldt, „Energieeffizienzsteigerung im Tagebaubetrieb durch simulationsgestützte Untersuchung konkurrierender Flexibilitäten“, in *Simulation in Production and Logistics 2015: [16. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Dortmund, 23. - 25. September 2015; Tagungband]*, Stuttgart, 2015, S. 545–554.

[116] B. Stahl, M. Taisch, A. Cannata, F. Müller, S. Thiede, C. Herrmann, A. Cataldo, und F. C. Antonio, „Combined Energy, Material and Building Simulation for Green Factory Planning“, in *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, A. Y. C. Nee, B. Song, und S.-K. Ong, Hrsg. Singapore: Springer Singapore, 2013, S. 493–498.

[117] A. Cataldo, R. Scattolini, und T. Tolio, „An energy consumption evaluation methodology for a manufacturing plant“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Bd. 11, S. 53–61, Nov. 2015. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.08.001

[118] F. Baumann, H. Wilson, S. Seidel, M. Franke, und U. Gromnitza, „OptPlanEnergie – Der Einsatz von Simulation und Optimierung zur Verringerung des Energiebedarfs bei der Produktion von Sicherheitsglas“, in *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, Kassel, 2017, S. 59–68.

[119] V. Wohlgemuth, B. Page, und W. Kreutzer, „Combining discrete event simulation and material flow analysis in a component-based approach to industrial environmental protection“, *Environmental Modelling & Software*, Bd. 21, Nr. 11, S. 1607–1617, Nov. 2006. DOI: 10.1016/j.envsoft.2006.05.015

[120] K. Gutenschwager, M. Rabe, M. U. Sari, und T. Fechteler, „A data model for carbon footprint simulation in consumer goods supply chains“, in *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, Savannah, 2013, S. 2677–2688. DOI: 10.1109/WSC.2013.6721639

[121] H. Golzarpoor, V. González, M. Shahbazpour, und M. O'Sullivan, „An input-output simulation model for assessing production and environmental waste in construction“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 143, S. 1094–1104, Feb. 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.010

[122] C. M. Luminea, J. Donovan, und D. Tormey, „Application of Systems Simulation for Predicting and Optimising Energy Requirements for HDF Production“, *Journal of Industrial Engineering*, Bd. 2015, 2015. DOI: 10.1155/2015/650925

[123] J. Kaffka, U. Clausen, Z. Miodrag, und M. Pitsch, „Allokation von Emissionswerten auf Behälterebene in multimodalen Umschlagsanlagen mittels Simulation“, in *Simulation in Production and Logistics 2015: [16. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Dortmund, 23. - 25. September 2015 ; Tagungband]*, Stuttgart, 2015, S. 565–574.

[124] B. Johansson, J. Stahre, J. Berlin, K. Östergren, B. Sundström, und A.-M. Tillman, „Discrete event simulation with life cycle assessment data at a juice manufacturing system“, in *Proceedings of the 5th FOODSIM Conference*, Dublin, Ireland, 2008.

[125] A. Neyrinck, A. Lechler, und A. Verl, „Automatic Variant Configuration and Generation of Simulation Models for Comparison of Plant and Machinery Variants“, *Procedia CIRP*, Bd. 29, S. 62–67, 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.069

[126] J. Hesselbach, C. Herrmann, R. Detzer, L. Martin, S. Thiede, und B. Lüdemann, „Energy Efficiency through optimized coordination of production and technical building services“, in *Applying life cylce knowledge to engineering solutions*, Sydney, Australia, 2008, S. 624–628.

[127] K. Boosothonsatit, S. Kara, und S. Ibbotson, „A Generic Simulation Model for Green Supplier Selection“, in *Leveraging Technology for a Sustainable World*, D. A. Dornfeld und B. S. Linke, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 587–592.

[128] J. Stoldt, A. Schlegel, und M. Putz, „Enhanced integration of energy-related considerations in discrete event simulation for manufacturing applications“, *Journal of Simulation*, Bd. 10, Nr. 2, S. 113–122, Mai 2016. DOI: 10.1057/jos.2015.24

[129] A. Sturma, V. Ritschl, S. Dennhardt, und T. Stamm, „Reviews“, in *Wissenschaftliches Arbeiten und Schreiben*, V. Ritschl, R. Weigl, und T. Stamm, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 207–221.

[130] VDI 3633, Blatt 4:1997-12, „Auswahl von Simulationswerkzeugen – Leistungsumfang und Unterscheidungskriterien“.

[131] K. Siebertz, D. van Bebber, und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

[132] S. Greinacher, E. Moser, J. Freier, J. Müller, und G. Lanza, „Simulation-based Methodology for the Application of Lean and Green Strategies Depending on External Change Driver Influence“, *Procedia CIRP*, Bd. 48, S. 242–247, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.240

[133] S. Mousavi, S. Thiede, W. Li, S. Kara, und C. Herrmann, „An integrated approach for improving energy efficiency of manufacturing process chains“, *International Journal of Sustainable Engineering*, S. 1–14, Jan. 2015. DOI: 10.1080/19397038.2014.1001470

[134] M. Putz, A. Schlegel, S. Lorenz, S. Schulz, und E. Franz, „Gekoppelte Simulation von Material- und Energieflüssen in der Automobilfertigung“, *Nachhaltigkeit in Fabrikplanung und Fabrikbetrieb : TBI '11, 14. Tage des Betriebs- und Systemingenieurs; Tagungsband Chemnitz 24. November 2011*, S. 135–144, 2011.

[135] M. Oates, Michael R., M. Despeisse, P. D. Ball, S. Evans, R. M. Greenough, S. B. Hope, A. Levers, P. Lunt, R. Quincey, C. Wheatley, und L. Shao, „Design of Sustainable Industrial Systems by Integrated Modelling of Factory Building and Manufacturing Processes“, in *Towards Implementing Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Istanbul, 2012, S. 742–747.

[136] Verein Deutscher Ingenieure, „Anwendung der Simulationstechnik zur Materialflußplanung | VDI 3633“, *Anwendung der Simulationstechnik zur Materialflußplanung | VDI 3633*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vdi.de/richtlinie/alt_vdi_3633-anwendung_der_simulationstechnik_zur_materialflussplanung/. [Zugegriffen: 03.01.2017].

[137] Verein Deutscher Ingenieure, „Simulationsmethoden im Materialfluß | VDI 2696“, *Simulationsmethoden im Materialfluß | VDI 2696*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vdi.de/richtlinie/alt_vdi_2696-simulationsmethoden_im_materialfluss/. [Zugegriffen: 03.01.2017].

[138] M. Rabe, S. Spieckermann, und S. Wenzel, *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[139] VDI 3633, Blatt 6:2001-10, „Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Abbildung des Personals in Simulationsmodellen“.

[140] VDI 3633, Blatt 7:2001-03, „Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Kostensimulation“.

[141] VDI 3633, Blatt 8:2007-04, „Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Maschinennahe Simulation“.

[142] VDI 3633, Blatt 11:2009-10, „Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Simulation und Visualisierung“.

[143] J. U. Fritz, *Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik*. Saarbrücken: LFT, Univ, 2007.

[144] J. Banks, J. S. Carson II, B. L. Nelson, und D. M. Nicol, *Discrete-event system simulation*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.

[145] A. Widok, L. Schiemann, A. Jahr, und V. Wohlgemuth, „Achieving Sustainability through Combination of LCA and DES integrated in an Simulation Software for Production Processes“, in *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, Berlin, 2012. DOI: 10.1109/WSC.2012.6465079

[146] B. Page und V. Wohlgemuth, „Advances in Environmental Informatics: Integration of Discrete Event Simulation Methodology with ecological Material Flow Analysis for Modelling eco-efficient Systems“, *Procedia Environmental Sciences*, Bd. 2, S. 696–705, 2010. DOI: 10.1016/j.proenv.2010.10.079

[147] J. Beier, S. Thiede, und C. Herrmann, „Increasing Energy Flexibility of Manufacturing Systems through Flexible Compressed Air Generation“, *Procedia CIRP*, Bd. 37, S. 18–23, 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.063

[148] J. Beier, B. Neef, S. Thiede, und C. Herrmann, „Integrating on-site Renewable Electricity Generation into a Manufacturing System with Intermittent Battery Storage from Electric Vehicles“, *Procedia CIRP*, Bd. 48, S. 483–488, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.057

[149] A. Töpfer, *Betriebswirtschaftslehre: anwendungs- und prozessorientierte Grundlagen*, 2., Überarbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.

[150] T. Müller-Prothmann und N. Dörr, *Innovationsmanagement: Strategien, Methoden und Werkzeuge für systematische Innovationsprozesse*, 3. Aufl. München: Hanser, 2014.

[151] S. H. Zyoud und D. Fuchs-Hanusch, „A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques“, *Expert Systems with Applications*, Bd. 78, S. 158–181, Juli 2017. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.02.016

[152] T. L. Saaty, *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*, 2. ed. Pittsburgh, PA: Univ. of Pittsburgh, 1990.

[153] T. L. Saaty, „How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process“, *Interfaces*, Bd. 24, Nr. 6, S. 19–43, Dez. 1994. DOI: 10.1287/inte.24.6.19

[154] T. L. Saaty, „Decision making with the analytic hierarchy process“, *International Journal of Services Sciences*, Bd. 1, Nr. 1, S. 83–98, 2008.

[155] T. L. Saaty, „A scaling method for priorities in hierarchical structures“, *Journal of Mathematical Psychology*, Bd. 15, Nr. 3, S. 234–281, Juni 1977. DOI: 10.1016/0022-2496(77)90033-5

[156] T. L. Saaty, *Multicriteria decision making: the analytic hierarchy process ; planning, priority setting, resource allocation*, Paperback, 2. ed. Pittsburgh, PA: RWS Publications, 1990.

[157] R. W. Saaty, „The analytic hierarchy process—what it is and how it is used“, *Mathematical Modelling*, Bd. 9, Nr. 3–5, S. 161–176, 1987. DOI: 10.1016/0270-0255(87)90473-8

[158] P. Knabner und W. Barth, *Lineare Algebra*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-32186-3

[159] M. Sajjad Zahir, „Incorporating the uncertainty of decision judgements in the analytic hierarchy process“, *European Journal of Operational Research*, Bd. 53, Nr. 2, S. 206–216, Juli 1991. DOI: 10.1016/0377-2217(91)90135-I

[160] T. L. Saaty und L. G. Vargas, *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*, Bd. 175. Boston, MA: Springer US, 2012. DOI: 10.1007/978-1-4614-3597-6

[161] T. L. Saaty, „How to make a decision: The analytic hierarchy process“, *European Journal of Operational Research*, Bd. 48, Nr. 1, S. 9–26, Sep. 1990. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90057-I

[162] S. Wenzel, M. Weiß, S. Collisi-Böhmer, H. Pitsch, und O. Rose, *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[163] J. Stoldt und M. Putz, „Procedure Model for Efficient Simulation Studies which Consider the Flows of Materials and Energy Simultaneously“, *Procedia CIRP*, Bd. 61, S. 122–127, Apr. 2017. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.195

[164] H.-P. Wiendahl, *Betriebsorganisation für Ingenieure*, 8. Aufl. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014.

[165] Volkswagen AG, „Broschüre Think Blue. Factory. - Nachhaltigkeit rauf. Umweltbelastung runter.“, 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://de.volkswagen.sk/content/medialib/vwd4/sk/pdf/brozura-tbf_de/_jcr_content/renditions/rendition.file/tb_factory_broschuere_dt.pdf. [Zugegriffen: 25.06.2017].

[166] DIN EN ISO 14001:2015-11, „Umwelgmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung“.

[167] S. Meyer, „Energieeffizienzsteigerung entlang der Supply Chain – Entscheidungsmodell zur wertschöpfungskettenorientierten Emissionsminderung in Transformationsländern“, Zittau, Internat. Hochschulinst., Diss., 2011., 2011.

[168] G. C. Mouzon, „Operational methods and models for minimization of energy consumption in a manufacturing environment“, Dissertation, Wichita State University, Wichita, 2008.

[169] M. Graßl, *Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion*. München: Utz, 2015.

[170] C. Liebl, R. Popp, und M. F. Zäh, „Energieflexibiltät von Produktionsanlagen–Energieflexibilitäts-Kennfelder zur Abschätzung der Energieflexibilitäts-Potentiale unterschiedlicher Anlagen“, *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 105, Nr. 3, S. 136–140, 2015.

[171] F. Keller, C. Schultz, S. Braunreuther, und G. Reinhart, „Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control“, *Procedia CIRP*, Bd. 57, S. 752–757, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.130

[172] E. Unterberger, J. Glasschröder, und G. Reinhart, „A Systems Engineering Based Method to Increase Energy Flexibility“, *Procedia CIRP*, Bd. 63, S. 254–259, 2017. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.357

[173] M. Roesch, M. Brugger, S. Braunreuther, und G. Reinhart, „Klassifizierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 112, Nr. 9, S. 567–571, Sep. 2017. DOI: 10.3139/104.111774

[174] G. Schuh, J.-P. Prote, M. Luckert, F. Sauermann, und K. Thomas, „Energieflexible Produktionsplanung und -steuerung“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 112, Nr. 12, S. 857–859, Dez. 2017. DOI: 10.3139/104.111848

[175] D. Moog, T. Weber, D. Flum, N. Strobel, P. Schraml, E. Abele, V. M. Scharmer, R. S.-H. Popp, J. Schulz, und M. F. Zäh, „Energieflexibilitätspotenziale in der Produktionsinfrastruktur“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 112, Nr. 12, S. 852–856, Dez. 2017. DOI: 10.3139/104.111835

[176] L. Zhou, J. Li, F. Li, Q. Meng, J. Li, und X. Xu, „Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 112, S. 3721–3734, Jan. 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.093

[177] K. Biel und C. H. Glock, „Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning“, *Computers & Industrial Engineering*, Bd. 101, S. 243–259, Nov. 2016. DOI: 10.1016/j.cie.2016.08.021

[178] R. Neugebauer und Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Hrsg., *Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ - InnoCaT: Forschung für die Energie- und Ressourceneffizienz im Automobilbau*. Stuttgart: Fraunhofer Verl, 2014.

[179] K. Kellens, „Energy and resource efficient manufacturing-Unit process analysis and optimisation“, Dissertation, Department of Mechanical Engineering, KU Leuven, Leuven, 2013.

[180] G. Winkelhofer, *Kreativ managen: ein Leitfaden für Unternehmer, Manager und Projektleiter; mit 26 Tabellen*. Berlin: Springer, 2006.

[181] A. Blumenschein und I. U. Ehlers, *Ideen managen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. DOI: 10.1007/978-3-658-07737-2

[182] K. Kerth, H. Asum, und V. Stich, *Die besten Strategietools in der Praxis: welche Werkzeuge brauche ich wann?; Wie wende ich sie an?; Wo liegen die Grenzen?*, 5., Aufl. München: Hanser, 2011.

[183] ASIM, „Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik“. Arbeitsgemeinschaft Simulation in der Gesellschaft für Informatik: Mitteilungen aus den Fachgruppen, Heft 58, 1997.

[184] M. Putz, U. Götze, J. Stoldt, und E. Franz, „Target systems and Decicion-Making to Increase Production Sustainability“, *Procedia CIRP*, Bd. 48, S. 34–39, Juni 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.034

[185] S. Lorenz, M. Hesse, und A. Fischer, „Simulation and optimization of robot driven production systems for peak-load reduction“, in *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, Berlin, 2012. DOI: 10.1109/WSC.2012.6465002

[186] F. Bleicher, F. Duer, I. Leobner, I. Kovacic, B. Heinzl, und W. Kastner, „Co-simulation environment for optimizing energy efficiency in production systems“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 63, Nr. 1, S. 441–444, 2014. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.122

[187] C. Herrmann und S. Thiede, „Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Bd. 1, Nr. 4, S. 221–229, Jan. 2009. DOI: 10.1016/j.cirpj.2009.06.005

[188] J. Andersson, A. Skoogh, und B. Johansson, „Environmental Activity Based Cost Using Discrete Event Simulation“, in *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, Phoenix, 2011, S. 891–902. DOI: 10.1109/WSC.2011.6147815

[189] S. Greinacher, E. Moser, H. Hermann, und G. Lanza, „Simulation Based Assessment of Lean and Green Strategies in Manufacturing Systems“, *Procedia CIRP*, Bd. 29, S. 86–91, 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.053

[190] A. Kruse, T. H.-J. Uhlemann, und R. Steinhilper, „Simulation-based Assessment and Optimization of the Energy Consumption in Multi Variant Production“, *Procedia CIRP*, Bd. 40, S. 396–401, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.075

[191] V. E. de Oliveria Gomes, J. de Oliveira Gomes, und K.-H. Grote, „Discrete Event Simulation Inserted into Kaizen Event to Assess Energy Efficiency“, in *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, A. Y. C. Nee, B. Song, und S.-K. Ong, Hrsg. Singapore: Springer Singapore, 2013, S. 499–503.

[192] J. Kohl, S. Spreng, und J. Franke, „Discrete Event Simulation of Individual Energy Consumption for Product-varieties“, *Procedia CIRP*, Bd. 17, S. 517–522, 2014. DOI: 10.1016/j.procir.2014.01.088

[193] A. M. Marzouk, H. A. ElMaraghy, und W. H. ElMaraghy, „Effect of Changing Operating Policies on Energy Use Consumption“, *Procedia CIRP*, Bd. 41, S. 301–306, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2015.10.002

[194] Forster, Theo, „Modellierung und Simulation von Getränkeabfüll- und Verpackungsanlagen unter Berücksichtigung von Energie- und Medienverbräuchen“, in *Simulation in Produktion und Logistik 2013: [Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung; 15. ASIM Fachtagung]; Paderborn, 09. - 11. Oktober 2013*, Paderborn, 2013, S. 197–206.

[195] T. Peter und S. Wenzel, „Simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz für Produktionssysteme in der Automobilindustrie“, in *Simulation in Production and Logistics 2015: [16. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Dortmund, 23. - 25. September 2015; Tagungband]*, Stuttgart, 2015, S. 535–544.

[196] M. Schönemann, D. Kurle, C. Herrmann, und S. Thiede, „Multi-product EVSM Simulation“, *Procedia CIRP*, Bd. 41, S. 334–339, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2015.10.012

[197] C. Schmidt, W. Li, S. Thiede, B. Kornfeld, S. Kara, und C. Herrmann, „Implementing Key Performance Indicators for Energy Efficiency in Manufacturing“, *Procedia CIRP*, Bd. 57, S. 758–763, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.131

[198] S. Brich, C. Hasenbalg, und Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Hrsg., *Kompakt-Lexikon Wirtschaftsinformatik: 1.500 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013.

[199] P. Eberspächer und A. Verl, „Zustandsbasierte Simulation des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen“, in *Handbuch ressourcenorientierte Produktion*, R. Neugebauer, Hrsg. München: Hanser, 2014, S. 253–262.

[200] J. Stoldt, C. Fanghänel, H. R. Lange, A. Schlegel, T. Woldt, und M. Putz, „Simulation Study on Flexibilities in the Material and Energy Flows of an Open-pit Mine“, *Simulation Notes Europe*, Bd. 27, Nr. 2, S. 87–96, Juni 2017. DOI: 10.11128/sne.27.tn.10374

[201] J. Stoldt, B. Prell, A. Schlegel, und M. Putz, „Modellierung von volatilen erneuerbaren Energieerzeugern und Energiespeichern in Siemens Plant Simulation“, in *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, Kassel, 2017, S. 49–58.

[202] T. Langer, A. Schlegel, J. Stoldt, und M. Putz, „A Model-based Approach to Energy-saving Manufacturing Control Strategies“, *Procedia CIRP*, Bd. 15, S. 123–128, Juni 2014. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.019

[203] M. Süße, J. Stoldt, A. Schlegel, und M. Putz, „Decision procedure for efficient data acquisition for distinct energy prognosis models“, *Applied Mechanics and Materials*, Bd. 871, S. 114–124, Okt. 2017. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.871.115

[204] M. Süße, J. Stoldt, A. Schlegel, und M. Putz, „Decision Support for Planning Techniques in Energy Efficiency Projects“, *Procedia CIRP*, Bd. 69, S. 306–311, 2018. DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.015

[205] C. Schmidt, W. Li, S. Thiede, S. Kara, und C. Herrmann, „A methodology for customized prediction of energy consumption in manufacturing industries“, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Bd. 2, Nr. 2, S. 163–172, Apr. 2015. DOI: 10.1007/s40684-015-0021-z

[206] A. Gontarz, J. Plehn, A. Sproedt, L. Weiss, und K. Wegener, „Resource consumption measurement in manufacturing environments“, in *Towards Implementing Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Istanbul, 2012, S. 557–563. DOI: 10.3929/ethz-a-007577770

[207] G. Posselt, *Towards Energy Transparent Factories*. Cham: Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-20869-5

[208] M. Frische, D. Geckler, B. Glasbrenner, und S. Lorenz, „Teilprojekt 1.2.1 Konzepte der Digitalen Fabrik für die gewerkeübergreifende Optimierung des Energiebedarfs“, in *Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ - InnoCaT: Forschung für die Energie- und Ressourceneffizienz im Automobilbau*, R. Neugebauer, Hrsg. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014, S. 22–25.

[209] L. März, W. Krug, O. Rose, und G. Weigert, Hrsg., *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

[210] C. Herrmann, S. Thiede, S. Kara, und J. Hesselbach, „Energy oriented simulation of manufacturing systems – Concept and application“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 60, Nr. 1, S. 45–48, 2011. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.127

[211] S. Schulz und A. Jungnickel, „A General Approach to Simulating Energy Flow in Production Plants via Plant Simulation“, in *Towards Implementing Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Istanbul, 2012, S. 724–729.

[212] I. Barletta, J. Andersson, B. Johansson, G. May, und M. Taisch, „Assessing a proposal for an energy-based Overall Equipment Effectiveness indicator through Discrete Event Simulation“, in *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*, Savannah, 2014, S. 1096–1107. DOI: 10.1109/WSC.2014.7019968

[213] T. Peter und S. Wenzel, „Coupled Simulation of Energy and Material Flow using Plant Simulation and MATLAB Simulink“, *Simulation Notes Europe*, Bd. 27, Nr. 2, S. 105–113, 2017. DOI: 10.11128/sne.27.tn.10376

[214] A. Schlegel, J. Stoldt, und M. Putz, „Erweiterte Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation“, in *Simulation in Produktion und Logistik 2013: [Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung; 15. ASIM Fachtagung]; Paderborn, 09. - 11. Oktober 2013*, Paderborn, 2013, S. 187–196.

[215] J. Stoldt, A. Schlegel, E. Franz, T. Langer, und M. Putz, „Generic Energy-Enhancement Module for Consumption Analysis of Manufacturing Processes in Discrete Event Simulation“, in *Re-engineering Manufacturing for Sustainability: Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Singapore 17–19 April, 2013*, Singapore, 2013, S. 165–170. DOI: 10.1007/978-981-4451-48-2_27

[216] M. Putz, A. Schlegel, E. Franz, T. Langer, und J. Stoldt, „Energy-sensitive control strategies for discrete part manufacturing“, in *Towards Implementing Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Istanbul, 2012, S. 482–487.

[217] M. Putz, A. Schlegel, J. Stoldt, E. Franz, T. Langer, und M. Tisztl, „A framework for energy-sensitive production control in MES“, in *Proceedings volume / 14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises*, Budapest, 2012, S. 354–366.

[218] M. Putz, A. Schlegel, J. Stoldt, E. Franz, und T. Langer, „Methodik und Framework zur energiesensitiven Fertigungssteuerung in der Variantenfließfertigung“, in *Tagungsband „Intelligent vernetzte Arbeits-und Fabriksysteme–VPP2012“. Chemnitz: TU Chemnitz IBF*, Chemnitz, 2012, S. 131–140.

[219] J. Stoldt, D. Neumann, T. Langer, A. Schlegel, und M. Putz, „Increasing energy effiency through simulation-driven process evaluation“, in *11. Global Conference on Sustainable Manufacturing: Innovative Solutions; Berlin, Germany, 23rd -25th September 2013; GCSM Proceedings*, Berlin, 2013, S. 523–528.

[220] M. Putz, U. Götze, J. Stoldt, und E. Franz, „Fostering energy efficiency by way of a techno-economic framework“, in *11. Global Conference on Sustainable Manufacturing: Innovative Solutions; Berlin, Germany, 23rd -25th September 2013; GCSM Proceedings*, Berlin, 2013, S. 371–376.

[221] J. Stoldt, M. Putz, U. Götze, und S. Krönert, „Wirtschaftliche Bewertung von Strategien der energiesensitiven Fertigungssteuerung – Methodik und beispielhafte Anwendung“, in *Trends und Strategien für die Produktion von morgen : VPP2013 - Vernetzt planen und produzieren; Tagungsband, Chemnitz, 24. Oktober 2013*, Chemnitz, 2013, S. 169–178.

[222] M. Putz, A. Schlegel, J. Stoldt, E. Franz, und T. Langer, „Energy-sensitive control strategies for decoupled production systems“, *International Journal of Sustainable Manufacturing*, Bd. 3, Nr. 3, S. 250–268, Okt. 2014. DOI: 10.1504/IJSM.2014.065661

[223] T. Langer, A. Schließmann, und J. Stoldt, „Teilprojekt 1.3.1 Energiemanagementportal und Komponenten eines energiesensitiven Fertigungsleitsystems“, in *Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ - InnoCaT: Forschung für die Energie- und Ressourceneffizienz im Automobilbau*, R. Neugebauer, Hrsg. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014, S. 28–33.

[224] J. Stoldt, M. Münnich, E. Franz, A. Schlegel, und M. Putz, „Simulative Untersuchung energie- und ressourceneffizienter Betriebsstrategien in der E^3-Forschungsfabrik“, in *Tagungsband ASIM 2016 - 23. Symposium Simulationstechnik (Dresden)*, Wien, 2016, Bd. 52, S. 45–52.

[225] Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, H. Schneider, A. Schmieder, und K. Schubert, „Broschüre E^3-Forschungsfabrik Ressourceneffiziente Produktion“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.e3-fabrik.de/content/dam/iwu/de/documents/Broschueren/IWU-KB-E3-Forschungsfabrik.pdf. [Zugegriffen: 16.08.2017].

[226] J. Stoldt, E. Franz, A. Schlegel, und M. Putz, „Resource Networks: Decentralised Factory Operation Utilising Renewable Energy Sources“, *Procedia CIRP*, Bd. 26, S. 486–491, März 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.154

[227] REEMAIN Project, „Deliverable D4.1: Efficiency analysis methodology“, 30.04.2015. [Online]. Verfügbar unter: http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-445625.html. [Zugegriffen: 16.08.2017].

[228] REEMAIN Project, „Deliverable D4.2: Requirements for resource networks compared to the state of the art“, 03.11.2015. [Online]. Verfügbar unter: http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-445626.html. [Zugegriffen: 16.08.2017].

[229] M. Putz, J. Stoldt, C. Fanghänel, A. Bierer, und A. Schlegel, „Making Sustainability Paradigms a Part of PPC“, *Procedia CIRP*, Bd. 29, S. 209–214, Mai 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.167

[230] H. R. Lange, M. Putz, A. Schlegel, und C. Fanghänel, „Energiesystemeffizienz: Bewirtschaftung von konkurrierenden Flexibilitäten im Produktionsprozess Tagebau“, in *4. Kongress Ressourceneffiziente Produktion 2015. Tagungsband: E³-Produktion - Lösungen für die Produktionstechnik der Zukunft*, Leipzig, 2015, S. 135–144.

[231] C. Fanghänel, H. R. Lange, J. Stoldt, A. Schlegel, T. Woldt, und M. Putz, „Using material flow simulation for improving energy flexibility in combined coal mining and power plant operations“, in *Proceedings of the International Conference on Competitive Manufacturing (COMA'16): Resource Efficiency for Global Competitiveness*, Stellenbosch, 2016, S. 399–404.

[232] H. R. Lange, U. Köhler, und C. Fanghänel, „Identifikation und Handling von marktgetriebenen energetischen Lastreserven am Beispiel eines Bergbaubetriebs“, in *11. Fachtagung Schüttgut - fördern und lagern 2016 : Optimierung der Anlageneffizienz und -effektivität - die ständige Herausforderung*, Fulda, 2016, S. 105–113.

[233] H. R. Lange und J. Stoldt, „Flexibilization Study of Material and Energy Flows in Mining“, gehalten auf der 3rd Plant Simulation Worldwide User Conference, Stuttgart, 21.06.2016.

[234] E. Fuss und U. Beißert, „Beitrag zur Energie- und Materialflusssimulation in Produktion und Logistik“, in *Tagungsband 19. Magdeburger Logistiktage »Sichere und nachhaltige Logistik«*, Magdeburg, 2014, S. 39–48.

[235] C. Herrmann, S. Thiede, und T. Heinemann, „A Holistic Framework for Increasing Energy and Resource Efficiency in Manufacturing“, in *Advances in Sustainable Manufacturing*, G. Seliger, M. M. K. Khraisheh, und I. S. Jawahir, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 267–273.

[236] S. Thiede, C. Herrmann, und S. Kara, „State of Research and an innovative Approach for simulating Energy Flows of Manufacturing Systems“, in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, J. Hesselbach und C. Herrmann, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 335–340.

[237] C. Herrmann, S. Thiede, J. Stehr, und L. Bergmann, „An environmental perspective on Lean Production“, in *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura, M. Mitsuishi, K. Ueda, und F. Kimura, Hrsg. London: Springer London, 2008, S. 83–88.

[238] L. Martin, J. Hesselbach, S. Thiede, C. Herrmann, B. Lüdemann, und R. Detzer, „Energieeffizienz durch optimierte Abstimmung zwischen Produktion und technischer Gebäudeausrüstung“, in *Advances in simulation for production and logistics applications: 13. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik*, Stuttgart, 2008, S. 121–130.

[239] B. Johansson, A. Skoogh, M. Mani, und S. Leong, „Discrete event simulation to generate requirements specification for sustainable manufacturing systems design“, in *Proceedings of PerMIS'09*, Gaithersburg, 2009, S. 38. DOI: 10.1145/1865909.1865918

[240] D. Kulus, D. Wolff, S. Ungerland, und S. Dreher, „Energieverbrauchssimulation als Werkzeug der Digitalen Fabrik: Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen am Beispiel der Zylinderkopffertigung – Berichte aus der INPRO-Innovationsakademie“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 106, Nr. 9, S. 585–589, Sep. 2011. DOI: 10.3139/104.110623

[241] M. Rudolph, A. Mohsen, J. Reinschke, N. Halmuschi, und J. Hassel, „Simulation von Maschinen und Anlagen zur Verbesserung der Energieeffizienz“, in *Tagungsband „Intelligent vernetzte Arbeits-und Fabriksysteme–VPP2012“. Chemnitz: TU Chemnitz IBF*, Chemnitz, 2012, S. 191–201.

[242] V. Wohlgemuth, L. Bruns, und B. Page, „Simulation als Ansatz zur ökologischen und ökonomischen Planungsunterstützung im Kontext betrieblicher Umweltinformationssysteme (BUIS)“, in *Sustainability in the Information Society. 15. Internationales Symposium „Informatik für den Umweltschutz“ der Gesellschaft für Informatik (GI)*, Zürich, 2001, S. 999–1008.

[243] D. Wolff, D. Kulus, und J. Nagel, „Simulationsgestützte Bewertung von Energiesparstrategien: Berichte aus der inpro-Innovationsakademie“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 108, Nr. 3, S. 103–108, März 2013. DOI: 10.3139/104.110899

[244] A. Fysikopoulos, D. Anagnostakis, K. Salonitis, und G. Chryssolouris, „An Empirical Study of the Energy Consumption in Automotive Assembly“, *Procedia CIRP*, Bd. 3, S. 477–482, 2012. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.082

[245] Y. Seow und S. Rahimifard, „A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Bd. 4, Nr. 3, S. 258–264, Jan. 2011. DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.03.007

[246] H. W. Jeon und V. V. Prabhu, „Modeling Green Fabs – A Queuing Theory Approach for Evaluating Energy Performance“, in *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services. Part I*, Bd. 397, C. Emmanouilidis, M. Taisch, und D. Kiritsis, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 41–48.

[247] V. V. Prabhu, H. W. Jeon, und M. Taisch, „Simulation Modelling of Energy Dynamics in Discrete Manufacturing Systems“, in *Service Orientation in Holonic and Multi Agent Manufacturing and Robotics*, Bd. 472, T. Borangiu, A. Thomas, und D. Trentesaux, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 293–311.

[248] M. Taisch, B. Stahl, F. Vaccari, und A. Cataldo, „A Production-State Based Approach for Energy Flow Simulation in Manufacturing Systems“, in *Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains. Part I*, Bd. 414, V. Prabhu, M. Taisch, und D. Kiritsis, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 227–234.

[249] H. Hibino, T. Sakuma, und M. Yamaguchi, „Simulation for Sustainable Manufacturing System Considering Productivity and Energy Consumption“, in *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World. Part II*, Bd. 439, B. Grabot, B. Vallespir, S. Gomes, A. Bouras, und D. Kiritsis, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, S. 310–318.

[250] N. Weinert und C. Mose, „Investigation of Advanced Energy Saving Stand by Strategies for Production Systems“, *Procedia CIRP*, Bd. 15, S. 90–95, 2014. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.009

[251] S. Alvandi, G. Bienert, W. Li, und S. Kara, „Hierarchical Modelling of Complex Material and Energy Flow in Manufacturing Systems“, *Procedia CIRP*, Bd. 29, S. 92–97, 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.023

[252] N. Frigerio und A. Matta, „Analysis of an Energy Oriented Switching Control of Production Lines“, *Procedia CIRP*, Bd. 29, S. 34–39, 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.177

[253] H. Su, N. Frigerio, und A. Matta, „Energy Saving Opportunities and Value of Information: A Trade-off in a Production Line“, *Procedia CIRP*, Bd. 48, S. 301–306, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.147

[254] G. Schuh, U. Brandenburg, und Y. Liu, „Evaluation of Demand Response Actions in Production Logistics“, *Procedia CIRP*, Bd. 29, S. 173–178, 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.161

[255] C. Schultz, P. Sellmaier, und G. Reinhart, „An Approach for Energy-oriented Production Control Using Energy Flexibility“, *Procedia CIRP*, Bd. 29, S. 197–202, 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.038

[256] M. Selmair, F. Herrmann, T. Claus, und M. Teich, „Potentiale in der Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs einer Werkstattfertigung in der Maschinenbelegungsplanung“, in *Simulation in Production and Logistics 2015: [16. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Dortmund, 23. - 25. September 2015 ; Tagungband]*, Stuttgart, 2015, S. 575–584.

[257] G. Schuh, U. Brandenburg, und M. Schulte, „Simulationsgestützte Analyse des Einflusses der Losgrößenplanung auf die Energieeffizienz“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 109, Nr. 12, S. 895–899, Dez. 2014. DOI: 10.3139/104.111246

[258] E. Sheehan, T. Kuhlmann, und A. Sauer, „Simulating the Effect of Production Lot Sizes on Material and Energy Efficiency“, *Procedia CIRP*, Bd. 48, S. 472–478, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.109

[259] F. Schaarschmidt, R. Schulze, S. Horbach, J. Ackermann, E. Müller, H.-J. Walther, und Winkler, „Material & Energieflusssimulation in der Photovoltaik“, in *Tagungsband „Intelligent vernetzte Arbeits-und Fabriksysteme–VPP2012“. Chemnitz: TU Chemnitz IBF*, Chemnitz, 2012, S. 259–258.

[260] E. Lindskog, L. Lundh, J. Berglund, Y. Tina Lee, A. Skoogh, und B. Johansson, „A method for determining the environmental footprint of industrial products using simulation“, in *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, Phoenix, 2011, S. 2131–2142. DOI: 10.1109/WSC.2011.6147926

[261] S. Jain, E. Lindskog, und B. Johansson, „Supply chain carbon footprint tradeoffs using simulation“, in *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, Berlin, 2012. DOI: 10.1109/WSC.2012.6465242

[262] A. Oumer, S. M. Atnaw, J. K. Cheng, und L. Singh, „Modeling Energy Efficiency As A Green Logistics Component In Vehicle Assembly Line“, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Bd. 160, S. 012068, Nov. 2016. DOI: 10.1088/1757-899X/160/1/012068

[263] N. Grundmeier, N. Ihle, und Z. Hahn, „Ein Simulationsmodell zur Abbildung und Prognose der elektrischen Leistungsaufnahme in Seehafen-Containerterminals“, in *Simulation in Production and Logistics 2015: [16. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Dortmund, 23. - 25. September 2015 ; Tagungband]*, Stuttgart, 2015, S. 555–564.

[264] M. Schönemann, C. Schmidt, C. Herrmann, und S. Thiede, „Multi-level Modeling and Simulation of Manufacturing Systems for Lightweight Automotive Components“, *Procedia CIRP*, Bd. 41, S. 1049–1054, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.063

[265] Siemens Industry Software, „Premium Car Maker: Reducing lifecycle energy consumption of car engines with Plant Simulation“. 2014.

[266] M. Rabe, M. U. Sari, T. Fechteler, und L. F. Ruini, „Discrete event simulation as a strategic decision instrument for a CO2 – and cost-efficient distribution chain applied in the FMCG sector“, *International Journal of Advanced Logistics*, Bd. 4, Nr. 1, S. 47–53, Jan. 2015. DOI: 10.1080/2287108X.2015.1014306

[267] P. Molenda, T. Drews, O. Oechsle, S. Butzer, und R. Steinhilper, „A Simulation-based Framework for the Economic evaluation of Flexible Manufacturing Systems“, *Procedia CIRP*, Bd. 63, S. 201–206, 2017. DOI: 10.1016/j.procir.2017.02.039

[268] S. Weckmann, H. Jin, und A. Sauer, „Demand Side Management: Bewertung von Potenzialen auf Basis des Energiewertstroms“, *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 106, Nr. 6, S. 462–468, 2016.

[269] S. Weckmann, T. Kuhlmann, und A. Sauer, „Decentral Energy Control in a Flexible Production to Balance Energy Supply and Demand“, *Procedia CIRP*, Bd. 61, S. 428–433, 2017. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.212

[270] T. Pawletta, A. Schmidt, und P. Junglas, „A Multimodeling Approach for the Simulation of Energy Consumption in Manufacturing“, *Simulation Notes Europe*, Bd. 27, Nr. 2, S. 115–124, 2017. DOI: 10.11128/sne.27.tn.10377

[271] M. Seewaldt, J. Nagel, D. Geckler, und U. Bracht, „Energy-Oriented Material Flow Simulation as a Contribution to Automotive Industry 4.0“, *Simulation Notes Europe*, Bd. 27, Nr. 2, S. 61–66, 2017. DOI: 10.11128/sne.27.tn.10371

[272] M. Seewaldt und U. Bracht, „Energieorientierte Betrachtung von Engpässen in Fertigungssystemen mit der Materialflusssimulation“, in *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, Kassel, 2017, S. 29–38.

[273] M. Selmair, M. Hanfeld, T. Claus, und F. Herrmann, „Exploring Opportunities: Optimizing Production Planning by Factoring in Energy Procurement and Trading Options“, *Simulation Notes Europe*, Bd. 27, Nr. 2, S. 97–103, 2017. DOI: 10.11128/sne.27.tn.10375

[274] D. Rippel, M. A. Redecker, M. Lütjen, A. Decker, M. Freitag, und K.-D. Thoben, „Simulating the Energy Consumption of Machines in Compound Feed Manufacturing for Investment Decisions“, in *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, Kassel, 2017, S. 79–88.

[275] A. Oumer, S. M. Atnaw, J. K. Cheng, und L. Singh, „Improving Energy Efficiency for the Vehicle Assembly Industry: A Discrete Event Simulation Approach“, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Bd. 160, S. 012069, Nov. 2016. DOI: 10.1088/1757-899X/160/1/012069

[276] A. J. Oumer, J. K. Cheng, und R. M. Tahar, „Green manufacturing and logistics in automotive industry: A simulation model“, in *Transforming Big Data into Knowledge: Proceedings of CITA'15*, Kuching, 2015. DOI: 10.1109/CITA.2015.7349839

[277] K. Katchasuwanmanee, K. Cheng, und R. Bateman, „Simulation based energy-resource efficient manufacturing integrated with in-process virtual management“, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Bd. 29, Nr. 6, S. 1083–1089, Nov. 2016. DOI: 10.3901/CJME.2016.0714.080

[278] T. Sobottka, F. Kamhuber, und W. Sihn, „Increasing Energy Efficiency in Production Environments Through an Optimized, Hybrid Simulation-based Planning of Production and Its Periphery“, *Procedia CIRP*, Bd. 61, S. 440–445, 2017. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.151

[279] P. Raich, B. Heinzl, F. Preyser, und W. Kastner, „Modeling techniques for integrated simulation of industrial systems based on hybrid PDEVS“, in *Proceedings of the 2016 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, Wien, 2016. DOI: 10.1109/MSCPES.2016.7480221

[280] W. Li, S. Alvandi, S. Kara, S. Thiede, und C. Herrmann, „Sustainability Cockpit: An integrated tool for continuous assessment and improvement of sustainability in manufacturing“, *CIRP Annals*, Bd. 65, Nr. 1, S. 5–8, 2016. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.029

[281] W. Schlüter, M. Henninger, A. Buswell, und J. Schmidt, „Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell“, in *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, Kassel, 2017, S. 19–28.

[282] Y. Sudo und M. Matsuda, „Multi-agent based simulation of electric power consumption based on the production scenario for printed circuit assembly“, 2016, S. 145–152. DOI: 10.1109/ISFA.2016.7790151

[283] N. Mardan und R. Klahr, „Combining optimisation and simulation in an energy systems analysis of a Swedish iron foundry“, *Energy*, Bd. 44, Nr. 1, S. 410–419, Aug. 2012. DOI: 10.1016/j.energy.2012.06.014

[284] Y. He, B. Liu, X. Zhang, H. Gao, und X. Liu, „A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 23, Nr. 1, S. 167–174, März 2012. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.10.033

[285] M. E. Kuhl und X. Zhou, „Sustainability toolkit for simulation-based logistics decisions“, in *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, Austin, 2009, S. 1466–1473. DOI: 10.1109/WSC.2009.5429294

[286] M. Naderi, E. Ares, G. Peláez, D. Prieto, A. Fernández, und L. Pinto Ferreira, „The sustainable evaluation of manufacturing systems based on simulation using an economic index function: A case study“, *Procedia Manufacturing*, Bd. 13, S. 1043–1050, 2017. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.128

[287] M. Zhou, Y. Pan, Z. Chen, und W. Yang, „Optimizing green production strategies: An integrated approach“, *Computers & Industrial Engineering*, Bd. 65, Nr. 3, S. 517–528, Juli 2013. DOI: 10.1016/j.cie.2013.02.020

[288] M. Zhou, Y. Pan, und Z. Chen, „Green production — Strategies and dynamics: A simulation based study“, in *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, Savannah, 2013, S. 2097–2108. DOI: 10.1109/WSC.2013.6721587

[289] C. Schultz, S. Braun, S. Braunreuther, und G. Reinhart, „Integration of Load Management into an Energy-oriented Production Control“, *Procedia Manufacturing*, Bd. 8, S. 144–151, 2017. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.017

[290] J. Berglund, J. Michaloski, S. Leong, G. Shao, F. Riddick, J. Arinez, und S. Biller, „Energy efficiency analysis for a casting production system“, in *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, Phoenix, 2011, S. 1060–1071. DOI: 10.1109/WSC.2011.6147829

[291] P. Joschko, B. Page, und V. Wohlgemuth, „Combination of job oriented simulation with ecological material flow analysis as integrated analysis tool for business production processes“, in *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, Austin, 2009, S. 1456–1465. DOI: 10.1109/WSC.2009.5429297

[292] H. Ichimura und S. Takakuwa, „Decision making on manufacturing system from the perspective of material flow cost accounting“, in *Proceedings of the 2013 Winter Simulations Conference*, Savannah, 2013, S. 1973–1983. DOI: 10.1109/WSC.2013.6721576

[293] X. Tang und S. Takakuwa, „MFCA-based simulation analysis for environment-oriented SCM optimization conducted by SMEs“, in *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, Berlin, 2012. DOI: 10.1109/WSC.2012.6465038

[294] J. Circullies, C. Schwede, und M. Toth, „Intra-Simulative Ecological Assessment of Logistics Networks. Benefits, Concepts, and Tool Enhancement.“, in *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, Berlin, 2012. DOI: 10.1109/WSC.2012.6465216

[295] R. Takasaki, H. Hibino, K. Kaifuku, und K. Nishitani, „Simulation Method for Evaluation of Productivity and Energy Consumption Concerning Production Line for Injection Molding Machines“, in *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*, Bd. 514, H. Lödding, R. Riedel, K.-D. Thoben, G. von Cieminski, und D. Kiritsis, Hrsg. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 496–504. DOI: 10.1007/978-3-319-66926-7_57

[296] T. Peter, S. Wenzel, L. Reiche, und M. Fehlbier, „Coupled simulation of energy and material flow — A use case in an aluminum foundry“, in *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference*, Las Vegas, 2017, S. 3792–3803. DOI: 10.1109/WSC.2017.8248091

[297] S. Jain, E. Lindskog, J. Andersson, und B. Johansson, „A hierarchical approach for evaluating energy trade-offs in supply chains“, *International Journal of Production Economics*, Bd. 146, Nr. 2, S. 411–422, Dez. 2013. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.03.015

[298] T. Donhauser, J. Ehrhardt, T. Rackow, J. Franke, und P. Schuderer, „Simulation-Based Optimization of the Energy Consumption in the Hardening Process for Calcium Silicate Masonry Units“, *Applied Mechanics and Materials*, Bd. 805, S. 249–256, Nov. 2015. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.805.249

[299] K.-C. Chu, K. Kaifuku, und K. Saitou, „Optimal Integration of Alternative Energy Sources in Production Systems With Customer Demand Forecast“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Bd. 13, Nr. 1, S. 206–214, Jan. 2016. DOI: 10.1109/TASE.2015.2482918

[300] C. Keramydas, I. Mallidis, R. Dekker, D. Vlachos, und E. Iakovou, „Cost and environmental trade-offs in supply chain network design and planning: the merit of a simulation-based approach“, *Journal of Simulation*, Bd. 11, Nr. 1, S. 20–29, Feb. 2017. DOI: 10.1057/s41273-016-0031-z

[301] R. Neugebauer, M. Putz, und F. Klocke, Hrsg., *E3-Produktion. Innovationen für die Produktion der Zukunft*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2017.

[302] F. Keller und G. Reinhart, „Energy Supply Orientation in Production Planning Systems“, *Procedia CIRP*, Bd. 40, S. 244–249, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.113

[303] S. Ibbotson, S. Kara, C. Herrmann, und S. Thiede, „Impact of Process Selection on Material and Energy Flow“, in *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, A. Y. C. Nee, B. Song, und S.-K. Ong, Hrsg. Singapore: Springer Singapore, 2013, S. 159–163.

[304] M. Krones und E. Müller, „An Approach for Reducing Energy Consumption in Factories by Providing Suitable Energy Efficiency Measures“, *Procedia CIRP*, Bd. 17, S. 505–510, 2014. DOI: 10.1016/j.procir.2014.01.045

[305] E. Teich, C. Brodhun, und T. Claus, „Einsatz der Szenariotechnik in der Produktionsplanung“, in *Produktionsplanung und –steuerung*, T. Claus, F. Herrmann, und M. Manitz, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 61–88. DOI: 10.1007/978-3-662-43542-7_5

[306] R. Mukerjee und C.-F. Wu, *A modern theory of factorial design*. New York: Springer, 2006.

[307] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, und T. Meyarivan, „A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II“, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Bd. 6, Nr. 2, S. 182–197, Apr. 2002. DOI: 10.1109/4235.996017

[308] A. Verl, E. Abele, U. Heisel, A. Dietmair, P. Eberspächer, R. Rahäuser, S. Schrems, und S. Braun, „Modular Modeling of Energy Consumption for Monitoring and Control“, in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, J. Hesselbach und C. Herrmann, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 341–346.

[309] P. Acél, „Systems-Engineering und Simulation: Leitfaden zum Vorgehen“, 2007. [Online]. Verfügbar unter: https://www.acel.ch/PDF/PUB_02_Systems-Engineering.pdf. [Zugegriffen: 13.01.2016].

[310] M. Todtermuschke, M. Findeisen, und A. Bauer, „Methodology for Creation a Reference Trajectory for Energetic Comparability of Industrial Robots in Body Shop“, *Procedia CIRP*, Bd. 23, S. 122–126, 2014. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.085

[311] M. Findeisen, M. Todtermuschke, R. Schaffrath, und M. Putz, „A method for energetic comparison of 6-axis industrial robots and its further scope for resource-efficient plant design“, *Procedia Manufacturing*, Bd. 21, S. 251–258, 2018. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.118

[312] M. Bornschlegl, M. Bregulla, und J. Franke, „Methods-Energy Measurement – An approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 135, S. 644–656, Nov. 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.059

[313] M. Krones, H. Hopf, J. Strauch, und E. Müller, „Analysen zur Energieeffizienz in ausgewählten Systemen der Intralogistik zur Unterstützung des Planungsprozesses“, in *Tagungsband der 17. Magdeburger Logistiktage „Sichere und Nachhaltige Logistik“, Magdeburg*, Stuttgart, 2012, S. 73–81.

Anhänge

Anhang A: Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse.....259
Anhang B: Bewertungsschema für Vorgehensmodelle.....275
Anhang C: Beschreibung der Planungsfälle.....279
Anhang D: Ergänzungen zum Vorgehensmodell.....283
Anhang D.1: Checklisten zur Dokumentation von Ergebnissen und Entscheidungen.....283
Anhang D.2: Untersetzung der abstrahierten Maßnahmen.....297
Anhang D.3: Charakterisierung von Experimentplanungsmethoden.....305
Anhang D.4: Bewertungsvorschläge zum Lösungsmodul Energiemodell....308
Anhang D.5: Erläuterungen zum Lösungsmodul Werkzeug/-architektur....315
Anhang D.6: Charakterisierung von Energiedatenakquisemethoden.....323
Anhang E: Ausführliche Ergebnisse der Erprobung.....329
Anhang E.1: Checklisten zur Fallstudie 1.....329
Anhang E.2: Checklisten zur Fallstudie 2.....345
Anhang E.3: Checklisten zur Fallstudie 3.....360

Anhang A: Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse

Die systematische Literaturanalyse erfolgte nach dem in Abschnitt 2.3.3 dargelegten Vorgehen. Die Ergebnisse sind im Weiteren aufgeschlüsselt, wobei in Tabelle A.1 zunächst die verwendeten Abkürzungen sowie die Anteile je Ausprägung aufgeführt sind. Tabelle A.2 zeigt die identifizierten Einzeluntersuchungen sowie deren Zuordnung je Kategorie. Die Eintragungen sind gemäß der Analysereihenfolge der einzelnen Arbeiten geordnet.

Tabelle A.1: Abkürzungen zur Übersicht der Literaturanalyse und Anteil je Ausprägung

Kategorie	Ausprägung	Abkürzung	Anteil
Simulationsziel	Keine Angaben	*[leer]*	0,00%
	Optimierung	Opt	10,66%
	Quantifizierung	Quant	82,74%
	Verifikation bzw. Validierung	V/V	6,60%
Experimentplanung	Keine Angaben	*[leer]*	11,68%
	Optimierung	Opt	11,17%
	Sensitivitätsanalyse	Sens	5,58%
	Shainin-/Taguchi-Methode	Shai	0,00%
	Statistische Versuchsplanung (Design of Experiment)	DoE	1,52%
	Szenarioanalyse	Szen	63,45%
	Teil-/Faktorielle Methode	Fakt	6,60%
Werkzeug	Keine Angaben	*[leer]*	4,57%
	Andere Simulationswerkzeuge	And	6,09%
	Materialflusssimulation	DES	72,59%
	Kombinierte Simulation	Komb	16,75%

Tabelle A.1: (Fortsetzung)

Kategorie	Ausprägung	Abkürzung	Anteil
Planungs-aufgabe	Keine Angaben	*[leer]*	3,55%
	PPS: Kapazitätsplanung	PPS: Kapa	5,58%
	PPS: Losgrößenplanung	PPS: Los	8,12%
	PPS: Reihenfolgeplanung/Terminierung	PPS: Reih	8,63%
	PPS: Steuerungsstrategie	PPS: Strg	21,32%
	Supply Chain Management	SCM	4,57%
	SysPla: Betriebsoptimierung	SysPla: Betr	13,71%
	SysPla: Infrastrukturplanung	SysPla: Infra	5,58%
	SysPla: Umweltwirkung/TCO	SysPla: Öko/TCO	24,87%
	SysPla: Prozess-/Systemgestaltung	SysPla: Gest	4,06%
Energiemo-dell	Keine Angaben	*[leer]*	3,55%
	Äquivalent	Äquiv	19,80%
	Betriebszustand-basiert Durchschnitt	BZ Mittel	50,25%
	Betriebszustand-basiert linearisierte Kurve	BZ Kurve	8,12%
	Betriebszustand-basiert Ersatzmodell	BZ Ersatz	8,12%
	Kontinuierliches/physikalisches Modell	Phys Mod	9,14%
	Rein Betriebszustände	Rein BZ	1,02%
Betrachtete Größen	Keine Angaben	*[leer]*	0,00%
	CO_2 oder anderes Äquivalent für Umwelt-wirkungen	CO_2	8,63%
	Elektrizität bzw. nur ein Energieträger	Elektriz	47,72%
	Gesamtenergie bzw. Energieäquivalent	Gesamt	4,57%
	Kosten	Kosten	3,55%
	Mehrere Energieträger parallel	Mehrere	35,53%

Tabelle A.2: Ergebnisübersicht der systematischen Literaturanalyse

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
1	[127]	SCM mit LCA Aspekten	Opt	Opt	And	SCM	Äquiv	CO_2
2	[191]	Szenario Vergleich nach Layout Umplanung	V/V	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Elektriz
3	[111]	Verringerung von Maschinenkosten (Stundensätze) durch Effizienzsteigerungen	Opt	Opt	DES	SysPla: Betr	Äquiv	Kosten
4	[194]	Modellbaukasten für Befüllungsanlagen; Infrastrukturauslegung; Anwendungsfall 1	Quant	Szen	DES	SysPla: Infra	BZ Kurve	Mehrere
5	[194]	Modellbaukasten für Befüllungsanlagen; Betriebspunkt identifizieren unter Beachtung auch energetischer Kennzahlen; Anwendungsfall 2	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Kurve	Mehrere
6	[234]	Spitzenlastmanagement in Gießerei	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	Phys Mod	Mehrere
7	[110]	SIMTER „Toy Case“	Quant		DES	SysPla: Öko/ TCO	BZ Mittel	Elektriz
8	[107]	Produktionslinie zur Pufferauslegung/Quality-Gate-Platzierung	Opt	Opt	Komb	SysPla: Gest	BZ Kurve	Mehrere
9	[187]	Losgrößenplanung für zwei Produktionslinien	Quant	Fakt	Komb	PPS: Los	BZ Mittel	Mehrere
10	[235]	Aluminumdruckguss; Ablaufsteuerung auf 2 Linien	Quant	Szen	Komb	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere
11	[236]	Fallstudie 1: Weberei, Energieeffizienz in Abhängigkeit v. Systemvolumen und Systemluftdruck	Quant	Fakt	Komb	SysPla: Betr	BZ Mittel	Mehrere
12	[236]	Fallstudie 2: Platinenmontage; Strategien für Maschinenabschaltung	Quant	Szen	Komb	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
13	[210]	Fallstudie 1: Aluminiumdruckguss; Systemumplanung mit nur 2 Maschinen	Quant	Szen	Komb	SysPla: Gest	BZ Mittel	Mehrere
14	[210]	Fallstudie 2: Weberei; Variation von Maschinengeschwindigkeit und Kompressornutzung	Quant	Szen	Komb	SysPla: Betr	BZ Mittel	Mehrere
15	[237]	Verschiedene Ansätze des Toyota Produktionssystems zur Steuerung erprobt hinsichtlich Energieeffizienz	Quant	Szen		PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
16	[126]	Beispiel Medizinsektor, Ansatz 1 (Infrastruktur)	Quant		Komb	SysPla: Infra	Phys Mod	Mehrere
17	[126]	Beispiel Medizinsektor, Ansatz 2 (Betriebsstrategien)	Quant		Komb	PPS: Strg	BZ Kurve	Mehrere
18	[238]	Beispiel Schokoladenhersteller (Gebäudeinfrastruktur)	Quant		Komb	SysPla: Infra	Phys Mod	Mehrere
19	[239]	Automobil Lackiererei; Vergleich Energiequellen, Prozessführung, Dimensionierung	Quant	Fakt	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Elektriz
20	[84]	Produktionssteuerung von Spritzgussmaschinen	Opt	Opt	Komb	PPS: Strg	BZ Kurve	Mehrere
21	[90]	Produktionssteuerung von Presshärtelinie	Opt	Opt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere
22	[240]	Losgrößenszenario (II) in Zylinderkopffertigung	V/V	Szen	DES	PPS: Los	BZ Mittel	Elektriz
23	[240]	Prüf-/Rüst-/Ausschussszenario (III) in Zylinderkopffertigung	V/V	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Elektriz
24	[87]	Untersuchung 1: Einfluss von Maschinenbediener	Quant	Sens	DES	SysPla: Öko/ TCO	Äquiv	CO_2
25	[87]	Untersuchung 2: Materialflussoptimierung	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	Äquiv	CO_2
26	[185]	Lastspitzenausgleich	Opt	Opt	DES	SysPla: Betr	BZ Ersatz	Elektriz

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
27	[109]	Vergleich Betriebszeiten mit Steuerungsstrategie	V/V	Szen	DES	PPS: Strg	rein BZ	Elektriz
28	[134]	Simulation von Roboter-Arbeitszelle	Quant	Szen	DES	SysPla: Infra	BZ Ersatz	Elektriz
29	[85]	Reihenfolgeplanung in Färberei (Betrachtung Erdgas)	Opt	Opt	DES	PPS: Reih	rein BZ	Elektriz
30	[108]	Umlegung verbrauchter Energie direkt/indirekt pro Zeiteinheit	Quant		DES	SysPla: Gest	Äquiv	Gesamt
31	[241]	Simulation von Bandanlage	Quant		DES		BZ Mittel	Elektriz
32	[211]	Wochenendabschaltung für Türenanlage	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Mittel	Gesamt
33	[116]	Losgrößenplanung für Sackfüllanlage (2 parallele Linien)	Quant	Szen	DES	PPS: Los	BZ Mittel	Gesamt
34	[23]	Anwendungsfall 1: Aluminiumdruckguss, Losgrößenoptimierung	Quant	Fakt	Komb	PPS: Los	BZ Mittel	Mehrere
35	[23]	Anwendungsfall 2: Weberei, Kompressorendimensionierung (Szenarios F-H)	Quant	Szen	Komb	SysPla: Infra	BZ Mittel	Mehrere
36	[88]	Reihenfolgeplanung (Szenarios 1/2)	Quant	Szen	DES	PPS: Reih	BZ Ersatz	Elektriz
37	[88]	System-/Prozessanpassung (Szenarios 3/4)	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Ersatz	Elektriz
38	[242]	Transportstrategie für Schuhe in Handelskette	Quant	Szen	DES	SCM	Äquiv	CO_2
39	[119]	Waferproduktion; Untersuchung alternativer Wafergröße	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	Kurve	Mehrere
40	[243]	Energiesparstrategien in Fertigungslinie für Zylinderköpfe	V/V	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
41	[147]	Unterschiedliche Steuerungsstrategien	Quant	Szen	Komb	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
42	[147]	Variation von Größe der Speichertanks und Anzahl von Kompressoren für Druckluftversorgung	Quant	Sens	Komb	SysPla: Infra	BZ Mittel	Mehrere
43	[186]	Planung für Umzug eines Metallbearbeitungsunternehmens	Quant	Szen	Komb	SysPla: Infra	Phys Mod	Mehrere
44	[117]	Modellierung von Fördersystem auf Basis von Schaltzuständen	Quant		DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Elektriz
45	[244]	Untersuchung Energieverbrauch über Produktlebenszyklus	Quant		DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Gesamt
46	[113]	Verringerung der Prozesszeit von Imprägnierprozess	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Kurve	Elektriz
47	[113]	Erhöhung der technischen Betriebsmittelverfügbarkeit	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Kurve	Elektriz
48	[113]	Abschaltstrategie für Betriebsmittel	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Kurve	Elektriz
49	[113]	Schichtplan-Änderung zu Nachtarbeit	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Kurve	Elektriz
50	[113]	Lastmanagement von Füge- und Imprägnierprozess	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Kurve	Elektriz
51	[122]	Effekt von verbesserter Anlagentechnik/Taktverkürzung in Szenarien	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest		Elektriz
52	[94]	Auslegung der technischen Gebäudeausrüstung	Quant	Szen	DES	SysPla: Infra	BZ Mittel	Elektriz
53	[94]	Optimierung des Anlagenbetriebs	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Mittel	Elektriz
54	[245]	Prozesskettenvergleich	Quant		DES	SysPla: Gest	Äquiv	Gesamt
55	[112]	Temperaturgeführtes Abschaltkonzept	Quant	Szen	Komb	SysPla: Betr	Phys Mod	Mehrere
56	[100]	Anwendungsbeispiel A, Schichtplanung	Quant	Szen	DES	PPS: Kapa	BZ Mittel	Mehrere

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
57	[100]	Anwendungsfall A, Reduzierung von Überkapazitäten	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Mehrere
58	[100]	Anwendungsfall B, Reduzierung von Losgrößen	Quant	Szen	DES	PPS: Los	BZ Mittel	Mehrere
59	[100]	Anwendungsfall C, Evaluierung von Prozessalternativen	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Mehrere
60	[100]	Anwendungsfall D, alternative Reihenfolgeplanung	Quant	Szen	DES	PPS: Reih	BZ Mittel	Mehrere
61	[100]	Anwendungsfall D, erhöhte Engpasskapazität	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Mehrere
62	[100]	Alle Anwendungsfälle, Quantifizierung der Öko-Effizienz	Quant	Szen	DES	SysPla: Öko/ TCO	BZ Mittel	Mehrere
63	[188]	Activity Based Cost auf Basis von Emissionsäquivalenten zur Analyse	Quant		DES	SysPla: Öko/ TCO	Äquiv	Kosten
64	[246]	Quantifizierung der Effekte von Abschaltstrategie	V/V	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Mittel	Elektriz
65	[247]	Einfluss von Steuerungsstrategie (DATC/PUSH)	V/V	Fakt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
66	[247]	Einfluss von Energiesteuerung	V/V	Fakt	DES	SysPla: Betr	BZ Mittel	Elektriz
67	[248]	Veränderung Prozesszeit und Engpasskapazität	Quant	Sens	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Gesamt
68	[249]	Einfluss von Losgröße auf Energieverbrauch und Output	Quant	Sens	DES	PPS: Los	BZ Mittel	Elektriz
69	[190]	Rüstzeiten, Warmlaufzeiten, Variantenvielfalt	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Mehrere
70	[190]	Sortierlogik vor Ofen	Quant	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere
71	[250]	Unterschiedliche Abschaltkonzepte	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Mittel	Elektriz
72	[125]	Variantengenerierung (inkl. Energie) im Engineering	Quant	Szen	DES	SysPla: Öko/ TCO	Phys Mod	Mehrere

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
73	[189]	Kostenermittlung für Material- und Energieverbrauch in Fertigung	Quant		DES	SysPla: Öko/ TCO	BZ Mittel	Elektriz
74	[251]	Abschaltung von Pumpen	Quant	Szen	And	SysPla: Betr	BZ Ersatz	Elektriz
75	[252]	Parameteroptimierung, Anwendungsfall A: 3 Maschinen	Opt	Opt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
76	[252]	Parameteroptimierung, Anwendungsfall B: 9 Maschinen	Opt	Opt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
77	[253]	Parameteroptimierung für mehrere Steuerungsstrategien (ausgeglichene Linie)	Opt	Opt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
78	[253]	Parameteroptimierung für mehrere Steuerungsstrategien (mit Bottleneck-Maschine)	Opt	Opt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
79	[254]	Energiepreis-orientierte Auftragsfreigabe	Quant	Szen		PPS: Strg	Äquiv	Elektriz
80	[255]	Unterschiedliche energiesensitive Auftragsfreigabestrategien	V/V	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
81	[212]	Anpassungen von Systemparametern in 3 Varianten	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Elektriz
82	[256]	Prioritäts-Regeln für Reihenfolgeplanung	Quant	Szen	DES	PPS: Reih	BZ Mittel	Elektriz
83	[193]	Variation der Losgrößen	Quant	Fakt	DES	PPS: Los	BZ Mittel	Elektriz
84	[193]	Schichtpläne & Arbeitszeit	Quant	Fakt	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Elektriz
85	[133]	Auswahl von Bearbeitungsmaschinen (4.1.1)	Quant	Fakt		SysPla: Gest	BZ Mittel	Elektriz
86	[133]	Einfluss von Prozessparametern (4.1.2)	Quant	Sens		SysPla: Betr	BZ Mittel	Elektriz

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
87	[133]	Einfluss von Losgrößen (4.1.3)	Quant	Sens		PPS: Los	BZ Mittel	Elektriz
88	[133]	Einfluss von RPM (4.2.2) auf Folien-Fertigungsprozess	Quant	Fakt		SysPla: Betr	BZ Mittel	Elektriz
89	[133]	Einfluss unterschiedlicher Reihenfolgepläne	Quant	Fakt		PPS: Reih	BZ Mittel	Elektriz
90	[124]	Losgrößen-Einfluss in Saftproduktion	Quant	Sens	DES	PPS: Los	Äquiv	Mehrere
91	[124]	Systemerweiterung zur Engpassvermeidung in Saftproduktion	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	Äquiv	Mehrere
92	[124]	Kombinierte Losgrößen- und Reihenfolgeplanung in Saftproduktion	Quant	Szen	DES	PPS: Reih	Äquiv	Mehrere
93	[257]	Losgrößen-Einfluss in unterschiedlichen Szenarien (Werkstattfertigung)	Quant	Sens	DES	PPS: Los	BZ Mittel	Elektriz
94	[106]	Pausen-Shutdown, Auslastungsanpassungen	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Mittel	Elektriz
95	[132]	Einfluss von Parametervariationen auf Zielkriterien in ideeller Fertigung	Quant	DoE	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Mehrere
96	[132]	Einfluss von „Intervention threshold“ auf Liefertermintreue	Quant	Sens	DES	PPS: Los	BZ Mittel	Mehrere
97	[258]	Einfluss der Losgröße auf Material- und Energieeffizienz	Quant	Sens	DES	PPS: Los	BZ Mittel	CO_2
98	[148]	Auslegung der Speicherkapazität mittels Elektrofahrzeug/stationärem Speicher	Quant	Szen	DES	SysPla: Infra	BZ Mittel	Mehrere
99	[148]	Pufferauslegung als Materialspeicher für Energie	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Mehrere
100	[199]	Optimierung der Produktionssteuerung	Quant	Szen	Komb	PPS: Strg	BZ Kurve	Elektriz

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
101	[93]	Vergleich von Bearbeitungsstrategien im Prozess	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Elektriz
102	[93]	Variation der Puffergröße	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Elektriz
103	[93]	Variation der Einlastungsstrategie Priorisierung	Quant	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
104	[93]	Variation der eingelasteten Lose zur Bearbeitung	Quant	Szen	DES	PPS: Los	BZ Mittel	Elektriz
105	[259]	Verifikation von Trafodimensionierung	Quant		DES	SysPla: Infra		Elektriz
106	[260]	Vergleich von LCA-Methoden (mit/ohne Simulation)	Quant		DES		Äquiv	CO_2
107	[123]	Allokation von Verbräuchen und CO2 zu Containern	Quant		DES	SysPla: Öko/ TCO	Äquiv	CO_2
108	[261]	System Dynamics Untersuchung von Offshore-Sourcing-Strategie	Quant	Szen	And	SCM	Äquiv	CO_2
109	[261]	DES Untersuchung zum Einfluss der Rüstzeit	Quant	Szen	DES	SysPla: Öko/ TCO	Äquiv	CO_2
110	[262]	Untersuchung einer Fahrzeugproduktion	Quant	Szen	And	SysPla: Gest	Äquiv	Mehrere
111	[263]	Simulationsmodell zur Energieprognose in Containerterminal	Quant	Szen		PPS: Strg	Äquiv	Elektriz
112	[196]	Einfluss statischer oder variabler Losgrößen	Quant	Szen	Komb	PPS: Los	BZ Mittel	Mehrere
113	[264]	Auswahl von Prozesskette im Variantenvergleich	Quant	Szen	Komb	SysPla: Gest	Phys Mod	Elektriz
114	[121]	Model 2: Verringerung von Zykluszeiten	Quant	Szen	And	PPS: Reih	Äquiv	Elektriz
115	[121]	Model 2: Verringerung von Losgröße	Quant	Szen	And	PPS: Los	Äquiv	Elektriz
116	[121]	Model 3: Erhöhung der Lasterkapazitäten	Quant	Szen	And	PPS: Kapa	Äquiv	Elektriz

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
117	[121]	Model 4: Vermeidung von Leerfahrten	Quant	Szen	And	SysPla: Gest	Äquiv	Elektriz
118	[121]	Model 5: Optimierung von Modellparametern	Opt	Opt	And	SysPla: Gest	Äquiv	Elektriz
119	[101]	Modellierung von Spritzgussmaschine	Quant		DES		BZ Ersatz	Elektriz
120	[265]	Start-Stopp-Modus in Steuerung von Linien- und Infrastruktur	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Mittel	Elektriz
121	[266]	Untersuchung von Alternativen zur Vereinigung von Lieferketten	Quant	Szen	DES	SCM	Äquiv	CO_2
122	[267]	Activity-based Costing zur Flexibilitätsuntersuchung (Varianten/Kapazität)	Quant	Fakt	DES	PPS: Kapa	Äquiv	Kosten
123	[268]	Energieoptimierte Ablaufplanung über Schichtzeitänderungen	Quant	Szen	DES	PPS: Kapa	BZ Mittel	Elektriz
124	[268]	Zeitweise Lastvariation mittels spezifischer Steuerungsstrategien	Quant	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
125	[269]	Kennzahlenbasierte Produktionssteuerung	Quant	Szen	Komb	PPS: Strg	Äquiv	Kosten
126	[270]	Untersuchung unterschiedlicher Multimodellierungsansätze	Quant		Komb		Phys Mod	Elektriz
127	[213]	Analyse des Einflusses von Einschalttemperatur bei temperaturgeführtem Abschaltkonzept	Quant	Sens	Komb	SysPla: Betr	Phys Mod	Mehrere
128	[213]	Untersuchung zum Einfluss von energetischem Verhalten auf Qualitätsfehler bei Ofenprozess	Quant		Komb	SysPla: Betr	Phys Mod	Elektriz

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
129	[271]	Untersuchung von Konfigurationen einer pufferfüllstandsorientierten Abschaltstrategie	Quant	Fakt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
130	[272]	Parametrierung eines Systems für energieorientierte Engpassoptimierung	Quant	Opt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
131	[273]	Kosteneinfluss unterschiedlicher Prioritätsregeln	Quant	Szen	DES	PPS: Reih	BZ Mittel	Kosten
132	[274]	Vergleich der Energieeffizienz mehrerer Futterpressen	Quant	Szen	DES	PPS: Kapa	BZ Ersatz	Mehrere
133	[118]	Simulationsgestützte Optimierung von Fertigungsfolgen	Opt	Opt	And	PPS: Reih	BZ Kurve	Elektriz
134	[275]	Untersuchung von Energieeffizienzpotenzialen in Fahrzeugproduktion	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Ersatz	Mehrere
135	[276]	Untersuchung von Green Policy in Fahrzeugproduktion	Quant	Szen	And	SysPla: Gest	Äquiv	Mehrere
136	[277]	Virtuelle Versuchsumgebung für ressourceneffiziente Produktionsplanung	Quant		DES	PPS: Reih	BZ Ersatz	Elektriz
137	[278]	Simulationsgestützte Optimierung von Produktionsplänen	Opt	Opt	Komb	PPS: Reih	Phys Mod	Mehrere
138	[279]	Vergleich von Einfluss der Schichtzeiten auf Energiebedarf	Quant	Szen	Komb	PPS: Kapa	Phys Mod	Mehrere
139	[280]	Optimierung von Losgrößen mit verschiedenen Zielgewichtungen	Opt	Opt	Komb	PPS: Los	BZ Kurve	Mehrere
140	[281]	Einfluss von Material-Vorwärmung auf Ofen-Guss-Prozess	Quant	Szen	Komb	SysPla: Betr	Phys Mod	Mehrere
141	[281]	Optimierter Beschickung von Schachtöfen	Quant	Szen	Komb	PPS: Strg	Phys Mod	Mehrere

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
142	[281]	Reduzierter Anteil von Flüssigaluminiumlieferung	Quant	Szen	Komb	PPS: Kapa	Phys Mod	Mehrere
143	[281]	Selektive Ofenabschaltung zur Auslastungssteigerung	Quant	Szen	Komb	PPS: Strg	Phys Mod	Mehrere
144	[282]	Spätere Einlastung eines Teils der Produkte	Quant	Szen	And	PPS: Reih	BZ Mittel	Elektriz
145	[282]	Anpassung von Maschinenparametern bei veränderter Einlastung	Quant	Szen	And	SysPla: Betr	BZ Mittel	Elektriz
146	[89]	Case Study 2: Mehrere Produkte	Quant		DES	SysPla: Gest	Äquiv	Mehrere
147	[86]	Case Study 1: Bedarfsgesteuerte Schmelze	Quant	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Ersatz	Mehrere
148	[86]	Case Study 1: Verbesserte Verfügbarkeit des Gießvorgangs	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Ersatz	Mehrere
149	[86]	Case Study 2: Nachtbetrieb der Sinterprozesse	Quant	Szen	DES	PPS: Kapa	BZ Mittel	Mehrere
150	[86]	Case Study 2: Ofenabschaltung bei Sintern des anderen	Quant	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere
151	[86]	Case Study 2: Verlängerung der Produktionsschichten	Quant	Szen	DES	PPS: Kapa	BZ Mittel	Mehrere
152	[86]	Case Study 3: Vermeidung von überlappendem Betrieb von Gusslinien	Quant	Szen	DES	PPS: Reih	BZ Mittel	Elektriz
153	[86]	Case Study 4: Simulationsgestützte Produktionsplanung	Quant	Szen	DES	PPS: Reih	BZ Mittel	Elektriz
154	[283]	Energiebedarfs- und Energiekostenprognose	Quant	Szen	DES		BZ Mittel	Elektriz
155	[95]	Abschaltstrategie für Produktionslinie Kühlschranktür	Quant	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
156	[95]	Abschaltstrategie für Produktionslinie Sitzgestellfertigung	Quant	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
157	[95]	Abschaltstrategie für Produktionslinie Flugzeugteil	Quant	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
158	[91]	Werkstückbezogene Betrachtung	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	BZ Ersatz	Elektriz
159	[91]	Prozesskettenbezogene Betrachtung	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Ersatz	Elektriz
160	[91]	Numerische Optimierung des Ressourcenverbrauches in Prozesskette	Opt	Opt	DES	SysPla: Gest	BZ Ersatz	Mehrere
161	[284]	Untersuchung 1: 3 Auftragstypen	Quant	Szen	And	PPS: Reih	BZ Mittel	Elektriz
162	[284]	Untersuchung 2: 2 Auftragstypen	Quant	Szen	And	PPS: Reih	BZ Mittel	Elektriz
163	[285]	Vergleich von Kraftstoffarten auf Umweltverhalten von Supply Chain	Quant	Szen	DES	SCM	BZ Ersatz	Elektriz
164	[286]	Nachhaltige Auslegung von Behältermenge	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	Äquiv	Gesamt
165	[287]	Auswahl von umweltfreundlichen Produktionsstrategien	Opt	Opt	DES	SysPla: Gest	Äquiv	CO_2
166	[288]	Analyse von System Dynamics im Kontext umweltfreundlicher Produktionsstrategien	Quant		And	SysPla: Gest	Äquiv	CO_2
167	[289]	Strategievergleich für Steuerungsansätze	Quant	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
168	[289]	Einfluss von Verfügbarkeit und Energievarianz	Quant	Fakt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz
169	[290]	Periodische Anlagenabschaltung	Quant	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere
170	[290]	Prozessversorgung mit alternativen Energieträgern	Quant	Szen	DES	SysPla: Infra	BZ Mittel	Mehrere
171	[290]	Potenzialabschätzung für alternative Schichtregime oder Maschinenanzahlen	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Mehrere
172	[81]	Proof-of-Concept Brauerei	Quant		DES		Äquiv	CO_2
173	[291]	Vergleich von Belastungszuständen	Quant	Szen	DES		BZ Kurve	Mehrere

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
174	[292]	Alternatives Fertigungskonzept für Teil B	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	Äquiv	Kosten
175	[293]	Alternatives Fertigungskonzept	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	Äquiv	Kosten
176	[294]	Ökologische Bewertung von Supply Chains	Quant	Szen	DES	SCM	Äquiv	CO_2
177	[294]	Routing mit Beachtung ökologischer Kennzahlen	Quant	Szen	DES	SCM	Äquiv	CO_2
178	[295]	Vergleich von Energiebedarf für Auftragsfolgen (Case Study 3)	Quant	Szen	DES	PPS: Reih	BZ Mittel	CO_2
179	[296]	Einfluss unterschiedlicher Störungen im Vergleich	Quant	Szen	Komb	SysPla: Betr	Phys Mod	Mehrere
180	[296]	Verringerte Temperatur der Schmelze vor Transport	Quant	Szen	Komb	SysPla: Betr	Phys Mod	Mehrere
181	[297]	Abschätzung für Energieeffizienzpotenzialen in Supply Chain	Quant	Szen	And	SysPla: Gest	Äquiv	Gesamt
182	[297]	DES Untersuchung zur Maschinenabschaltung in der Nacht	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr	Äquiv	Gesamt
183	[298]	Szenario I: Verringerte Wartezeit von Autoklaven	Quant	Szen	DES	PPS: Strg		Elektriz
184	[298]	Szenario II: Verwendung möglichst weniger Autoklaven	Quant	Szen	DES	PPS: Kapa		Elektriz
185	[298]	Szenario III: Verbesserte Handhabung von Autoklaventüren	Quant	Szen	DES	SysPla: Betr		Elektriz
186	[298]	Szenario IV: Reduktion von Einfluss der Außentemperatur	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest		Elektriz
187	[299]	Optimierung von Wartezeit und Anzahl zu produzierender Teile	Opt	Opt	DES	PPS: Kapa	BZ Kurve	Elektriz

Tabelle A.2: (Fortsetzung)

Nr.	Quelle	Bemerkungen zu Einzeluntersuchung	Simulationsziel	Versuchsplannung	Werkzeug	Planungsaufgabe	Energiemodell	Betrachtete Größen
188	[300]	Vergleich analytischer und simulationsgestützter Optimierung (DC-Szenario)	Opt	Opt	DES	SCM	Äquiv	CO_2
189	[300]	Vergleich analytyischer und simulationsgestützter Optimierung (M-DCs-Szenario)	Opt	Opt	DES	SCM	Äquiv	CO_2
190	[202]	Störungsorientierte Abschaltstrategie (eniBreakdownControl)	V/V	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere
191	[202]	Kanban-ähnliche Abschaltstrategie (eniKanban)	V/V	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere
192	[200]	Flexibilitätsanalyse in Tagebaubetrieb	Quant	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Ersatz	Elektriz
193	[222]	ConWIP-ähnliche Abschaltstrategie (ConEnIP)	V/V	Szen	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere
194	[219]	Einfluss von Taktzeitverkürzung auf Hauptlinie	V/V	Szen	DES	SysPla: Gest	BZ Mittel	Mehrere
195	[221]	eniKanban: faktorielle Parameter-Suche	Quant	Fakt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere
197	[184]	ConEnIP: Parameter-Suche (GA)	Opt	Opt	DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Mehrere
198	[224]	Betriebsstrategien unter Beachtung von erneuerbarem Energieangebot	Quant		DES	PPS: Strg	BZ Mittel	Elektriz

Anhang B: Bewertungsschema für Vorgehensmodelle

Als Grundlage zur Einschätzung der identifizierten und in Abschnitt 2.4 diskutierten Vorgehensmodelle zur Durchführung von Simulationsstudien dienen die in Tabelle B.1 gezeigten Kriterien. Ebenfalls zusammengefasst ist darin der Maßstab, nach dem die Bewertung in Abschnitt 2.4.9 durchgeführt wurde.

Tabelle B.1: Bewertungsschema für Vorgehensmodelle zur Durchführung von Simulationsstudien

Kriterium	**Erläuterung**	**Bewertungsmaßstab (Erfüllung)**		
		gering 0	**mittel +**	**hoch ++**
Energetische Betrachtungen	• Vorgehensmodell beschäftigt sich explizit mit integrierter Simulation von Material- und Energieflüssen	• kein/kaum Bezug zu energetischen Betrachtungen	• energetische Betrachtungen finden nur am Rande Beachtung	• energetische Betrachtungen sind von zentraler Bedeutung in Vorgehensmodell
Gestaltungsaspekte	• Vorgehensmodell bezieht unterschiedliche Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien ein (insbesondere in Abschnitt 2.3 diskutierte Aspekte)	• keine/kaum Gestaltungsaspekte wurden explizit in Vorgehensmodell aufgezeigt bzw. einbezogen	• ausgewählte Gestaltungsaspekte wurden aufgezeigt, eine Einbindung erfolgt jedoch nicht oder nur teilweise	• relevante Gestaltungsaspekte werden durchweg in das Vorgehensmodell integriert
Entscheidungskriterien	• Kriterien zur Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien sind Teil des Vorgehensmodells	• Kriterien werden nicht oder nur oberflächlich in das Vorgehen und dessen Beschreibung einbezogen	• für einen Teil der Gestaltungsaspekte werden Entscheidungskriterien expliziert und direkt in das Vorgehen integriert	• für alle einbezogenen Gestaltungsaspekte werden relevante Kriterien definiert und deren Beachtung im Vorgehen konkretisiert

Tabelle B.1: (Fortsetzung)

Kriterium	Erläuterung	Bewertungsmaßstab (Erfüllung)		
		gering 0	**mittel +**	**hoch ++**
Lösungsvarianten	• Lösungsvarianten zu Gestaltungsaspekten werden aufgezeigt und diskutiert	• auf Darstellung von Lösungsvarianten wird weitgehend verzichtet	• für ausgewählte Gestaltungsaspekte werden Lösungsvarianten aufgezeigt und über eine Nennung hinaus diskutiert	• für die explizierten Gestaltungsaspekte wird eine größere Zahl von Lösungsvarianten aufgezeigt und deren Abgrenzung diskutiert
Umwelteinflüsse	• Umwelteinflüsse (insbesondere in Form von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten), die auf die Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien einwirken, werden in Vorgehensmodell aufgezeigt und diskutiert	• Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen zu bestimmenden Ausprägungen von Gestaltungsaspekten oder anderen projektspezifischen Festlegungen und weiteren externen Einflüssen werden vernachlässigt	• Wechselwirkungen und Abhängigkeiten werden teilweise aufgezeigt, aber finden kaum Beachtung	• Wechselwirkungen und Abhängigkeiten werden klar aufgezeigt und finden durchweg Beachtung in der Ausprägungsbestimmung der Gestaltungsaspekte von Simulationsstudien

Tabelle B.1: (Fortsetzung)

Kriterium	**Erläuterung**	**Bewertungsmaßstab (Erfüllung)**		
		gering 0	**mittel +**	**hoch ++**
Entscheidungsverfahren	• Vorgehen und Methoden zur Entscheidungsfindung zur Ausprägungsbestimmung für Gestaltungsaspekten von Simulationsstudien sind Bestandteil des Vorgehensmodells	• für die Ausprägungsbestimmung werden keine oder nur unzureichende methodische Hilfestellungen gegeben	• für ausgewählte Gestaltungsaspekte werden methodische Hilfestellungen zur Entscheidungsfindung gegeben	• für die Bestimmung fast aller Ausprägungen von Gestaltungsaspekten werden methodische Hilfestellungen gegeben
Übertragbarkeit	• Vorgehen ist zur Anwendung mit beliebigen Softwarelösungen bzw. Modellierungsansätzen übertragbar	• Vorgehensmodell ist nur im Zusammenhang mit bestimmter Softwarelösung bzw. bestimmtem Modellierungsansatz einsetzbar und gibt andernfalls kaum Hilfestellung für relevante Gestaltungsaspekte	• Vorgehensmodell ist eingeschränkt für beliebige Softwarelösungen bzw. Modellierungsansätze einsetzbar, jedoch finden einzelne Gestaltungsaspekte nicht explizit Beachtung	• Vorgehensmodell wurde unabhängig von Softwarelösungen bzw. Modellierungsansätzen entwickelt oder sieht für Gestaltungsaspekte unabhängig dieser die Auswahl einer geeigneten Ausprägung vor

Anhang C: Beschreibung der Planungsfälle

Um die zentralen Unterschiede der in Abschnitt 3.2.3 eingeführten Planungsfälle für die Umplanung von Fabriken mit dem Ziel der Energieeffizienzsteigerung herauszuarbeiten, werden diese im Folgenden kurz dargestellt. Die Ausführungen orientieren sich lose an Förster und Wirth [57, S. 14 ff.].

Planungsfall 1: Fabrik- und Anlagensteuerung
Das Fabriksystem ist weitgehend bestimmt hinsichtlich des Fertigungsablaufs, des eigentlichen Produktionssystems und der Infrastruktur-/Versorgungssysteme. Entsprechend kann eine Umplanung nur unter der Bedingung erfolgen, dass maximal geringfügige Änderungen in den bestehenden Anlagen und Subsystemen durchgeführt werden, welche vornehmlich im operativen Horizont wirken. Hierunter fallen insbesondere, aber nicht ausschließlich, Anpassungen in den organisatorischen Prozessen des Fabrikbetriebs und in der Steuerung der direkt oder indirekt am Wertschöpfungsprozess beteiligten Anlagen. Je nach verfolgtem Handlungsansatz kann dieser Planungsfall in Form eines Planungsprojektes aber auch als wiederkehrende, den Fabrikbetrieb unterstützende Maßnahme auftreten.

Planungsfall 2: Produktionsplanung
Die Bestimmtheit des Fertigungsablaufs ist nicht vollumfänglich gegeben, sodass Eingriffe in den tatsächlichen Produktionsprozess vollzogen werden können, ohne dass das Fabriksystem signifikant verändert wird. Ein Umplanungsprojekt kann folglich dazu dienen, Alternativen für den strategischen oder taktischen Betrieb der Fabrik zu entwickeln, etwa bezüglich der Sequenzierung oder Terminierung von Fertigungsaufträgen. Analog zum Vorherigen kann auch dieser Planungsfall einmalig, anlassbezogen oder wiederkehrend auftreten.

Planungsfall 3: Produktionssystemplanung
Ist das Produktionssystem im Gegensatz zum Fertigungsablauf und den Infrastruktur-/Versorgungssystemen nur wenig bestimmt, so können die Produktionsanlagen hinsichtlich ihrer Art, Menge oder Anordnung verändert werden. Dies entspricht im weitesten Sinne den Planungsfällen 3, 5 bzw. 7 nach Förster und Wirth [57, S. 15 f.]. Welche genauen Umfänge tatsächlich veränderbar sind, ist zu Beginn des Planungsprojektes näher zu bestimmen. Klare Restriktion ist jedoch, dass das Produktionsprogramm in gleichem Maße bewältigt werden kann. Besonders relevant sind dabei folglich Anpassungen der Produktionsstrukturen, Betriebsmitteldimensionierung oder -auswahl.

Planungsfall 4: Produktionsprozessplanung
Bei der Kombination der Planungsfälle 2 und 3 vergrößert sich insbesondere die Möglichkeit zur Abstimmung von Fertigungsablauf und Produktionssystem, etwa in Form einer vollständigen Prozessumgestaltung. Hierunter fallen jedoch auch Umplanungsprojekte, welche beispielsweise auf die Integration zusätzlicher bzw. alternativer Prozessketten in eine bestehende Fabrik abzielen. Dabei müssen die vorhandenen Infrastruktur- und Versorgungsanlagen weitgehend unverändert bleiben, sodass mitunter Restriktionen bei der Belastung ebendieser eine wichtige zu beachtende Randbedingung darstellen.

Planungsfall 5: IVS-Planung
Sind nur die Infrastruktur- und Versorgungssysteme durch eine geringe Bestimmtheit ausgezeichnet, so sind einzelne Anlagen oder Systeme unter Beachtung der Anforderungen der Produktion zu überarbeiten. Hierunter fällt eine breite Menge von Maßnahmen, die der Erhöhung der Energieeffizienz in Fabriken dient. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass sie die (Energie-)Bedarfe der Produktion als Planungsinput benötigen und zumeist keine dynamische Rückmeldung in die operative Produktionssteuerung liefern.

Planungsfall 6: Produktions- und IVS-Planung
Bei der Kombination der Planungsfälle 2 und 5 ergeben sich erweiterte Möglichkeiten, den Fertigungsablauf auf umgestaltete Infrastruktur-/ Versorgungssysteme abzustimmen. Dabei bleibt das eigentliche Produktionssystem vornehmlich unverändert, während neue Planungs- und Steuerungslogik im strategischen, taktischen und z. T. auch operativen Horizont implementiert werden. Zentrale Herausforderung ist es, diese mit der vorhandenen Produktionstechnik abzubilden und insgesamt den Fabrikbetrieb im Zuge der Umrüstung möglichst wenig zu beeinträchtigen. Hierunter fällt eine Vielzahl von Maßnahmen, die im weitesten Sinne der Flexibilisierung des Energieverbrauchs in Fabriken dienen, wobei eine dynamischere Verknüpfung von Energieversorgung und -verbrauch angestrebt wird.

Planungsfall 7: Fabriksystemplanung
Liegt gleichwohl für das Produktionssystem und die Infrastruktur-/ Versorgungssysteme eine geringe Bestimmtheit bei genauer Vorgabe des Fertigungsablaufs vor, so wird im Grunde die gesamte physikalische Fabrik überarbeitet. Diese Kombination aus den Planungsfällen 3 und 5 stellt in der Systematik von Schenk et al. eine Sanierung bzw. Revitalisierung dar (vgl. [22, S. 148 ff.]). Da in diesem Fall kaum mehr Bestandteile des ursprünglichen Systems erhalten bleiben und sich Restriktionen vornehmlich auf den Fertigungsablauf

und das Fabrikgebäude beziehen, ist der zu betreibende Aufwand (Planung und Realisierung) enorm. Insofern stellt dies keinen typischen Planungsfall zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen dar.

Planungsfall 8: Fabriksystem- und Produktionsplanung
Sind alle Bestimmtheitsgrade niedrig, so kann – ggf. abgesehen vom Fabrikgebäude – im Grunde jeder Aspekt des Systems weitgehend frei definiert werden. Analog zu Planungsfall 7 handelt es sich dabei um derart tiefgreifende Änderungen, dass diese nicht im typischen Fokus für die Planung von Energieeffizienzmaßnahmen stehen. Insgesamt ist dies ein Fall, der vor allem für eine Neuplanung relevant erscheint.

Anhang D: Ergänzungen zum Vorgehensmodell

Im Folgenden finden sich Ergänzungen für das in Kapitel 4 vorgestellte Vorgehensmodell, die einerseits dessen praktischen Einsatz unterstützten sollen und andererseits einzelne Teilergebnisse weiterführend belegen bzw. erläutern. Dazu sind in Anhang D.1 zunächst zwei Checklisten zur Dokumentation von Entscheidungen, die im Rahmen der Anwendung der Gestaltungsmethodik getroffen werden, sowie von weiteren Zwischenergebnissen gezeigt. Daraufhin werden die abstrahierten Effizienzmaßnahmen, die in Schritt 3 der Methodik erstmals referenziert sind, weiter untersetzt. Anschließend sind zusätzliche Materialien zum Lösungsmodul Energiemodell zusammengefasst. Anhang D.5 enthält Erläuterungen zur Eignung von grundsätzlichen Architekturansätzen zur Betrachtung energetischer Einflussfaktoren in der Materialflusssimulation. Abschließend ist eine Charakterisierung der Energiedatenakquisemethoden gezeigt.

Anhang D.1: Checklisten zur Dokumentation von Ergebnissen und Entscheidungen

Gemäß der Erläuterungen in Abschnitt 4.1 wird dem Anwender der Gestaltungsmethodik empfohlen, seine Zwischenergebnisse in Checklisten zu dokumentieren. Im Weiteren sind die hierzu entwickelten Vorlagen gezeigt, wobei Tabelle D.1 in der Phase „Fabrikplanerischer Vorarbeiten“ (vgl. Abschnitt 4.2) und Tabelle D.2 in der Phase „Durchführung der Simulationsstudie“ (vgl. Abschnitt 4.3) einzusetzen ist.

Tabelle D.1: Checkliste zur Erfassung planungsbezogener Entscheidungen und Ergebnisse

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.1	1	Projektziele	
PE.2	1	Bewertungskriterien	
PE.3	1	Energieeffizienzfokus	

Tabelle D.1: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.4	1	Betrachtungsbereich	
PE.5	2	Bestimmtheitsgrad des Fertigungsablaufs	0_____½_____1
PE.6	2	Bestimmtheitsgrad des Produktionssystems	0_____½_____1
PE.7	2	Bestimmtheitsgrad der Infrastruktur- und Versorgungssysteme	0_____½_____1
PE.8	2	Fokussierte System-bestandteile (optional)	
PE.9	2	Planungsfall	☐ 1: Fabrik- und Anlagensteuerung ☐ 2: Produktionsplanung ☐ 3: Produktionssystemplanung ☐ 4: Produktionsprozessplanung ☐ 5: IVS-Planung ☐ 6: Produktions- und IVS-Planung ☐ 7: Fabriksystemplanung ☐ 8: Fabriksystem- und Produktions-planung
PE.10	3	Vorausgewählte Handlungsansätze (Mehrfachauswahl)	☐ Energiesparende Fahrweisen ☐ Reduktion von Verlustenergie ☐ Energetisch optimierte Produkt-gestaltung ☐ Steigerung des Wirkungsgrads

Tabelle D.1: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.11	3	Vorausgewählte abstrahierte Maßnahmen (Mehrfachauswahl)	☐ Optimierte Auftragssteuerung ☐ Optimierte Anlagensteuerung ☐ Veränderte Prozessparameter ☐ Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten ☐ Prozess-/-kettenanpassungen ☐ Veränderter Rohteil-/Rohmaterialbedarf ☐ Prozessintegration ☐ Substitution ☐ Prozesssicherheit/Fehlerrobustheit ☐ Sophistication ☐ Vermeidung von Umgebungsverlusten ☐ Vermeidung von Verlustleistung
PE.12	3	Maßnahmen-vorschläge	
PE.13	3	Ausgewählter Handlungsansatz (Einfachauswahl)	☐ Energiesparende Fahrweisen ☐ Reduktion von Verlustenergie ☐ Energetisch optimierte Produktgestaltung ☐ Steigerung des Wirkungsgrads
PE.14	3	Ausgewählte abstrahierte Maßnahme (Einfachauswahl)	☐ Optimierte Auftragssteuerung ☐ Optimierte Anlagensteuerung ☐ Veränderte Prozessparameter ☐ Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten ☐ Prozess-/-kettenanpassungen ☐ Veränderter Rohteil-/Rohmaterialbedarf ☐ Prozessintegration ☐ Substitution ☐ Prozesssicherheit/Fehlerrobustheit ☐ Sophistication ☐ Vermeidung von Umgebungsverlusten ☐ Vermeidung von Verlustleistung

Tabelle D.1: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.15	3	Konkretisierung der verfolgten Maßnahme	
PE.16	4	Planungsphase	☐ Konzeptplanung ☐ Detailplanung
PE.17	4	Übersicht der ausgeplanten Effizienzmaßnahme	
PE.18	4	Hypothese(n) für ausgeplante Effizienzmaßnahme	
PE.19	5	Simulationswürdig ohne Betrachtung von Energie?	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.20	5	Dynamische Betrachtung von Energie notwendig?	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.21	5	Energie ist Bestandteil der Hypothese?	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.22	5	Erfassung energetischer Größen über Zeit notwendig?	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.23	5	Leistungsverlauf und Systemzustände komplex/stochastisch verknüpft?	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.24	5	Energetische Größen beeinflussen Ablaufsteuerung?	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend

Tabelle D.1: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.25	5	Große Anzahl Experimente/Wiederverwendung erwartet?	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.26	5	Gewählter Ansatz zur Untersuchung	☐ Integrierte Simulation von Material- und Energieflüssen ☐ Konventionelle Materialflusssimulation ☐ Konventionelle Materialflusssimulation mit nachträglicher Energiebetrachtung ☐ Alternative Methoden (ohne Simulation)

Tabelle D.2: Checkliste zur Erfassung simulationsbezogener Entscheidungen und Ergebnisse

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.1	6	Aufgabenspezifikation: Zielbeschreibung und Aufgabenstellung	
SE.2	6	Aufgabenspezifikation: Beschreibung des zu untersuchenden Systems	
SE.3	6	Aufgabenspezifikation: Notwendige Informationen und Daten	
SE.4	6	Aufgabenspezifikation: Geplante Modellnutzung	

Tabelle D.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.5	6	Aufgaben-spezifikation: Lösungsweg und -methode	
SE.6	6	Aufgaben-spezifikation: Anforderungen an Modell und Modell-bildung	
SE.7	6	Aufgabenkategorie	☐ Untersuchung / Prognose von Verbrauchsprofilen und -kennzahlen ☐ Machbarkeit / Gestaltung von Infra-struktur und Versorgungssystemen ☐ Kostenermittlung ☐ Bewertung der ökologischen Effizienz ☐ Bewertung der ökonomischen Effizienz

Tabelle D.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.8	6	Gruppen von möglichen Kennzahlen	☐ Wertschöpfungsanteil beim Energieverbrauch ☐ Energieverbrauch (absolut oder relativ) pro Produkt/-variante oder Transporteinheit ☐ Energieverbrauch (absolut oder relativ) pro Zeiteinheit pro Anlage/Teilsystem/System ☐ Energieverbrauch nach Anlagenzuständen ☐ Emissionen, Umweltwirkungen, Zusammensetzung von Energieträgern ☐ Abgeleitete Leistungskennzahlen von Anlagen/Teilsystemen/Systemen (z. B. Spitzenlast) ☐ Energiekosten pro Zeit oder Produkt/-variante je Energieträger
SE.9	6	Zielsystem	
SE.10	6	Art der zu untersuchenden Alternativen lt. Hypothese	☐ Komplexe Handlungsalternativen ☐ Parameter ☐ Handlungsalternativen und Parameter Umgang mit kombiniertem MADM-MODM-Problem:
SE.11	6	Untersuchungsziel	☐ Systemverhalten analysieren ☐ Beste Parameter finden ☐ nicht zutreffend

Tabelle D.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.12	6	Anzahl relevanter Parameter	☐ < 4 ☐ ≥ 4 ☐ nicht zutreffend Anzahl der Parameter:
SE.13	6	Anzahl möglicher Parameterkombinationen	☐ < 10 ☐ < 100 ☐ ≥ 100 ☐ nicht zutreffend Anzahl der Parameterkombinationen:
SE.14	6	Methodenkenntnis des Anwenders	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.15	6	Automatisierbarkeit der Auswertung	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.16	6	Experimentplanungsmethode	☐ Szenarioanalyse ☐ Sensitivitätsanalyse ☐ Teil-/faktorielle Untersuchung ☐ Methoden der statistischen Versuchsplanung ☐ Optimierung mittels Kopplung mit (Meta-)Heuristik (summarische Zielfunktion) ☐ Optimierung mittels Kopplung mit multikriterieller (Meta-)Heuristik ☐ Untersuchung als kombiniertes MADM-MODM-Problem Vorgehen bei kombiniertem MADM-MODM-Problem:

Tabelle D.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.17	6	Initialer Experimentplan		
SE.18	7	Systemgrenzen des Materialflusssystems		
SE.19	7	Simulationsrelevante Energieflusssysteme	Energieflusssystem 1	Energieflusssystem 2 … n
SE.20	7	IVS-Bezug der Veränderung	☐ Ja ☐ Nein	☐ Ja ☐ Nein
SE.21	7	Systemdynamik	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.22	7	Aggregationsbedarf von Ergebnisdaten	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.23	7	Systemgrenze stromaufwärts (je Energieflusssystem)	☐ Verbraucher ☐ Verteilung ☐ Erzeuger	☐ Verbraucher ☐ Verteilung ☐ Erzeuger
SE.24	7	Verbrauchsvariabilität	☐ Ja ☐ Nein	☐ Ja ☐ Nein
SE.25	7	Aktor-Bezug der Veränderung	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend

Tabelle D.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.26		Datenverfügbarkeit	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.27	7	Systemgrenze stromabwärts (je Energieflusssystem)	☐ Verbraucher ☐ Aktor / Teil von Verbraucher	☐ Verbraucher ☐ Aktor / Teil von Verbraucher
SE.28	7	Untersuchungsrelevante Systemelemente (je Energieflusssystem)		
SE.29	7	Struktur aller betrachteten Systemelemente (Konzeptmodell)	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste]	
SE.30	7	Energiemodell (je Energieflusssystem)	☐ Äquivalente ☐ Betriebszustände mit Durchschnittsleistung ☐ Betriebszustände mit Leistungsverläufen ☐ Betriebszustände mit mathematischen Ersatzmodellen ☐ Kontinuierliche/physikalische Modelle ☐ Rein Betriebszustände	☐ Äquivalente ☐ Betriebszustände mit Durchschnittsleistung ☐ Betriebszustände mit Leistungsverläufen ☐ Betriebszustände mit mathematischen Ersatzmodellen ☐ Kontinuierliche/physikalische Modelle ☐ Rein Betriebszustände

Tabelle D.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.31	7	Architekturansatz	☐ Materialflusssimulation mit Auswertung von Ersatzgrößen ☐ Materialflusssimulation mit nachgelagerter Auswertung von Energie-Kennzahlen ☐ Materialflusssimulation mit integrierter Energiebewertung ☐ Mehrere Simulationsmodelle mit Offline-Kopplung ☐ Mehrere Simulationsmodelle mit Online-Kopplung ☐ Simulationswerkzeug mit mehreren Simulationsmethoden ☐ Alternative Simulationsmethoden (z. B. kontinuierliche Simulation)	
SE.32	7	Einzusetzende Software		
SE.33	7	Spezifikation des Modellierungsansatzes (je Energieflusssystem)	Energieflusssystem 1	Energieflusssystem 2 … n
SE.34	7	Erforderliche Modelldaten		
SE.35	7	Wiederverwendbare Komponenten		

Tabelle D.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.36	8	Ablauflogik zur Interaktion der einzelnen Flusssysteme	☐ Simulation von Energiefluss folgt Betriebszuständen im Materialfluss ☐ Simulation von Energiefluss wird beeinflusst durch Materialflussereignisse ☐ Simulation von Material- und Energiefluss beeinflussen sich gegenseitig	
SE.37	8	Modellierung der Energieflusselemente	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste]	
SE.38	8	Ablauflogik für die Steuerung von Energieflusselementen	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste]	
SE.39	9	Energiedatenakquisemethode	Energieflusssystem 1 ☐ Herstellerangaben ☐ LCI-Datenbanken ☐ Analytisches/physikalisches Modell ☐ Numerische Simulation ☐ Historische Messungen ☐ Spot-Messungen ☐ Dauerhafte Messungen ☐ Historische Verbrauchsdaten ☐ Umlage/kalkulatorische Ermittlung ☐ Vergleichen und Schätzen	Energieflusssystem 2 … n ☐ Herstellerangaben ☐ LCI-Datenbanken ☐ Analytisches/physikalisches Modell ☐ Numerische Simulation ☐ Historische Messungen ☐ Spot-Messungen ☐ Dauerhafte Messungen ☐ Historische Verbrauchsdaten ☐ Umlage/kalkulatorische Ermittlung ☐ Vergleichen und Schätzen
SE.40	9	Rohdaten	[Ablage unabhängig der Checkliste in geeigneter Weise]	

Tabelle D.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.41	10	Planung der Datenaufbereitung	
SE.42	10	Notwendige Vorbereitungen	
SE.43	10	Durchführung der Datenaufbereitung	[Dokumentation in Übergabeformat für Simulation unabhängig der Checkliste]
SE.44	10	Ergebnis der Verifikation und Validierung von aufbereiteten Daten	
SE.45	11	Ergebnis der Prüfung der Realisierbarkeit der vorgenommenen Modellierung	

Tabelle D.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.46	11	Ergebnisse der Modellverifikation und -modellierung sowie Grenzen des Modells	
SE.47	12	Randbedingungen für die Simulationsläufe	Länge der Einschwingphase: Vorgehen zur Erfassung von Messwerten: Länge eines Simulationslaufs: Anzahl von Simulationsläufen je Experiment:
SE.48	12	Experimentpläne	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste]
SE.49	12	Auswertung der Ergebnisdaten	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste]
SE.50	12	Zusammenfassungen der bewerteten Simulationsergebnisse	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste]
SE.51	13	Zusammenstellung der Bewertungskriterien der Planungslösung	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste]
SE.52	13	Projektabschlussbericht	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste]

Anhang D.2: Untersetzung der abstrahierten Maßnahmen

Die Ausführungen in Abschnitt 4.2.3 ergänzend, untersetzt nachstehende Tabelle D.3 die in Tabelle 4.3 gezeigte Übersicht abstrahierter Maßnahmen um genauere Erläuterungen, welchen Inhalt diese jeweils haben und welche charakteristischen Feststellungen dazu getroffen werden können. Die Erläuterungen selbst wurden auf Grundlage der Ausführungen von Müller et al. [13, S. 123 ff.] sowie Erkenntnissen aus der systematischen Literaturanalyse (vgl. Abschnitt 2.3.3) zusammengetragen. Sie geben einen weitgehend dokumentierten Stand der Technik wieder, der bedarfsmäßig durch weitere Erkenntnisse aus der mehrjährigen Forschungsarbeit des Autors in Energie- und Ressourceneffizienzprojekten (u. a. [178], [227], [301]) ergänzt ist. Zitierungen beziehen sich auf exemplarisch ausgewählte Arbeiten zu den jeweiligen Aussagen.

Tabelle D.3: Erläuterung der abstrahierten Maßnahmen

Planungsfall	**Handlungsansatz**	**Abstrahierte Maßnahme**	**Erläuterungen**
Fabrik- und Anlagensteuerung	Energiesparende Fahrweisen	Optimierte Auftragssteuerung	• Erzeugung eines günstigeren Lastgangs durch Anpassung der kurzfristigen Steuerung der Produktionsabläufe • Zielstellung bei Beeinflussung bezieht sich üblicherweise rein auf die Verweildauern in Betriebszuständen (Vermeidung von unproduktiven Einschaltzeiten auf Ebene der Auftragssteuerung) [109] oder auf den Lastgang über die Zeit [113] • Steuerung der Aufträge mit Bezug zu Leistungsverlauf möglich [222] • Bei kombinierter Steuerung von Produktion und IVS kann dynamisches Verhalten relevant sein [147] • Betrachtung auf Verteilungsebene für IVS insbesondere bei Energieflexibilitätsstudien relevant [255] • Einbezug von hoch variablem Verbrauch ggf. notwendig

Tabelle D.3: (Fortsetzung)

Planungsfall	**Handlungsansatz**	**Abstrahierte Maßnahme**	**Erläuterungen**
Fabrik- und Anlagensteuerung *(Fortsetzung)*	Energiesparende Fahrweisen *(Fortsetzung)*	Optimierte Anlagensteuerung	• Senkung des Energiebedarfs bzw. angepasster Lastgang durch angepasste Anlagensteuerung • Steuerung von Produktionsanlagen [211], Infrastrukturelementen [13, S. 125] oder auch Kombinationen [147] dieser möglich • Betrachtung des Leistungsverlaufs oder Bedarfsverlaufs für Infrastruktur über die Zeit zumeist notwendig • Systemzustand und Lastgang insbesondere bei Infrastruktursteuerung komplex verknüpft [147] • Beachtung der Dynamik des Zusammenspiels von Verbrauchern und IVS kann notwendig sein, insbesondere wenn Infrastruktursteuerung angepasst wird [148] • Aggregation der Daten über mehrere Verbraucher hinweg wahrscheinlich [185], soweit nicht reines Abschaltmanagement für innerhalb einer Maschine im Fokus [199] • Einbezug von hoch variablem Verbrauch ggf. notwendig

Tabelle D.3: (Fortsetzung)

Planungsfall	Handlungsansatz	Abstrahierte Maßnahme	Erläuterungen
Fabrik- und Anlagensteuerung *(Fortsetzung)*	Reduktion von Verlustenergie	Veränderte Prozessparameter	• Senkung des Energiebedarfs durch Anpassung von Prozessparametern an Produktionsanlagen • Einfluss auf Materialfluss nur bei bedeutender Anpassung von Bearbeitungszeiten • Zumeist als inkrementelle Verbesserung, die keiner genauen Vorwegbestimmung von Effekten bedarf (kumuliert oder über die Zeit) • Beachtung der Dynamik im Zusammenspiel von Verbrauchern mit IVS ist tendenziell nicht zu erwarten, außer es ergeben sich signifikante zeitweise Mehrbedarfe • Betrachtung kann zumeist auf einzelne Verbraucher reduziert werden [122], soweit keine merklichen Auswirkungen auf IVS zu erwarten sind oder größere Aggregation erwünscht [212] • Einbezug von hoch variablem Verbrauch ggf. notwendig • Veränderung wirkt direkt auf Aktorik, sodass deren Einfluss auf Verbrauch direkt abzubilden ist, soweit Effekte nicht vorweggenommen werden können [248]
		Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten	• Senkung des Energiebedarfs durch gezielte Abschaltung von Produktions- und Infrastrukturanlagen • Erfassung über Zeit nur notwendig, wenn Lastspitzen relevant [211] ansonsten trivialer Zusammenhang über Betriebszeit je Betriebszustand [109] • Zusammenhang von Leistungsverlauf und Systemzuständen bei kaskadierter Schaltung von Anlagen [202] • Wechselwirkungen mit IVS zumeist vernachlässigbar, außer bei kaskadierter Schaltung • Betrachtung kann zumeist je Verbraucher erfolgen, Aktorik und Variabilität der Verbräuche eher zu vernachlässigen

Tabelle D.3: (Fortsetzung)

Planungsfall	Handlungsansatz	Abstrahierte Maßnahme	Erläuterungen
Produktionsplanung	Energiesparende Fahrweisen	Optimierte Auftragssteuerung	• Erzeugung eines günstigeren Lastgangs durch Anpassung der mittelfristigen Planung der Produktionsabläufe • Zielstellung bei Beeinflussung bezieht sich üblicherweise rein auf die Verweildauern in Betriebszuständen (Vermeidung von unproduktiven Einschaltzeiten auf Ebene der Auftragssteuerung) [85, S. 101 ff.] oder auf den Lastgang über die Zeit [84, S. 94 ff.] • Planung der Aufträge mit Bezug zu genauem Leistungsverlauf (unter Beachtung von Energieangebot) teilweise im Fokus [302] • Lastgangbetrachtungen erfordern ggf. Beachtung von dynamischem Verhalten mit IVS und zumeist Datenaggregation über Verbraucher hinweg [85, S. 101 ff.] • Einbezug von hoch variablem Verbrauch ggf. notwendig
	Reduktion von Verlustenergie	Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten	• Senkung des Energiebedarfs durch gezielte Planung der Produktion, sodass Abschaltung von Produktions- und Infrastrukturanlagen ermöglicht wird • Erfassung über Zeit nur notwendig, wenn Lastspitzen relevant [88, S. 101 ff.] ansonsten trivialer Zusammenhang über Betriebszeit je Betriebszustand [256] • Typisch sind Fragen der Losgrößen- und Kapazitätsplanung mit der Frage nach dem kumulierten oder losspezifischen Energieeinsatz [116] • Wechselwirkungen mit IVS zumeist vernachlässigbar • Betrachtung kann zumeist je Verbraucher erfolgen, Aktorik und Variabilität der Verbräuche eher zu vernachlässigen

Tabelle D.3: (Fortsetzung)

Planungsfall	**Handlungsansatz**	**Abstrahierte Maßnahme**	**Erläuterungen**
Produktionssystemplanung	Energetisch optimierte Produktgestaltung	Prozess-/ -kettenanpassung	• Senkung des Energiebedarfs durch gezielte Veränderungen der Produktgestalt und damit der bestehenden Fertigungsprozesse bzw. der Prozesskette • Dynamische Betrachtung nur bei gleichzeitiger Untersuchung von Einfluss auf Materialflusssystem zielführend [88, S. 101 ff.] • Kumulative Abbildung von Effekten auf Produktionssystem meist ausreichend, da Betrachtung des Leistungsverlaufs wenig bedeutend [303] • Einfluss auf Ablaufsteuerung zumeist nicht gegeben • Verbrauchsbetrachtung kann zumeist auf einzelne Verbraucher fokussieren, dynamisches Zusammenspiel mit IVS nicht relevant • Modellierung auf Aktorenebene kann notwendig sein, um Effekt der Anpassungen zu prognostizieren
		Veränderter Rohteil-/ Rohmaterialbedarf	• Senkung des Energieverbrauchs durch Veränderung der Rohteilform oder -materialien • Es gelten sinngemäß die gleichen Erläuterungen wie in der vorangehenden Zeile

Tabelle D.3: (Fortsetzung)

Planungsfall	**Handlungsansatz**	**Abstrahierte Maßnahme**	**Erläuterungen**
Produktionssystemplanung *(Fortsetzung)*	Steigerung des Wirkungsgrads	Prozessintegration	• Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads durch Integration mehrerer Hauptprozesse bzw. Zusammenführung von Hilfs- in Haupt- bzw. übergeordnete Hilfsprozesse • Kumulative Betrachtung von Effekten bei Anpassung der Produktionsprozesse meist ausreichend [303], daher genauer Leistungsverlauf meist vernachlässigbar [56] • Bei Integration von Hilfsprozessen ist ggf. dynamisches Verhalten im anders belasteten IVS zu untersuchen • Datenaggregation auf Verteilungsebene insbesondere zum Vergleich mit Status Quo zielführend • Veränderung der Anlagenstruktur spricht für gesonderte Modellierung einzelner Teile von Verbrauchern
		Substitution	• Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads durch Auswahl von Alternativen mit höherem Wirkungsgrad für einzelne Anlagen/-teile oder Produktionsverfahren • Kumulative Betrachtung von Effekten meist ausreichend [303], jedoch ist Einfluss auf die Infrastruktur- und Versorgungssysteme zu prüfen und ggf. dafür eine Betrachtung des Leistungsverlaufs notwendig • Umfang der Substitution ist zu prüfen, da eine Beeinflussung der Materialflüsse nicht immer vorliegt und dann eine dynamische Betrachtung der Energieflüsse nur bedingt notwendig ist (z. B. Ersatz von Elektromotor ist statisch ausreichend genau zu bewerten [304]) • Datenaggregation bzw. Untersuchung des dynamischen Zusammenwirkens bei Substitution von Energieträger ggf. zielführend • Einbezug von hoch variablem Verbrauch eher nicht notwendig

Tabelle D.3: (Fortsetzung)

Planungsfall	**Handlungsansatz**	**Abstrahierte Maßnahme**	**Erläuterungen**
Produktionssystemplanung *(Fortsetzung)*	Steigerung des Wirkungsgrads *(Fortsetzung)*	Prozesssicherheit/ Fehlerrobustheit	• Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads durch Vermeidung von Ausschuss, Fehlchargen und Nacharbeit • Kumulative Betrachtung von Effekten meist ausreichend, da Effekte sich vor allem auf den produktspezifischen Energieverbrauch auswirken und für den Leistungsverlauf oft vernachlässigbar sind [190], [240] • Abbildung komplexer Zusammenhänge von Leistungsverlauf und Systemverhalten meist nicht zielführend, da Ausschussquoten eine definierte Eingangsgröße für Betrachtung sind (ggf. in Szenarien) [240] • Einbezug von hoch variablem Verbrauch zumeist nicht notwendig
		Sophistication	• Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads durch Nutzung natürlicher Energie, Kräfte oder Effekte als Ersatz für energieverbrauchende technische Einrichtungen • Integrierte Betrachtung von Material- und Energieflüssen meist nicht zielführend, da Energieverbrauch technischer Anlagen (zumindest zeitweise) vermieden werden soll, was trivial über die Zeit skaliert oder gar keinen Einfluss auf Materialflüsse hat [14, S. 121 ff.] • Datenaggregation kann zielführend sein, bei größeren Änderungsumfängen (z. B. Ersatz mehrerer Transporteinrichtungen) • Modellierung in Aktorenebene kann notwendig sein, um Effekt der Anpassungen zu prognostizieren

Tabelle D.3: (Fortsetzung)

Planungsfall	**Handlungsansatz**	**Abstrahierte Maßnahme**	**Erläuterungen**
Produktionssystemplanung *(Fortsetzung)*	Reduktion von Verlustenergie	Veränderte Prozessparameter	• Senkung des Energiebedarfs durch Anpassung von Prozessparametern an Produktionsanlagen (ggf. Verbunden mit größeren Anpassungen der Produktionsanlagen) • Einfluss auf Materialfluss nur bei bedeutender Anpassung von Fertigungszeiten • Erfassung über die Zeit kann notwendig sein, abhängig von der genauen Zielstellung der Parameteranpassung [94, S. 94 ff.] • Beeinflussung der Parameter durch energetische Größen (z. B. langsamere Produktion bei Erreichen einer Gesamtleistung) ist denkbar • Betrachtung kann zumeist auf einzelne Verbraucher reduziert werden [122], soweit keine merklichen Auswirkungen auf IVS zu erwarten sind oder größere Aggregation erwünscht [212] • Einbezug von hoch variablem Verbrauch ggf. notwendig • Veränderung wirkt direkt auf Aktorik, sodass deren Einfluss auf Verbrauch direkt abzubilden ist, soweit Effekte nicht vorweggenommen werden können [248]
		Vermeidung von Umgebungsverlusten	• Senkung des Energiebedarfs durch Verbesserung der Isolation von Anlagen/-teilen • Betrifft zumeist Infrastruktur- und Versorgungssysteme oder die Anlagenhülle von Produktionsanlagen • Auswirkungen auf Materialfluss ergeben sich üblicherweise nicht in der Anlagennutzung, einzig in Bezug auf Übergangszeiten zwischen diskreten Zuständen ist eine Veränderung denkbar • Einsparung skaliert im eingeschwungenen Zustand (bei Erreichung der Zieltemperatur) trivial [51, S. 230] • Datenaggregation zielführend zur Bestimmung der Auswirkungen auf betroffene IVS, Systemdynamik ist hingegen nur einzubeziehen, wenn voraussichtlich IVS-Steuerung beeinflusst wird

Tabelle D.3: (Fortsetzung)

Planungsfall	Handlungsansatz	Abstrahierte Maßnahme	Erläuterungen
Produktionssystemplanung *(Fortsetzung)*	Reduktion von Verlustenergie *(Fortsetzung)*	Vermeidung von Verlustleistung	• Senkung des Energiebedarfs durch regelmäßige Wartung/Instandhaltung zur Vermeidung von Verschlechterung über Zeit • Zumeist als inkrementelle Verbesserung, die keiner genauen Vorwegbestimmung von Effekten bedarf (kumuliert oder über die Zeit) oder Maßnahmen (Planung) bedarf • Einfluss auf IVS kann zumeist vernachlässigt werden • Modellierung auf Aktorenebene zumeist nicht zielführend
Produktionsprozessplanung	Handlungsansätze entsprechend Produktionsplanung und Produktionssystemplanung, wobei insbesondere kombinierte Anpassungen von Fertigungsablauf und Materialflusssystem möglich werden. Umso mehr die Maßnahmen Aspekte des Fertigungsablaufs und des Materialflusssystems verändern, je größer kann der Mehrwert der integrierten Simulation sein.		

Anhang D.3: Charakterisierung von Experimentplanungsmethoden

Zum Zwecke der Konzeptionierung und der Systematisierung des Lösungsmoduls Experimentplanungsmethoden (vgl. Abschnitt 4.3.1) werden im Weiteren die identifizierten Lösungsvarianten hinsichtlich ihres typischen Anwendungsfokus in Simulationsstudien, ihres grundsätzlichen methodischen Ansatzes sowie der üblichen Größe des untersuchten Lösungsraums charakterisiert. Die Einschätzungen (vgl. Tabelle D.4) beruhen auf Erkenntnissen aus der systematischen Literaturanalyse (insbesondere hinsichtlich der Größe des untersuchten Lösungsraums; vgl. Abschnitt 2.3.3) sowie auf darüber hinausgehende in Literaturstudien (gemäß der Quellenangaben).

Tabelle D.4: Literaturgestützte Charakterisierung von Experimentplanungsmethoden

Experiment-planungs-methode	Anwendungsfokus in Simulationsstudien	Untersuchungs-ansatz	Größe des untersuchten Lösungsraums
Szenario-analyse	Was-Wäre-Wenn-Experimente auf Grundlage von Vorgaben des Planers bzw. in iterativen Prozessen als „systematisches Probieren“ (vgl. [19, S. 35 f.])	Ausarbeitung und Untersuchung von diskreten Szenarien für Umwelteinflüsse oder Stellgrößen, die auf Untersuchungsgegenstand wirken (vgl. [305])	meist klein (< 10 Szenarien); ggf. mit iterativen Stufen, bei denen jede Stufe nur eine kleine Anzahl von Szenarien enthält
Sensitivitäts-analyse	„Untersuchung einzelner, voneinander unabhängiger Einflußgrößen [sic]“ [20, S. 5], meist um Systemverhalten bei Variation eines einzelnen Parameters zu untersuchen	Auswahl zu untersuchender Parameter und Variation jeweils eines dieser, wobei andere unverändert bleiben (vgl. [20, S. 5])	meist nur für eine kleine Anzahl von Parametern durchgeführt, wobei die Anzahl der Parameterstufen untersuchungsabhängig zwischen wenigen und vielen variieren kann
Teil-/faktorielle Untersuchung	Untersuchung von Wechselwirkungseffekten bei Veränderung aller Einflussgrößen [20, S. 5], meist um Systemverhalten zu untersuchen oder optimale Parameter zu finden	Auswahl zu untersuchender Parameter und deren zu betrachtender Stufen, Ableitung von Kombinationsmöglichkeiten und Untersuchung aller/eines Teils der Kombinationen (vgl. [20, S. 5])	abhängig von Anzahl der Parameter (p) und deren Stufen (s); bei stets gleicher Stufenzahl dann p^s Kombinationen; teilfaktoriell entsprechend kleiner (vgl. [306, S. 9 ff.])
Methoden der statistischen Versuchsplanung	Untersuchung von Einflüssen einzelner Parameter sowie Wechselwirkungen auf das Systemverhalten mit minimalen Versuchsplänen (vgl. [131, S. 131])	gleichzeitige Variation mehrere Parameter, wobei eine eindeutige Zuordnung von Effekten durch Einsatz orthogonaler und ausgewogener Versuchspläne möglich wird (vgl. [131, S. 6 ff.])	abhängig von Anzahl der Parameter und deren Stufen; typischerweise größere Anzahl von Experimenten, wenn doch meist merklich kleiner als bei faktorieller Versuchsplanung bei gleicher Größe des Lösungsraums

Tabelle D.4: (Fortsetzung)

Experiment-planungs-methode	Anwendungsfokus in Simulationsstudien	Untersuchungs-ansatz	Größe des untersuchten Lösungsraums
Optimierung mit (Meta-) Heuristik mit summarischer Zielfunktion	Nutzung der Simulation als Bewertungsfunktion für Optimierung zur Suche nach (quasi-)optimalen Werten für Systemparameter, Produktionspläne o. ä. (vgl. Kategorie D nach [21, S. 4])	Bildung einer summarischen Zielfunktion, Festlegung eines Optimierungsziels (Minimierung/Maximierung) und Variation von Parametern mittels geeigneter (Meta-)Heuristiken zur Suche (quasi-)optimaler Parameterwerte o. ä. (vgl. z. B. [21, S. 9 ff.])	meist groß; abhängig von Anzahl von Parametern, deren Stufen und Konvergenzgeschwindigkeit der eingesetzten Heuristik (vgl. [278])
Optimierung mit multikriterieller (Meta-) Heuristik	Analog zu voranstehendem Ansatz, allerdings wird nicht nach (quasi-)optimalen Lösungen hinsichtlich einer summarischen Zielfunktion gesucht, sondern nach einer gut verteilten Menge von auf einer Pareto-Front befindlichen Lösungen (vgl. z. B. [307])	Auswahl von Zielkriterien, Festlegung je eines Optimierungsziels und Variation von Parametern mittels geeigneter multikriterieller (Meta-)Heuristik, wobei einzelne Kriterien unabhängig voneinander optimiert werden (vgl. z. B. [184])	analog zu voranstehendem Ansatz
Untersuchung als kombiniertes MADM-MODM-Problem	Untersuchung komplexer Handlungsansätze kombiniert mit Analysen des Systemverhaltens (vgl. [184])	Betrachtung der komplexen Handlungsansätze als Parameter oder Dekomposition in sequenziell zu lösende Probleme (vgl. [184])	meist groß; analog zu voranstehenden Ansätzen

Anhang D.4: Bewertungsvorschläge zum Lösungsmodul Energiemodell

Aus der vorhandenen Literatur können Rückschlüsse über die tendenzielle Erfüllung der Zielkriterien je Energiemodell für die Auswahl eines geeigneten Energiemodells mittels des in Abschnitt 4.3.2 eingeführten Lösungsmoduls abgeleitet werden. Eine absolute Skalendefinition ist dabei weder zielführend noch in einfacher Weise zu realisieren, nicht zuletzt, da die im Lösungsmodul betrachteten Lösungsvarianten repräsentativ für eine Menge von darunter einzuordnenden Realisierungsmöglichkeiten steht. Um dennoch eine Abschätzung vornehmen zu können, werden zunächst in Tabelle D.5 die Entscheidungskriterien genauer hinsichtlich der einbezogenen und aus der Literatur zu entnehmenden Bewertungsaspekte dargestellt. Anschließend werden Bewertungsvorschläge für die einzelnen Energiemodelle eingeführt. Am Ende des Abschnitts ist überdies die entwickelte Tabellenkalkulation für die in Abschnitt 5.3.3 vorgestellte Fallstudie gezeigt.

Tabelle D.5: Kriterien und Aspekte zur Bewertung für Lösungsmodul Energiemodell

Entscheidungs-kriterien	**Aspekte zur Bewertung der Lösungsvarianten**
Daten-beschaffungs-aufwand	• Menge und Genauigkeit von zu beschaffenden Rohdaten für Datenaufbereitung [23, S. 135 ff.] • Eignung unterschiedlicher Ermittlungsverfahren zur Erhebung von Rohdaten [88, S. 67 ff.] • Anforderungen an und Umfang von Datenaufbereitung zur Überführung von Rohdaten in aufbereitete Daten [88, S. 72 ff.] • Verfügbarkeit von Daten in bestehenden Quellen (z. B. Life-Cycle-Inventory-Datenbanken, Maschinen-Dokumentation usw.) [101]
Modell-erstellungs-aufwand	• Anforderungen an und Umfang der notwendigen Erweiterungen für typische Materialflusssimulation zur Modellierung der Energieflüsse (vgl. z. B. [23, S. 97 ff.], [88, S. 86 ff.], [97, S. 116 ff.], [101], [176]) • Zusätzliche Aufwände, die sich durch Kopplung unterschiedlicher Simulationssysteme bzw. -ansätze ergeben (z. B. [126], [186], [213])

Tabelle D.5: (Fortsetzung)

Entscheidungs-kriterien	Aspekte zur Bewertung der Lösungsvarianten
Verifikations- und Validierungs-aufwand	• Art und Weise der zu betreibenden Verifikation und Validierung (je Element oder für Gesamtsystem [200]; eingesetzte Technik zur Verifikation und Validierung [211]; Kennzahlen zur Prüfung der Übereinstimmung [z. B. Fehler bezogen auf Leistungs-verlauf oder auf summarischen Verbrauch] [106], [200]) • Menge der zu verifizierenden/validierenden Daten/-reihen
Simulations-aufwand	• Einfluss auf Laufzeitverhalten der Materialflusssimulation [128] • Anforderungen an Datenhaltung, -aufbereitung und -datenaus-wertung
Realitätstreue des Energiefluss-modells	• Genauigkeit in der Abbildung von Leistungsverlauf [88, S. 72 ff.] • Genauigkeit in der Abbildung von Energiebedarf in einem Zeit-fenster [88, S. 72 ff.] • Genauigkeit in der Abbildung von Umweltwirkungen • Möglichkeit des Einbezugs etwaiger Abhängigkeiten mit Para-metern (etwa verringerte Last bei verringerter Produktions-leistung)
Abbildungs-möglichkeiten Infrastruktur	• Möglichkeit zur Abbildung von Infrastrukturelementen in ihrem Verhalten [101] • Genauigkeit der Abbildung von Infrastruktur
Abbildungs-möglichkeiten Aktorik	• Möglichkeit zur Abbildung einzelner Aktoren in ihrem Verhal-ten [308] • Genauigkeit der Abbildung von Aktoren
Flexibilität für Experimentieren	Der Flexibilität wirken entgegen: • Einschränkungen in der Nutzung der Simulation (Modell-parameter, die unverändert bleiben müssen, um Validität des parametrierten Energiemodells zu erhalten) • Notwendiger Aufwand zur Vergrößerung der Menge veränder-barer Modellparameter (z. B. mittels Beschaffung von Daten für unterschiedliche Betriebsgeschwindigkeiten)

Eine relative Einschätzung der Lösungsvarianten für die Modellierung typischer diskreter Produktionssysteme gemäß der angeführten Aspekte und Erkenntnisse aus der Analyse dokumentierter Lösungsansätze (insbesondere nach [88, S. 72 ff.]) findet sich in Tabelle D.6.

Tabelle D.6: Einschätzung der Lösungsvarianten bezüglich der Entscheidungskriterien

Kriterium	Äquivalente	BZ mit Durchschnittsleistung	BZ mit Leistungsverläufen	BZ mit mathematischen Ersatzmodellen	Kontinuierliches/ physikalisches Modell	Rein Betriebszustände
Datenbeschaffungsaufwand	0	↑	↑↑	↑	0	↓↓
Modellerstellungsaufwand	↓	0	↑	↑	↑↑	↓↓
Verifikations- und Validierungsaufwand	↓	0	↑↑	↑	↑↑	↓↓
Simulationsaufwand	↓	0	↑	↑	↑↑	↓↓
Realitätstreue des Energieflussmodells	↓	0	↑↑	↑	↑↑	↓↓
Abbildungsmöglichkeiten Infrastruktur	↓	0	↑	↑	↑↑	↓↓
Abbildungsmöglichkeiten Aktorik	↓↓	0	↑	↑	↑↑	↓↓
Flexibilität für Experimentieren	↓	↑	↓↓	↓	↑	↑↑

Legende:

↓↓	deutlich geringer im Vergleich zu anderen Lösungsvarianten
↓	geringer im Vergleich zu anderen Lösungsvarianten
0	geringer als einige Lösungsvarianten, aber auch höher als andere
↑	höher im Vergleich zu anderen Lösungsvarianten
↑↑	deutlich höher im Vergleich zu anderen Lösungsvarianten

Zur Anwendung des AHP im Rahmen des Lösungsmoduls Energiemodell wurde eine Priorisierung für das zugrundeliegende Zielsystem (vgl. Abbildung 4.7) vorgenommen. Die jeweils angenommenen Gewichtungen für die paar-

weisen Vergleiche sind in den Tabelle D.7, Tabelle D.9 und Tabelle D.10 gezeigt. Die Priorisierung der Primärkriterien erfolgte auf Grundlage von Gesprächen mit anderen Simulationsexperten und unter Rückgriff auf Projekterfahrungen des Autors.

Tabelle D.7: Gewichtung der Primärkriterien zur Bewertung von Lösungsvarianten für die Auswahl von Energiemodell

Kriterien	**Aufwand**	**Detaillierungsfähigkeit**	**Flexibilität für Experimentieren**	**Priorität**
Aufwand	1	2	3	0,528
Detaillierungsfähigkeit	1/2	1	3	0,333
Flexibilität für Experimentieren	1/5	1/5	1	0,140
			Consistency Index (*CI*)	0,0268
			Random Index (*RI*)	0,5800
			Consistency Ratio (*CR*)	0,0462

Die Priorisierung der Sekundärkriterien zu Aufwand erfolgte auf Grundlage der Erkenntnisse von Acél zur Aufwandsverteilung in Simulationsstudien. Dazu wurden die in [309, S. 10] gezeigten Kategorien entsprechend der hier betrachteten Sekundärkriterien gruppiert, eine summarische Aufwandsabschätzung vorgenommen und daraus eine Rangfolge (aufsteigend nach Aufwand) abgeleitet, siehe Tabelle D.8. Diese zusammengenommen waren Grundlage des paarweisen Vergleichs in Tabelle D.9, wobei größerer Aufwand und höherer Rang mit größerer Bedeutung gleichgesetzt wurde.

Tabelle D.8: Aufwandsabschätzung und Rangfolge nach [309, S. 10]

	Kategorien nach Acél	Aufwands-abschätzung			Rangfolge nach Aufwand		
		min	med	max	min	med	max
Datenbe-schaffung	• Datenerhebung	12	18	50	4	4	4
Modell-erstellung	• Modellerstellung	4	8	10	1	1	1
Verifikation und Validierung	• Verifizierung • Validierung	8	12	16	2	2	2
Simulation	• Versuchsplanung • Variation • Interpretation	11	15	23	3	3	3

Tabelle D.9: Gewichtung der Sekundärkriterien für Aufwand

Kriterien	Datenbe-schaffung	Modell-erstellung	Verifikation und Validierung	Simulation	Priorität
Datenbe-schaffung	1	9	5	3	0,581
Modell-erstellung	1/9	1	1/3	1/5	0,050
Verifikation und Validierung	1/5	3	1	1/3	0,114
Simulation	1/3	5	3	1	0,255
				Consistency Index (*CI*)	0,0254
				Random Index (*RI*)	0,9000
				Consistency Ratio (*CR*)	0,0283

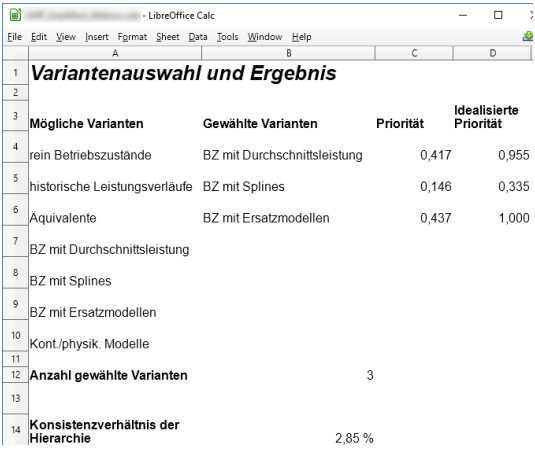
Die Priorisierung der Sekundärkriterien für die Detaillierungsfähigkeit beruht wiederum auf Erkenntnissen der Literaturanalyse. Diese hat gezeigt, dass die Abbildung von Infrastruktur teilweise und die der Aktorik nur selten erfolgte und daher beide in Abstufung der Einsatzhäufigkeit als weniger wichtig gegenüber der Realitätstreue eingeschätzt werden.

Tabelle D.10: Gewichtung der Sekundärkriterien für Detaillierungsfähigkeit

Kriterien	Realitätstreue	Abbildung Infrastruktur	Abbildung Aktorik	Priorität
Realitätstreue	1	5	7	0,731
Abbildung Infrastruktur	1/5	1	3	0,188
Abbildung Aktorik	1/7	1/3	1	0,081
			Consistency Index (*CI*)	0,0324
			Random Index (*RI*)	0,5800
			Consistency Ratio (*CR*)	0,0559

Die in Tabelle 4.12 gezeigten globalen Prioritäten ergeben sich wiederum aus der Multiplikation der Prioritäten der assoziierten Primär- und Sekundärkriterien (siehe auch Abbildung D.3).

Alle vorangehend erläuterten Ergebnisse wurden mittels einer eigens entwickelten Tabellenkalkulation erfasst bzw. berechnet. Zu deren Anwendung ist zunächst in einer Eingabemaske eine Auswahl der einzubeziehenden Lösungsvarianten zu treffen (vgl. Abbildung D.1). Anschließend sind paarweise Vergleiche analog zu der in Abbildung D.2 dargestellten Form durchzuführen. Dazu existiert je eine Matrix für die Priorisierung der Lösungsvarianten je angeführtem Kriterium sowie zur Priorisierung der Kriterien untereinander. In Abbildung D.3 ist wiederum die zusammenfassende Berechnung der Prioritäten und der Konsistenzprüfung gezeigt. Abschließend werden die Ergebnisse neben den vorausgewählten Lösungsvarianten gezeigt, hier für die Fallstudie in Abschnitt 5.3.3.



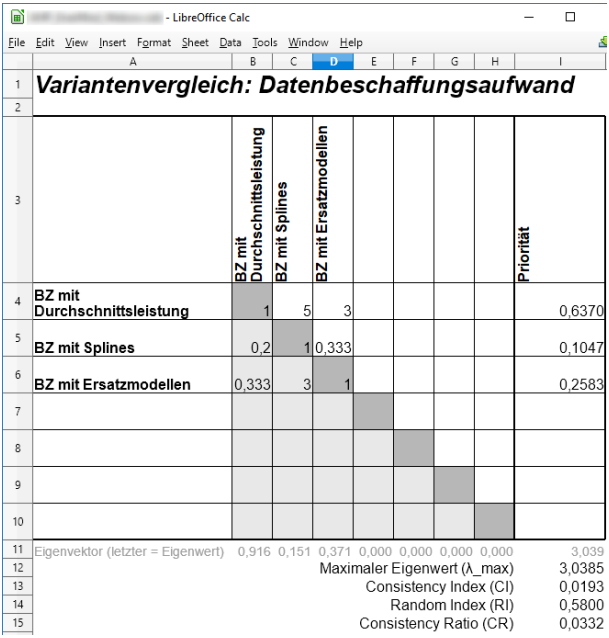
- LibreOffice Calc

File Edit View Insert Format Sheet Data Tools Window Help

Variantenauswahl und Ergebnis

Mögliche Varianten	Gewählte Varianten	Priorität	Idealisierte Priorität
rein Betriebszustände	BZ mit Durchschnittsleistung	0,417	0,955
historische Leistungsverläufe	BZ mit Splines	0,146	0,335
Äquivalente	BZ mit Ersatzmodellen	0,437	1,000
BZ mit Durchschnittsleistung			
BZ mit Splines			
BZ mit Ersatzmodellen			
Kont./physik. Modelle			
Anzahl gewählte Varianten		3	
Konsistenzverhältnis der Hierarchie		2,85 %	

Abbildung D.1: Vorauswahl von Lösungsvarianten und Ergebnisdarstellung in entwickelter Tabellenkalkulation



- LibreOffice Calc

File Edit View Insert Format Sheet Data Tools Window Help

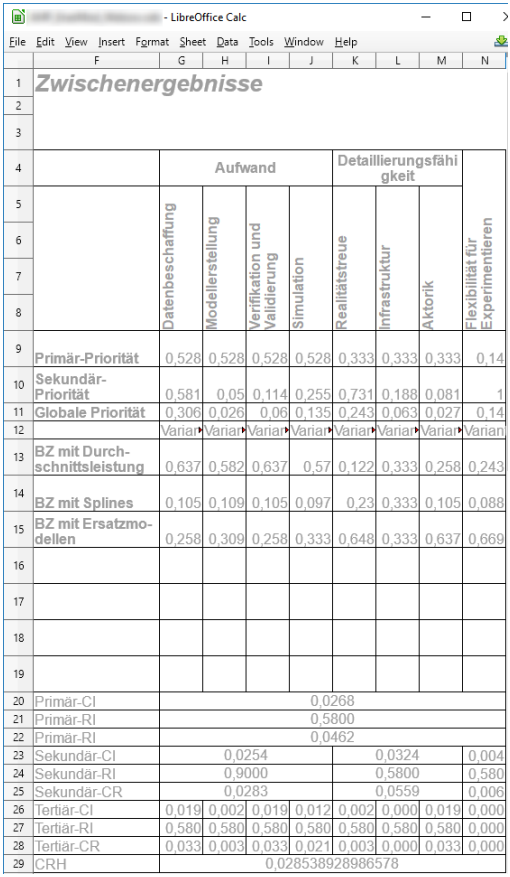
Variantenvergleich: Datenbeschaffungsaufwand

	BZ mit Durchschnittsleistung	BZ mit Splines	BZ mit Ersatzmodellen	Priorität
BZ mit Durchschnittsleistung	1	5	3	0,6370
BZ mit Splines	0,2	1	0,333	0,1047
BZ mit Ersatzmodellen	0,333	3	1	0,2583

Eigenvektor (letzter = Eigenwert) 0,916 0,151 0,371 0,000 0,000 0,000 0,000 3,039

Maximaler Eigenwert (λ_max)	3,0385
Consistency Index (CI)	0,0193
Random Index (RI)	0,5800
Consistency Ratio (CR)	0,0332

Abbildung D.2: Variantenvergleich für Kriterium Datenbeschaffungsaufwand in entwickelter Tabellenkalkulation



Zwischenergebnisse

		Aufwand				Detaillierungsfähigkeit			
		Datenbeschaffung	Modellerstellung	Verifikation und Validierung	Simulation	Realitätstreue	Infrastruktur	Aktorik	Flexibilität für Experimentieren
	Primär-Priorität	0,528	0,528	0,528	0,528	0,333	0,333	0,333	0,14
	Sekundär-Priorität	0,581	0,05	0,114	0,255	0,731	0,188	0,081	1
	Globale Priorität	0,306	0,026	0,06	0,135	0,243	0,063	0,027	0,14
		Varian	Varian	Varian	Varian	Varian	Varian	Varian	Varian
	BZ mit Durchschnittsleistung	0,637	0,582	0,637	0,57	0,122	0,333	0,258	0,243
	BZ mit Splines	0,105	0,109	0,105	0,097	0,23	0,333	0,105	0,088
	BZ mit Ersatzmodellen	0,258	0,309	0,258	0,333	0,648	0,333	0,637	0,669
	Primär-CI	0,0268							
	Primär-RI	0,5800							
	Primär-RI	0,0462							
	Sekundär-CI	0,0254				0,0324			0,004
	Sekundär-RI	0,9000				0,5800			0,580
	Sekundär-CR	0,0283				0,0559			0,006
	Tertiär-CI	0,019	0,002	0,019	0,012	0,002	0,000	0,019	0,000
	Tertiär-RI	0,580	0,580	0,580	0,580	0,580	0,580	0,580	0,000
	Tertiär-CR	0,033	0,003	0,033	0,021	0,003	0,000	0,033	0,000
	CRH	0,028538928986578							

Abbildung D.3: Zwischenergebnisse der Berechnung von Prioritäten und Konsistenzprüfung in entwickelter Tabellenkalkulation

Anhang D.5: Erläuterungen zum Lösungsmodul Werkzeug/-architektur

Die Einschätzung der Eignung der unterschiedlichen Architekturansätze folgt aus den in Tabelle D.11 erläuterten Anforderungen, die von den grundsätzlichen Energiemodellen ausgehen. Diese Zusammenstellung basiert auf den Simulationsarbeiten, die in der Literaturanalyse identifiziert wurden (vgl. Anhang A). Im Anschluss werden zudem die Architekturansätze genauer charakterisiert und hinsichtlich ausgewählter Kriterien bewertet.

Tabelle D.11: Anforderungen der Energiemodelle an Simulationsumgebung

Energie-modell	Anforderungen an Simulationsumgebung
Äqui-valente	• Ermittlung von Verbrauch des Äquivalents (CO_2, Kosten usw.) über Bezugsgrößen (Zeit, Stück, Ereignisse usw.) • Definierte Bezugsgrößen der Äquivalente müssen zur Berechnung verfügbar gemacht werden (Erfassung und Export oder simulations-begleitende Berechnung) • Verlauf über Zeit ist üblicherweise vernachlässigbar oder erfordert keine hohe Genauigkeit über einen Simulationslauf hinweg • Keine Anforderungen an Modellierung von Wechselwirkungen, da Äquivalente zumeist nur zu erfassen sind
BZ mit Durch-schnitts-leistung	• Ermittlung von Energieverbrauch/Leistungsaufnahme über Zuord-nung von Durchschnittsleistung zu Betriebszustand • Betriebszustände sind als Berechnungsgrundlage notwendig; ggf. mehr Zustände relevant als in Simulationswerkzeugen für Materialfluss-zustände vordefiniert • Verlauf über Zeit kann relevant sein, stellt aber per se nur eine geglät-tete Näherung dar (keine hohe Genauigkeit notwendig) • Berechnung von Gesamtverbrauch, soweit notwendig, kann bei Wechseln der Betriebszustände erfolgen • Berechnung von Energieverbrauch kann auch nachträglich erfolgen • Bidirektionale Wechselwirkungen sind mitunter notwendig zur Model-lierung von Erzeugerverhalten
BZ mit Leistungs-verläufen	• Ermittlung von Energieverbrauch/Leistungsaufnahme über Zuord-nung von Durchschnittsleistung sowie von Zeitreihe mit Leistungs-werten zu Betriebszustand, die eine Diskretisierung vorgibt • Mitunter auch Zeitreihen mit partiellen Funktionen zur Leistungs-zuordnung statt Leistungswerten genutzt; erfordert dann zwangsweise Diskretisierung oder kontinuierliche Simulation • Betriebszustände sind als Berechnungsgrundlage notwendig; ggf. mehr Zustände relevant als in Simulationswerkzeugen für Materialfluss-zustände vordefiniert • Verlauf über Zeit ist relevant und erfordert ausreichende Genauigkeit, sodass über Zustandswechsel hinaus zusätzliche Berechnungs- bzw. Aktualisierungsereignisse notwendig werden; eine nachträgliche Berechnung ist meist nicht zielführend • Berechnung von Gesamtverbrauch, soweit notwendig, muss in geeigne-tem zeitlichen Raster erfolgen (siehe auch voranstehenden Anstrich) • Bidirektionale Wechselwirkungen sind mitunter notwendig zur Model-lierung von Erzeugerverhalten

Tabelle D.11: (Fortsetzung)

Energie-modell	Anforderungen an Simulationsumgebung
BZ mit mathematischen Ersatz-modellen	• Ermittlung von Energieverbrauch/Leistungsaufnahme über Zuordnung von Durchschnittsleistung zu Betriebszustand sowie als Funktion in Abhängigkeit der Zeit ab Eintritt in Betriebszustand, die eine weitere Diskretisierung oder kontinuierliche Simulation erfordern • Betriebszustände sind als Berechnungsgrundlage notwendig; ggf. mehr Zustände relevant als in Simulationswerkzeugen für Materialfluss-zustände vordefiniert • Verlauf über Zeit ist relevant und erfordert ausreichende Genauigkeit, sodass über Zustandswechsel hinaus zusätzliche Berechnungs- bzw. Aktualisierungsereignisse notwendig werden; eine nachträgliche Berechnung ist zumeist nicht zielführend • Berechnung von Gesamtverbrauch, soweit notwendig, muss in geeignetem zeitlichen Raster erfolgen (siehe auch voranstehenden Anstrich) • Bidirektionale Wechselwirkungen sind mitunter notwendig zur Modellierung von Erzeugerverhalten
Kontinuierliches/ physikalisches Modell	• Ermittlung von Energieverbrauch/Leistungsaufnahme über kontinuierliche Funktionen oder physikalische Modelle, bei denen Diskretisierung zumeist nicht zielführend ist • Verlauf über Zeit ist relevant und erfordert ausreichende Genauigkeit • Unidirektionale Wechselwirkungen zwischen Material- und Energiefluss sind abzubilden; bidirektionale sind mitunter ebenso zu beachten
Rein Betriebs-zustände	• Keine Ermittlung von Energieverbräuchen bzw. Leistungsaufnahme • Einzig die Erfassung von Betriebszuständen bzw. deren Anteil an Simulationsdauer ist notwendig

Die nachstehende Tabelle D.12 beschreibt die einzelnen Architekturansätze. Dabei wird auf den grundsätzlichen Aufbau der Simulationsumgebung und die typische Modellierung der Energieflüsse mit dem Ansatz eingegangen. Diese Informationen wurden überwiegend aus der Literaturanalyse abgeleitet bzw. entstammen der Diskussion mit Fachexperten, insbesondere der ASIM Arbeitsgruppe „Betrachtung energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik“. Weiterhin wird auf dieser Basis eine qualitative Einschätzung bezüglich der Kriterien Modellierungsaufwand, Simulationsaufwand und Flexibilität für Experimentieren für die jeweiligen Architekturansätze geben.

Tabelle D.12: Beschreibung der Architekturansätze

Architekturansatz	**Beschreibung**
Materialflusssimulation mit Auswertung von Ersatzgrößen	• Konventionelle Materialflusssimulation [109] • Betrachtung energetischer Effekte wird auf Ersatzgrößen reduziert, dadurch keine Quantifizierung der Energieverbräuche, lediglich von damit korrelierenden Größen (z. B. Anteil von Betriebszuständen über Zeit) • Kein zusätzlicher Aufwand für Modellerstellung • Kein Einfluss auf Laufzeitverhalten oder folgende Auswertungen • Keine Einschränkungen für Parametrierung von Experimenten
Materialflusssimulation mit nachgelagerter Auswertung von Energie-Kennzahlen	• Konventionelle Materialflusssimulation mit nachgelagerter Berechnung energetischer Kennzahlen bzw. Äquivalente, z. B. mittels Tabellenkalkulation [106] • Betrachtung energetischer Effekte muss reproduzierbar aus Ergebnisdaten von Simulation ermöglicht werden, z. B. Umrechnung von Zeitanteil je Betriebszustand in Gesamtverbrauch • Zusätzlicher Aufwand für Entwicklung der nachgelagerten Berechnung und ggf. der Datenschnittstellen • Abbildung von Verläufen oder physikalischen Zusammenhängen nur schwer zu realisieren • Kein Einfluss auf Laufzeitverhalten, aber zusätzlicher Aufwand für Datenübertragung in nachgelagerte Berechnung und Ausführung dieser, ggf. auch zusätzlicher Aufwand für anschließende Auswertung • Parameteränderungen dürfen Validität der Energieberechnung nicht verändern, andernfalls sind immer Simulationsmodell und nachgelagerte Berechnung zu aktualisieren

Tabelle D.12: (Fortsetzung)

Architektur-ansatz	Beschreibung
Materialfluss-simulation mit integrierter Energie-bewertung	• Konventionelle Materialflusssimulation, die zur gleichzeitigen Simulation von Energieflüssen erweitert wird [90] • Betrachtung der Energieflüsse erfolgt durch Diskretisierung der Verbrauchsprofile in gleichgroße oder auch verschieden große Zeiteinheiten • Abbildung von nicht statischen Verbräuchen ist aufgrund der Diskretisierung nicht oder nur unter Vereinfachung möglich (z. B. indem Verlauf zwischen zwei Ereignissen erst nachträglich ermittelt und evtl. darin auftretende simulationsrelevante Situationen, wie Engpässe, erst nachträglich Beachtung finden) • Abbildung physikalischer oder kontinuierlicher Zusammenhänge nur schwer oder unter Vereinfachung zu realisieren • Modellerstellungsaufwand ist erhöht, da zusätzlich Energieverbräuche, Übergangszeiten zwischen Betriebszuständen usw. zu parametrieren sind und ggf. auch zusätzliche Funktionalitäten zur Modellierung der Energieflüsse zu entwickeln sind (soweit nicht in Software vorhanden) • Laufzeitverhalten verschlechtert sich mit der Menge zusätzlicher Ereignisse/Berechnungen für die Simulation der Energieflüsse, dafür kann eine Verarbeitung der Energiedaten unmittelbar während der Simulation erfolgen • Parametrierung kann vollständig innerhalb eines Modells erfolgen, sodass flexibles Experimentieren möglich ist, unter der Maßgabe, dass valide Parameterkombinationen für Materialfluss und Energiefluss erhalten bleiben (z. B. Bearbeitungsgeschwindigkeit und Energieverbrauch im zur Bearbeitung gehörigen Betriebszustand)

Tabelle D.12: (Fortsetzung)

Architekturansatz	Beschreibung
Mehrere Simulationsmodelle mit Offline-Kopplung	• Konventionelle Materialflusssimulation mit vor- bzw. nachgelagerter Berechnung von Energieflüssen in einer anderen Simulation • Betrachtung der Energieflüsse erfolgt entsprechend der zweiten eingesetzten Simulationsmethode, typischerweise kontinuierliche oder zeitdiskrete Simulation • Abbildung von komplexen Zusammenhängen ist zumeist möglich, soweit die notwendigen Daten aus der Materialflusssimulation und der gesonderten Simulation möglich ist • Wechselwirkungen zwischen Material- und Energieflusssimulation können nur unidirektional sein, da beide Simulationen unabhängig voneinander durchgeführt werden • Höherer Modellerstellungsaufwand zur Entwicklung mehrerer Simulationsmodelle sowie zur Realisierung eines Datenex- und -imports • Höherer Simulationsaufwand durch zusätzliche Datenübertragung, unabhängige Simulationsläufe usw. • Flexibilität ist eingeschränkt, da stets Parametrierung mehrerer Modelle erfolgen muss und eine Automatisierung der Simulationsexperimente sowie -auswertung erschwert wird
Mehrere Simulationsmodelle mit Online-Kopplung	• Konventionelle Materialflusssimulation mit direkt verbundener Berechnung von Energieflüssen mittels einer anderen Simulation [213] • Betrachtung der Energieflüsse erfolgt entsprechend der zweiten eingesetzten Simulationsmethode, typischerweise kontinuierliche oder zeitdiskrete Simulation • Abbildung von komplexen Zusammenhängen ist möglich und typischerweise auch Hauptgrund für diesen Ansatz • Wechselwirkungen zwischen Material- und Energieflusssimulation können uni- oder auch bidirektional sein • Höherer Modellerstellungsaufwand zur Entwicklung mehrerer Simulationsmodelle sowie zur Realisierung eines Datenaustauschs zur Laufzeit • Höherer Simulationsaufwand durch zusätzliche Datenübertragung, gekoppelte Simulationsläufe, ggf. erzwungene Zeitdiskretisierung usw. • Flexibilität ist eingeschränkt, da stets Parametrierung mehrerer Modelle erfolgen muss und eine Automatisierung der Simulationsexperimente schwieriger wird, wobei jedoch die Auswertung durch die notwendige Integration der Simulationen zumeist einfacher ist

Tabelle D.12: (Fortsetzung)

Architektur-ansatz	Beschreibung
Simulations-werkzeug mit mehreren Si-mulationsme-thoden	• Kombination mehrerer Simulationsansätze in einer Simulations-software, z. B. Materialflusssimulation und kontinuierliche Simula-tion [97] • Betrachtung von Energieflüssen kann auf Grundlage des anderen Simulationsansatzes erfolgen, z. B. kontinuierlich • Abbildung komplexer Zusammenhänge und nicht statischer Ver-bräuche wird vereinfacht, wobei die Simulationssoftware Interakti-onsmöglichkeiten der unterschiedlichen Simulationsmethoden z. T. vorbestimmt • Wechselwirkungen zwischen Material- und Energieflusssimulation können uni- oder auch bidirektional sein • Modellerstellungsaufwand ist unwesentlich erhöht, da Werkzeug zum Einsatz mehrerer Simulationsmethoden vorbereitet ist • Simulationsaufwand geringer als bei Eigenentwicklungen zur Diskretisierung von Energieflüssen, da andere Methode in Simula-tionsengine unterstützt wird; Verarbeitung und Auswertung von Energiedaten kann zusammen mit Materialflussdaten im selben Modell bzw. aus diesem heraus erfolgen • Flexibilität ist gut, da Parametrierung in einem Modell erfolgen kann und auch eine Automatisierung einfacher möglich ist; bei Abbildung physikalischer Zusammenhänge zur Modellierung der Energieflüsse verringern sich auch Anforderungen an Parametrierung

Eine zusammenfassende Übersicht der vorangegangenen Einschätzung zu den Kriterien Modellerstellungsaufwand, Simulationsaufwand und Flexibilität für Experimentieren ist in Tabelle D.13 gezeigt.

Tabelle D.13: Einschätzung der Architekturansätze hinsichtlich ausgewählter Kriterien

Kriterium	**Auswertung von Ersatzgrößen**	**Nachgelagerte Auswertung von Energie-Kennzahlen**	**Integrierte Bewertung**	**Offline-Kopplung**	**Online-Kopplung**	**Werkzeug mit mehreren Simulationsmethoden**
Modellerstellungsaufwand	↓↓	↓	↑	↑↑	↑↑	0
Simulationsaufwand	↓↓	0	0	↑↑	↑↑	↓
Flexibilität für Experimentieren	↑↑	0	↑	↓↓	↓	↑

Legende:

↓↓	deutlich geringer im Vergleich zu anderen Lösungsvarianten
↓	geringer im Vergleich zu anderen Lösungsvarianten
0	geringer als einige Lösungsvarianten, aber auch höher als andere
↑	höher im Vergleich zu anderen Lösungsvarianten
↑↑	deutlich höher im Vergleich zu anderen Lösungsvarianten

Ausgehend von den vorangehenden Erläuterungen findet sich in Tabelle D.14 eine Einschätzung der Eignung der Architekturansätze für die Umsetzung der verschiedenen Energiemodelle.

Tabelle D.14: Eignung der Architekturansätze für Modellierung der Energiemodelle

Architekturansatz	Äquivalente	BZ mit Durchschnittsleistung	BZ mit Leistungs-verläufen	BZ mit mathematischen Ersatzmodellen	Kontinuierliches/ physikalisches Modell	Rein Betriebszustände
Auswertung von Ersatzgrößen	-	-	-	-	-	+++
Nachgelagerte Auswertung von Energie-Kennzahlen *)	-/++	-/++	-	-	-	-
Integrierte Bewertung	+++	+++	+++	++	+	-
Offline-Kopplung *)	-/+	-/+	-/+	-/++	-/+++	-
Online-Kopplung	+	+	+	++	+++	-
Werkzeug mit mehreren Simulationsmethoden	+++	+++	++	+++	+++	-

Legende:
- \- ungeeignet
- \+ geeignet
- ++ gut geeignet
- +++ sehr gut geeignet

Erläuterungen:
*) Sind bidirektionale Wechselwirkungen zu modellieren, ist dieser Architekturansatz ungeeignet.

Anhang D.6: Charakterisierung von Energiedatenakquisemethoden

In der folgenden Tabelle D.15 werden die identifizierten Methoden zu Energiedatenakquise hinsichtlich ihres Grundanliegens und ihrer Möglichkeiten zur Rohdatenbeschaffung beschrieben. Dazu wird exemplarisch auch auf ausgewählte, in der Literatur vorhandene Forschungsansätze eingegangen.

Tabelle D.15: Charakterisierung der Energiedatenakquisemethoden

Energiedaten-akquisemethode	Beschreibung
Herstellerangaben	• Unmittelbare Nutzung von Herstellerangaben zu Äquivalenten, Durchschnittsleistungen, Leistungsverläufen oder analytischen/physikalischen (vereinfachten) Modellen • Nennleistung wird für alle Maschinen zur Verfügung gestellt [101] • Ansätze zum Vergleich von Produktionsanlagen in Analogie zur Energieverbrauchskennzeichnung existieren [310], [311] • Möglichkeiten zur modellhaften Abbildung des Energieverbrauchs von Produktionsanlagen für Planungssoftware wurden seitens der Industrie bereits untersucht [208] • Bereitstellung von Simulationsmodellen durch den Hersteller ist grundsätzlich denkbar • Leistungsverläufe für konkrete Prozesse können nur durch Hersteller bereitgestellt werden, wenn Standardabläufe existieren oder der Hersteller zuvor über genaue Angaben zum Maschinenprogramm verfügt • Ansätze zur Zergliederung von Energielastprofilen in einzelne Bausteine können auch unter Nutzung von Herstellerangaben realisiert werden [312] • Erlaubt Datenakquise auch ohne Zugriff auf Systemelemente (Messungen)
LCI-Datenbanken	• Nutzung von LCI-Datenbanken zur Ermittlung von Äquivalenten • Datenbanken mit unterschiedlichem Inhalt (z. B. CO_2-Äquivalent, Energiebedarf etc.) auf kostenloser oder proprietärer Basis möglich [101] • Datenverfügbarkeit häufig vom Fokus der Datenbankersteller abhängig, sodass mitunter keine Daten für ausgewählte Prozesse, Materialien oder Produkte auffindbar [101] oder nur bedingt übertragbar auf zu simulierende Prozesse sind • Erlaubt Datenakquise auch ohne Zugriff auf Systemelemente (Messungen)

Tabelle D.15: (Fortsetzung)

Energiedaten-akquisemethode	Beschreibung
Analytisches/ physikalisches Modell	• Mathematisch formulierte analytische bzw. auch physikalische Modelle, die für jede Parametrierung die unmittelbare Berechnung eines Wertes erlauben • Beziehen sich häufig konkret auf einzelne technische Prozesse, wobei periphere Verbraucher von Anlagen meist vernachlässigt werden [176], [313] • Abhängig von der Art der Modellierung können Aussagen für Leistung (über die Zeit) oder auch nur über Gesamtverbrauch in einem Zeitintervall möglich sein • Entwicklung der Modelle und deren Implementation in Berechnung kann sehr aufwändig sein [88, S. 69] • Derartige Simulationsmodelle können unmittelbar mit Materialflusssimulation gekoppelt werden • Erlaubt Datenakquise auch ohne Zugriff auf Systemelemente (Messungen)
Numerische Simulation	• Simulation des Maschinen- und Anlagenverhaltens mit numerischen Methoden, wobei nicht notwendigerweise das korrekte physikalische Verhalten modelliert werden muss, sondern vor allem eine Näherung für energetisches Verhalten relevant ist • Aufbau und Durchführung von Simulation für Bestimmung von Äquivalenten oder Durchschnittsleistungen unzweckmäßig • Entwicklung der Simulation inklusive Modellierung kann sehr aufwändig sein [88, S. 69] • Derartige Simulationsmodelle können unmittelbar mit Materialflusssimulation gekoppelt werden • Erlaubt Datenakquise auch ohne Zugriff auf Systemelemente (Messungen)
Historische Messungen	• Rückgriff auf Messungen der Vergangenheit • Soweit Messbedingungen nicht bekannt sind, können Ergebnisse leicht verfälscht sein • Zuordnung von Betriebszuständen mitunter schwierig zu realisieren • Typische Äquivalente (z. B. CO_2-Äquivalent) können nicht unmittelbar gemessen werden • Erlaubt Datenakquise auch ohne Zugriff auf Systemelemente (neue Messungen)

Tabelle D.15: (Fortsetzung)

Energiedaten-akquisemethode	Beschreibung
Spot-Messungen	• Durchführung von Messungen auf temporärer Basis • Hohe Genauigkeit kann erreicht werden [88, S. 69], insbesondere wenn SPS-Variablen ebenfalls erfasst und korreliert werden [90, S. 95] • Typische Äquivalente (z. B. CO_2-Äquivalent) können nicht unmittelbar gemessen werden • Zugang zu Maschinen oder Anlagen ist notwendig, daher kann Datenakquise nur erfolgen, wenn Maschine bereits vorhanden ist und Zugriff im normalen Betrieb realisiert werden kann • Datenaufnahme muss so erfolgen, dass ausreichend Messreihen zur Bestimmung valider Durchschnittsleistung oder Leistungsverläufe bzw. zur Ableitung korrekter Ersatzmodelle verfügbar sind; Änderungen am Prozess invalidieren potenziell Leistungsverlauf bzw. Ersatzmodell
Dauerhafte Messungen	• Dauerhafte Messung von Energiedaten an Maschinen und Anlagen • Hohe Genauigkeit kann erreicht werden [88, S. 69], insbesondere wenn SPS-Variablen ebenfalls erfasst und korreliert werden [90, S. 95] • Typische Äquivalente (z. B. CO_2-Äquivalent) können nicht unmittelbar gemessen werden • Zugang zu Maschinen oder Anlagen ist notwendig, daher kann Datenakquise nur erfolgen, wenn Maschine bereits vorhanden ist und Zugriff zum Einbau und zur Anbindung der Messtechnik realisiert werden kann • Datenaufnahme erfolgt fortwährend, sodass stets neue Messreihen erhoben und zur Aktualisierung von Durchschnittsleistung, Leistungsverläufen oder Ersatzmodellen eingesetzt werden können • Großer Aufwand für Aufbau von stationärem Messkonzept und eines Energiedatenmanagements zu betreiben; Automatisierung der Ableitung von relevanten Simulationsparametern herausfordernd

Tabelle D.15: (Fortsetzung)

Energiedaten-akquisemethode	**Beschreibung**
Historische Verbrauchsdaten	• Rückgriff auf kumulierte Energieverbrauchsdaten, beispielsweise aus Energieversorgerabrechnungen • Verbrauchsdaten lassen nur Rückschluss auf Verbrauch in einem Zeitraum für eine Menge von Elementen zu, sodass Durchschnittsleistung nur rechnerisch abgeleitet werden kann • Zumeist ungenau oder nur für sehr abstrakte Simulation nutzbar • Erlaubt Datenakquise auch ohne Zugriff auf Systemelemente (Messungen)
Umlage/ kalkulatorische Ermittlung	• Nutzung von Umlagerechnung zur Verteilung von Leistungsbedarf größerer Einheiten auf einzelne Systemelemente • Erfordert Annahmen zur Verteilung der Leistungsbedarfe in Betrachtungsbereich • Erlaubt nur überschlägige Ermittlung von Leistungsniveaus, kann aber durch Wiederholung unter verschiedenen Lastfällen genauer werden (Untersuchung unterschiedlicher Konstellationen von an- und abgeschalteten Maschinen oder Anlagen) • Erlaubt Datenakquise auch ohne Zugriff auf Systemelemente (Messungen)
Vergleichen und Schätzen	• Abschätzung von Simulationsparametern auf Grundlage der Kenntnis ähnlicher Systemelemente zur Ermittlung von Äquivalenten, Durchschnittsleistung oder Ersatzmodellen • Schnelle, aber ungenaue Ermittlung von Rohdaten möglich [88, S. 69] • Anwendung für Leistungsverläufe unzweckmäßig • Vergleichbarkeit muss genau geprüft werden (Gleichartigkeit der Systemelemente, Annahmen über Korrelation der Leistung etc.) • Erlaubt Datenakquise auch ohne Zugriff auf Systemelemente (Messungen)

Anhang E: Ausführliche Ergebnisse der Erprobung

Ergänzend zu den Ausführungen in Abschnitt 5.3 sind in den folgenden Abschnitten die für die einzelnen Fallstudien vervollständigten Checklisten zusammengestellt. Diese basieren auf den in Anhang D.1 gezeigten Vorlagen. Informationen, die als Anlage zur Checkliste zu dokumentieren sind, werden an dieser Stelle nicht dargestellt.

Anhang E.1: Checklisten zur Fallstudie 1

Tabelle E.1: Checkliste fabrikplanerische Vorarbeiten zur Fallstudie 1

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.1	1	Projektziele	Steigerung der Nachhaltigkeit im Karosseriebau
PE.2	1	Bewertungskriterien	Gewinn CO_2-Äquivalent Nachtarbeit
PE.3	1	Energieeffizienzfokus	Erhöhung der Nachhaltigkeit (Reduktion von Kosten, Umweltwirkungen und sozialen Auswirkungen)
PE.4	1	Betrachtungsbereich	Montage- und Finish-Bereich des Karosseriebaus unter Einbezug der Subsysteme für Fertigung der Anbauteile
PE.5	2	Bestimmtheitsgrad des Fertigungsablaufs	0_____½_____X____1
PE.6	2	Bestimmtheitsgrad des Produktionssystems	0_____½_____X_____1

Tabelle E.1: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.7	2	Bestimmtheitsgrad der Infrastruktur- und Versorgungssysteme	0_____½_____X_1
PE.8	2	Fokussierte Systembestandteile (optional)	Fokus auf den Subsystemen
PE.9	2	Planungsfall	☒ 1: Fabrik- und Anlagensteuerung ☐ 2: Produktionsplanung ☐ 3: Produktionssystemplanung ☐ 4: Produktionsprozessplanung ☐ 5: IVS-Planung ☐ 6: Produktions- und IVS-Planung ☐ 7: Fabriksystemplanung ☐ 8: Fabriksystem- und Produktionsplanung
PE.10	3	Vorausgewählte Handlungsansätze (Mehrfachauswahl)	☒ Energiesparende Fahrweisen ☒ Reduktion von Verlustenergie ☐ Energetisch optimierte Produktgestaltung ☐ Steigerung des Wirkungsgrads
PE.11	3	Vorausgewählte abstrahierte Maßnahmen (Mehrfachauswahl)	☒ Optimierte Auftragssteuerung ☒ Optimierte Anlagensteuerung ☒ Veränderte Prozessparameter ☒ Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten ☐ Prozess-/-kettenanpassungen ☐ Veränderter Rohteil-/Rohmaterialbedarf ☐ Prozessintegration ☐ Substitution ☐ Prozesssicherheit/Fehlerrobustheit ☐ Sophistication ☐ Vermeidung von Umgebungsverlusten ☐ Vermeidung von Verlustleistung

Tabelle E.1: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.12	3	Maßnahmen-vorschläge	*Optimierte Auftragssteuerung:* - Einführung von eniKanban [217] - Einführung von ConEnIP [222] *Optimierte Anlagensteuerung:* - Einführung von eniMES zur Abschaltung von Subsystemen und Infrastruktur *Veränderte Prozessparameter:* - Entfällt: kein Bezug zu Nachtarbeit herstellbar *Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten:* - Entfällt: kein Bezug zu Nachtarbeit herstellbar
PE.13	3	Ausgewählter Handlungsansatz (Einfachauswahl)	☒ Energiesparende Fahrweisen ☐ Reduktion von Verlustenergie ☐ Energetisch optimierte Produktgestaltung ☐ Steigerung des Wirkungsgrads
PE.14	3	Ausgewählte abstrahierte Maßnahme (Einfachauswahl)	☒ Optimierte Auftragssteuerung ← Steuerungsstrategie ☒ Optimierte Anlagensteuerung ← eniMES-Effektivität ☐ Veränderte Prozessparameter ☐ Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten ☐ Prozess-/-kettenanpassungen ☐ Veränderter Rohteil-/Rohmaterialbedarf ☐ Prozessintegration ☐ Substitution ☐ Prozesssicherheit/Fehlerrobustheit ☐ Sophistication ☐ Vermeidung von Umgebungsverlusten ☐ Vermeidung von Verlustleistung

Tabelle E.1: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.15	3	Konkretisierung der verfolgten Maßnahme	Einführung einer energieorientierten Produktionssteuerungsstrategie (eniKanban oder ConEnIP) mit einer optimal geeigneten Parametrierung ist vorzunehmen. Ergänzend dazu ist eine Automatisierungslösung zur Steuerung der Betriebszustände von direkten und indirekten Anlagen umzusetzen, um das Potenzial maximal auszuschöpfen (automatische Schaltung).
PE.16	4	Planungsphase	☒ Konzeptplanung ☐ Detailplanung
PE.17	4	Übersicht der ausgeplanten Effizienzmaßnahme	Umsetzung von eniMES (vgl. [202], [217], [222]) und einer der genannten Steuerungsstrategien für die Subsysteme; Auswahl der Strategie und genaue Parametrierung ist noch offen und soll mittels Simulation gefunden werden
PE.18	4	Hypothese(n) für ausgeplante Effizienzmaßnahme	- Einführung von eniMES mit *eniKanban* für die Subsysteme mit zu bestimmenden, bestmöglichen Parametern maximiert den Gewinn und minimiert das vom Energieeinsatz resultierende CO_2-Äquivalent sowie die Nachtarbeitsstunden - Einführung von eniMES mit *ConEnIP* für die Subsysteme mit zu bestimmenden, bestmöglichen Parametern maximiert den Gewinn und minimiert das vom Energieeinsatz resultierende CO_2-Äquivalent sowie die Nachtarbeitsstunden
PE.19	5	Simulationswürdig ohne Betrachtung von Energie?	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.20	5	Dynamische Betrachtung von Energie notwendig?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.21	5	Energie ist Bestandteil der Hypothese?	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend

Tabelle E.1: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.22	5	Erfassung energetischer Größen über Zeit notwendig?	☒ Ja → Erfassung notwendig, da Energiepreis zeitabhängig ist und auch CO_2-Äquivalent vom Energiemix über die Zeit abhängt. ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.23	5	Leistungsverlauf und Systemzustände komplex/stochastisch verknüpft?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.24	5	Energetische Größen beeinflussen Ablaufsteuerung?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.25	5	Große Anzahl Experimente/Wiederverwendung erwartet?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.26	5	Gewählter Ansatz zur Untersuchung	☒ Integrierte Simulation von Material- und Energieflüssen ☐ Konventionelle Materialflusssimulation ☐ Konventionelle Materialflusssimulation mit nachträglicher Energiebetrachtung ☐ Alternative Methoden (ohne Simulation)

Tabelle E.2: Checkliste Durchführung der Simulationsstudie zur Fallstudie 1

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.1	6	Aufgaben-spezifikation: Ziel-beschreibung und Aufgabenstellung	Mittels Simulation soll die Wirkung der beiden Steuerungsstrategien untersucht werden, wobei letztendlich die idealen Parameter für die Steuerung der betrachteten Subsysteme zu identifizieren sind. Dazu ist implizit auch die grundsätzliche Effektivität der Effizienzmaßnahme (insbesondere von eniMES) zu untersuchen. Das entwickelte Modell soll auch für weitere Untersuchungen von eniMES dienen, bspw. der virtuellen Inbetriebnahme von realen Steuerungskomponenten. Ergebnisse werden insbesondere in Bezug auf die Bewertungskriterien Gewinn, CO_2-Äquivalent und Nachtarbeit erwartet.
SE.2	6	Aufgaben-spezifikation: Beschreibung des zu untersuchenden Systems	Das zu untersuchende System besteht aus 4 Montagearbeitsplätzen, gefolgt von einem Arbeitsplatz zur Qualitätssicherung auf einer Hauptlinie. Die 4 Montagearbeitsplätze erhalten die zu montierenden Teile von jeweils 2 unabhängigen Subsystemen, in denen unterschiedliche Bauteile zu fertigen Baugruppen vormontiert werden. Die Subsysteme sind jeweils durch einen Puffer je Bauteil von der Hauptlinie entkoppelt, dessen Größe beeinflusst werden kann. Zur Untersuchung der Effektivität von eniMES soll eine Betrachtung auf Ebene einzelner Geräte (Industrieroboter) erfolgen. Die Abbildung von Mitarbeitern in der Simulation ist nicht notwendig. Taktzeiten, Verfügbarkeiten und weitere Materialflussparameter sind fix.

Tabelle E.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.3	6	Aufgaben-spezifikation: Notwendige Informationen und Daten	Für die Abbildung der Materialflüsse sind insbesondere folgende Daten notwendig: • Taktzeiten • Verfügbarkeiten • Genaue Übersicht der Elemente • Struktur der Elemente • Übersicht von Rohteilen, Erzeugnissen und Zwischenstufen • Energiedaten (noch genauer zu spezifizieren)
SE.4	6	Aufgaben-spezifikation: Geplante Modellnutzung	Die Modellnutzung ist nur durch den Ersteller zum Zwecke der Untersuchung von energieorientierten Steuerungs-strategien auf der Anlagensteuerungs- sowie PPS-Ebene vorgesehen. Die System-struktur sollte dabei nie verändert werden.
SE.5	6	Aufgaben-spezifikation: Lösungsweg und -methode	Einsatz von Plant Simulation vorbestimmt, alles weitere entsprechend Vorgehens-modell.
SE.6	6	Aufgaben-spezifikation: Anforderungen an Modell und Modell-bildung	Keine Einschränkungen oder speziellen Anforderungen an Modell bzw. Modell-bildung.
SE.7	6	Aufgabenkategorie	☐ Untersuchung / Prognose von Ver-brauchsprofilen und -kennzahlen ☐ Machbarkeit / Gestaltung von Infra-struktur und Versorgungssystemen ☐ Kostenermittlung ☒ Bewertung der ökologischen Effizienz ☒ Bewertung der ökonomischen Effizienz

Tabelle E.2: (Fortsetzung)

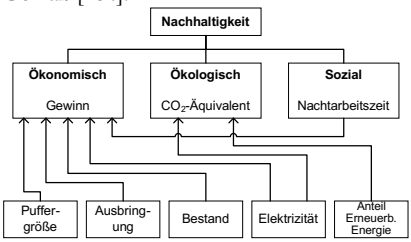
Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.8	6	Gruppen von möglichen Kennzahlen	☐ Wertschöpfungsanteil beim Energieverbrauch ☐ Energieverbrauch (absolut oder relativ) pro Produkt/-variante oder Transporteinheit ☐ Energieverbrauch (absolut oder relativ) pro Zeiteinheit pro Anlage/Teilsystem/System ☐ Energieverbrauch nach Anlagenzuständen ☒ Emissionen, Umweltwirkungen, Zusammensetzung von Energieträgern ☐ Abgeleitete Leistungskennzahlen von Anlagen/Teilsystemen/Systemen (z. B. Spitzenlast) ☒ Energiekosten pro Zeit oder Produkt/-variante je Energieträger
SE.9	6	Zielsystem	Gemäß [184]: 
SE.10	6	Art der zu untersuchenden Alternativen lt. Hypothese	☐ Komplexe Handlungsalternativen ☒ Parameter ☒ Handlungsalternativen und Parameter Umgang mit kombiniertem MADM-MODM-Problem: Vorauswahl der zu untersuchenden Handlungsalternative auf Grundlage von Voruntersuchungen; dann Behandlung als MODM-Problem (Parameter).

Tabelle E.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.11	6	Untersuchungsziel	☐ Systemverhalten analysieren ☒ Beste Parameter finden ☐ nicht zutreffend
SE.12	6	Anzahl relevanter Parameter	☐ < 4 ☒ ≥ 4 ☐ nicht zutreffend Anzahl der Parameter: 20
SE.13	6	Anzahl möglicher Parameterkombinationen	☐ < 10 ☐ < 100 ☒ ≥ 100 ☐ nicht zutreffend Anzahl der Parameterkombinationen: 1.610.612.736
SE.14	6	Methodenkenntnis des Anwenders	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
SE.15	6	Automatisierbarkeit der Auswertung	☐ Ja ☒ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.16	6	Experimentplanungs-methode	☐ Szenarioanalyse ☐ Sensitivitätsanalyse ☐ Teil-/faktorielle Untersuchung ☐ Methoden der statistischen Versuchs-planung ☐ Optimierung mittels Kopplung mit (Meta-)Heuristik (summarische Ziel-funktion) ☒ Optimierung mittels Kopplung mit multikriterieller (Meta-)Heuristik ☒ Untersuchung als kombiniertes MADM-MODM-Problem Vorgehen bei kombiniertem MADM-MODM-Problem: *s. o.*

Tabelle E.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.17	6	Initialer Experimentplan	Untersuchung mit NSGA-II, 100 Generationen, Mutationswahrscheinlichkeit 0,05 bzw. 0,10	
SE.18	7	Systemgrenzen des Materialflusssystems	Vor bzw. nach den 5 Arbeitsplätzen der Hauptlinie; Teilezuführung für Subsysteme; Transportsystem zwischen Subsystemen und Hauptlinie vereinfacht als Transportelement mit Zeitbedarf modelliert	
SE.19	7	Simulationsrelevante Energieflusssysteme	Energieflusssystem 1 Elektrische Energie (400 V)	Energieflusssystem 2 … n Alle weiteren Systeme mit Blick auf eniMES relevant: Elektrische Energie (690 V) **Druckluft (6 Bar)** Druckluft (12 Bar) Laserversorgung Kaltwasser Kühlwasser Abluft Beleuchtung Gebäudebelüftung *Die weiteren Angaben in dieser Spalte sind beispielhaft für Druckluft (6 Bar).*
SE.20	7	IVS-Bezug der Veränderung	☐ Ja ☒ Nein	☒ Ja ☐ Nein
SE.21	7	Systemdynamik	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend

Tabelle E.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.22	7	Aggregationsbedarf von Ergebnisdaten	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
SE.23	7	Systemgrenze stromaufwärts (je Energieflusssystem)	☐ Verbraucher ☒ Verteilung ☐ Erzeuger	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
SE.24	7	Verbrauchsvariabilität	☐ Ja ☒ Nein	☐ Ja ☒ Nein
SE.25	7	Aktor-Bezug der Veränderung	☐ Ja ☒ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☒ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.26		Datenverfügbarkeit	☐ Ja ☒ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☒ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.27	7	Systemgrenze stromabwärts (je Energieflusssystem)	☒ Verbraucher ☐ Aktor / Teil von Verbraucher	☒ Verbraucher ☐ Aktor / Teil von Verbraucher
SE.28	7	Untersuchungsrelevante Systemelemente (je Energieflusssystem)	Zentrale Einspeisung und alle E400 Verbraucher (inklusive der in IVS)	Druckluftversorgung (Erzeuger) und alle Verbraucher
SE.29	7	Struktur aller betrachteten Systemelemente (Konzeptmodell)	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste] *Erfolgt.*	

Tabelle E.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.30	7	Energiemodell (je Energieflusssystem)	☐ Äquivalente ☒ Betriebszustände mit Durchschnittsleistung ☐ Betriebszustände mit Leistungsverläufen ☐ Betriebszustände mit mathematischen Ersatzmodellen ☐ Kontinuierliche/physikalische Modelle ☐ Rein Betriebszustände	☐ Äquivalente ☒ Betriebszustände mit Durchschnittsleistung ☐ Betriebszustände mit Leistungsverläufen ☐ Betriebszustände mit mathematischen Ersatzmodellen ☐ Kontinuierliche/physikalische Modelle ☐ Rein Betriebszustände
SE.31	7	Architekturansatz	☐ Materialflusssimulation mit Auswertung von Ersatzgrößen ☐ Materialflusssimulation mit nachgelagerter Auswertung von Energie-Kennzahlen ☒ Materialflusssimulation mit integrierter Energiebewertung ☐ Mehrere Simulationsmodelle mit Offline-Kopplung ☐ Mehrere Simulationsmodelle mit Online-Kopplung ☐ Simulationswerkzeug mit mehreren Simulationsmethoden ☐ Alternative Simulationsmethoden (z. B. kontinuierliche Simulation)	
SE.32	7	Einzusetzende Software	Siemens Tecnomatix Plant Simulation	

Tabelle E.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.33	7	Spezifikation des Modellierungsansatzes (je Energiefluss-system)	Energieflusssystem 1 Gemäß eniBRIC	Energieflusssystem 2 … n Gemäß eniBRIC
SE.34	7	Erforderliche Modelldaten	Betriebszustände und zugehöriger durchschnittlicher Leistungsbedarf für die 5 Arbeitsplätze der Hauptlinie, die einzelnen Stationen der Subsysteme sowie das verbindende Transportsystem.	
SE.35	7	Wiederverwendbare Komponenten	Arbeitsplätze und Stationen der Subsysteme können auf gleiche Weise modelliert werden. Transportsystem kann durch identische Bausteine abgebildet werden.	
SE.36	8	Ablauflogik zur Interaktion der einzelnen Flusssysteme	☐ Simulation von Energiefluss folgt Betriebszuständen im Materialfluss ☐ Simulation von Energiefluss wird beeinflusst durch Materialflussereignisse ☒ Simulation von Material- und Energiefluss beeinflussen sich gegenseitig	
SE.37	8	Modellierung der Energieflusselemente	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste] *Folgt Komponentenmodell und eniBRIC (vgl. Abschnitt 5.2).*	
SE.38	8	Ablauflogik für die Steuerung von Energieflusselementen	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste] *Folgt Komponentenmodell und eniBRIC (vgl. Abschnitt 5.2).*	

Tabelle E.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.39	9	Energiedatenakquise-methode	Energieflusssystem 1 ☐ Herstellerangaben ☐ LCI-Datenbanken ☐ Analytisches/physikalisches Modell ☐ Numerische Simulation ☒ Historische Messungen ☐ (☒) Spot-Messungen ☐ Dauerhafte Messungen ☐ Historische Verbrauchsdaten ☐ Umlage/kalkulatorische Ermittlung ☒ Vergleichen und Schätzen *Markiert sind die tatsächlich eingesetzten Methoden; in Klammern zudem die ideale Auswahl unter Verwendung der Methodik.*	Energieflusssystem 2 … n ☐ Herstellerangaben ☐ LCI-Datenbanken ☐ Analytisches/physikalisches Modell ☐ Numerische Simulation ☐ Historische Messungen ☐ (☒) Spot-Messungen ☐ Dauerhafte Messungen ☐ Historische Verbrauchsdaten ☐ Umlage/kalkulatorische Ermittlung ☒ Vergleichen und Schätzen *Markiert ist die tatsächlich eingesetzten Methode; in Klammern zudem die ideale Auswahl unter Verwendung der Methodik.*
SE.40	9	Rohdaten	[Ablage unabhängig der Checkliste in geeigneter Weise]	
SE.41	10	Planung der Datenaufbereitung	Überführung von vorhandenen historischen Messdaten in Durchschnittsleistungswerte durch visuelles Fitting; Ableitung weiterer Leistungsdaten durch Vergleichen und Schätzen auf Grundlage dieser und weiterer Erkenntnisse; Aufbereitung als Listen für jedes einzelne Simulationselement in Tabellenkalkulationssoftware	

Tabelle E.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.42	10	Notwendige Vorbereitungen	Vorbereitung von Arbeitsvorlage zur Aufbereitung der Leistungsdaten je Betriebszustand inkl. Definition zu verwendender Betriebszustände je Element
SE.43	10	Durchführung der Datenaufbereitung	[Dokumentation in Übergabeformat für Simulation unabhängig der Checkliste] *Erfolgt.*
SE.44	10	Ergebnis der Verifikation und Validierung von aufbereiteten Daten	Qualitativ erfolgt.
SE.45	11	Ergebnis der Prüfung der Realisierbarkeit der vorgenommenen Modellierung	Positiv geprüft.
SE.46	11	Ergebnisse der Modellverifikation und -modellierung sowie Grenzen des Modells	Positiv geprüft. Taktzeiten-Veränderungen würden voraussichtlich zu veränderten Durchschnittsleistungen führen, können daher nicht betrachtet werden. Modellierung des Druckluftsystems ist rein auf Grundlage von Durchschnittsverbräuchen und -erzeugung über die Zeit erfolgt; Druckluftspeicher wurden nicht modelliert, daher können Effekte kurzzeitig extrem großer Druckluftentnahmen keine Beachtung finden. Die eniMES-Steuerungslogik erlaubt nur Abschaltung auf Subsystemebene und nicht auf Anlagenebene.

Tabelle E.2: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.47	12	Randbedingungen für die Simulationsläufe	Länge der Einschwingphase: 30 Tage Vorgehen zur Erfassung von Messwerten: Durchführung mehrerer Simulationsläufe je Experiment Länge eines Simulationslaufs: 90 Tage Anzahl von Simulationsläufen je Experiment: 5
SE.48	12	Experimentpläne	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.49	12	Auswertung der Ergebnisdaten	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.50	12	Zusammenfassungen der bewerteten Simulationsergebnisse	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.51	13	Zusammenstellung der Bewertungskriterien der Planungslösung	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.52	13	Projektabschlussbericht	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*

Anhang E.2: Checklisten zur Fallstudie 2

Tabelle E.3: Checkliste fabrikplanerische Vorarbeiten zur Fallstudie 2

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.1	1	Projektziele	Entwicklung von Möglichkeiten zur Flexibilisierung des Energiebedarfs zur Senkung der Umweltwirkungen und zur Steigerung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen
PE.2	1	Bewertungskriterien	- Fremdbezugsanteil/Eigennutzungsanteil von Energie - Energiekosten - Liefertreue/Durchlaufzeiten
PE.3	1	Energieeffizienzfokus	Flexibilisierung des Energieverbrauchs
PE.4	1	Betrachtungsbereich	Mechanische Fertigung eines Auftragsfertigers ausgehend vom Beispiel der E³-Forschungsfabrik
PE.5	2	Bestimmtheitsgrad des Fertigungsablaufs	0_____X_____½_____1
PE.6	2	Bestimmtheitsgrad des Produktionssystems	0_____½_____X____1
PE.7	2	Bestimmtheitsgrad der Infrastruktur- und Versorgungssysteme	0_____½_X_____1
PE.8	2	Fokussierte Systembestandteile (optional)	Bereich zur Fertigung von Getriebekomponenten

Tabelle E.3: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.9	2	Planungsfall	☐ 1: Fabrik- und Anlagensteuerung ☒ 2: Produktionsplanung ☐ 3: Produktionssystemplanung ☐ 4: Produktionsprozessplanung ☐ 5: IVS-Planung ☐ 6: Produktions- und IVS-Planung ☐ 7: Fabriksystemplanung ☐ 8: Fabriksystem- und Produktionsplanung
PE.10	3	Vorausgewählte Handlungsansätze (Mehrfachauswahl)	☒ Energiesparende Fahrweisen ☒ Reduktion von Verlustenergie ☐ Energetisch optimierte Produktgestaltung ☐ Steigerung des Wirkungsgrads
PE.11	3	Vorausgewählte abstrahierte Maßnahmen (Mehrfachauswahl)	☒ Optimierte Auftragssteuerung ☐ Optimierte Anlagensteuerung ☐ Veränderte Prozessparameter ☒ Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten ☐ Prozess-/-kettenanpassungen ☐ Veränderter Rohteil-/Rohmaterialbedarf ☐ Prozessintegration ☐ Substitution ☐ Prozesssicherheit/Fehlerrobustheit ☐ Sophistication ☐ Vermeidung von Umgebungsverlusten ☐ Vermeidung von Verlustleistung
PE.12	3	Maßnahmenvorschläge	*Optimierte Auftragssteuerung* - Einführung von ConEnIP [222] als Teil einer Resource Networks Steuerung [229] - Einführung von energieorientierter Produktionsplanung *Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten* - Keine *Weitere* - Integration von Energiespeichern und Speichermanagementstrategien

Tabelle E.3: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.13	3	Ausgewählter Handlungsansatz (Einfachauswahl)	☒ Energiesparende Fahrweisen ☐ Reduktion von Verlustenergie ☐ Energetisch optimierte Produktgestaltung ☐ Steigerung des Wirkungsgrads
PE.14	3	Ausgewählte abstrahierte Maßnahme (Einfachauswahl)	☒ Optimierte Auftragssteuerung ☐ Optimierte Anlagensteuerung ☐ Veränderte Prozessparameter ☐ Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten ☐ Prozess-/-kettenanpassungen ☐ Veränderter Rohteil-/Rohmaterialbedarf ☐ Prozessintegration ☐ Substitution ☐ Prozesssicherheit/Fehlerrobustheit ☐ Sophistication ☐ Vermeidung von Umgebungsverlusten ☐ Vermeidung von Verlustleistung
PE.15	3	Konkretisierung der verfolgten Maßnahme	Bildung von Resource Networks für einzelne Fertigungsgruppen; Steuerung dieser nach der PPS-Strategie ConEnIP; Integration von einfacher Abschaltlogik, wenn kein Bedarf für Produktionsanlagen notwendig; Flexibilisierung über Anpassung von Schichtzeiten und ConEnIP-Parametrierung
PE.16	4	Planungsphase	☒ Konzeptplanung ☐ Detailplanung

Tabelle E.3: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.17	4	Übersicht der ausgeplanten Effizienzmaßnahme	Bildung von 2 Resource Networks für Maschinen mit 1-Schicht- bzw. 3-Schicht-Betrieb; Auftragsfreigabe mittels ConEnIP; Sequenzierung mittels Priorisierungsregeln vor Einlastung in System und vor Maschine (ein Untersuchungsgegenstand); Automatische Maschinenabschaltung bei Schichtende oder nach Fertigstellung des letzten Auftrags; Einfluss von Schichtzeiten sowie Parametrierung von ConEnIP für einzelne Resource Networks ein Untersuchungsgegenstand für Simulation
PE.18	4	Hypothese(n) für ausgeplante Effizienzmaßnahme	- Umsetzung der neuen Steuerungslogik im Bereich der Fertigung von Getriebekomponenten führt zur Erhöhung des Eigennutzungsanteils bzw. zur Verringerung des Fremdbezugsanteils (und damit der Energiebezugskosten) ohne kritische Verschlechterung der logistischen Zielkriterien (Durchlaufzeit, Termintreue)
PE.19	5	Simulationswürdig ohne Betrachtung von Energie?	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.20	5	Dynamische Betrachtung von Energie notwendig?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.21	5	Energie ist Bestandteil der Hypothese?	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.22	5	Erfassung energetischer Größen über Zeit notwendig?	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.23	5	Leistungsverlauf und Systemzustände komplex/stochastisch verknüpft?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend

Tabelle E.3: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.24	5	Energetische Größen beeinflussen Ablaufsteuerung?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.25	5	Große Anzahl Experimente/Wiederverwendung erwartet?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.26	5	Gewählter Ansatz zur Untersuchung	☒ Integrierte Simulation von Material- und Energieflüssen ☐ Konventionelle Materialflusssimulation ☐ Konventionelle Materialflusssimulation mit nachträglicher Energiebetrachtung ☐ Alternative Methoden (ohne Simulation)

Tabelle E.4: Checkliste Durchführung der Simulationsstudie zur Fallstudie 2

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.1	6	Aufgaben-spezifikation: Zielbeschreibung und Aufgabenstellung	Unter Einsatz von Simulation soll eine alternative Ablauflogik für die PPS aufbauend auf dem Konzept der Resource Networks und ConEnIP untersucht werden. Ein besonderer Fokus liegt auf dem Abgleich von Energieangebot und -bedarf über die Zeit, wobei auch logistische Zielkriterien auszuwerten sind.

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.2	6	Aufgaben-spezifikation: Beschreibung des zu untersuchenden Systems	Das zu untersuchende System leitet sich aus der E³-Forschungsfabrik ab und umfasst (teilweise virtuell ergänzt) 13 Maschinen. In dem System werden 9 unterschiedliche Produkttypen mit vordefinierten Arbeitsplänen gefertigt, wobei jeder Arbeitsgang nur auf einer definierten Maschine durchgeführt werden kann. Haupt- und Nebenzeiten werden differenziert betrachtet. Für Transporte wird die Vereinfachung getroffen, dass keine Transportzeiten zu betrachten sind. Auftragseingänge erfolgen ausgehend von einem definierten Produktionsprogramm stochastisch unter der Maßgabe, dass jedes Auftragslos in nicht mehr als ca. 1 Schicht auf einem Arbeitsplatz gefertigt werden kann.
SE.3	6	Aufgaben-spezifikation: Notwendige Informationen und Daten	Für die Abbildung der Materialflüsse sind insbesondere folgende Daten notwendig: • Haupt-/Nebenzeiten je Maschine und Produkttyp • Verfügbarkeiten • Produktionsprogramm und Parameter für Verteilungsfunktion zur stochastischen Auftragserzeugung • Systemstruktur des Materialflusssystems • Arbeitspläne • Energiedaten
SE.4	6	Aufgaben-spezifikation: Geplante Modellnutzung	Das Modell soll zum Experimentieren mit unterschiedlichen Steuerungsansätzen im Kontext der energieflexiblen Produktion dienen, wobei gleichwohl Strategien zur Produktionsplanung und -steuerung sowie zur Dimensionierung und Steuerung von Energiespeichern bzw. regenerativen Energiequellen im Fokus stehen. Eingriffe sind dabei ausschließlich ab der Arbeitsplatzebene aufwärts vorgesehen.

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.5	6	Aufgaben-spezifikation: Lösungsweg und -methode	Einsatz von Plant Simulation vorbestimmt, alles weitere entsprechend Vorgehens-modell
SE.6	6	Aufgaben-spezifikation: Anforderungen an Modell und Modell-bildung	Keine Einschränkungen oder speziellen Anforderungen an Modell bzw. Modell-bildung.
SE.7	6	Aufgabenkategorie	☒ Untersuchung / Prognose von Verbrauchsprofilen und -kennzahlen ☐ Machbarkeit / Gestaltung von Infra-struktur und Versorgungssystemen ☒ Kostenermittlung ☐ Bewertung der ökologischen Effizienz ☐ Bewertung der ökonomischen Effizienz

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.8	6	Gruppen von möglichen Kennzahlen	☐ Wertschöpfungsanteil beim Energieverbrauch ☐ Energieverbrauch (absolut oder relativ) pro Produkt/-variante oder Transporteinheit ☒ Energieverbrauch (absolut oder relativ) pro Zeiteinheit pro Anlage/Teilsystem/System ☐ Energieverbrauch nach Anlagenzuständen ☒ Emissionen, Umweltwirkungen, Zusammensetzung von Energieträgern ☐ Abgeleitete Leistungskennzahlen von Anlagen/Teilsystemen/Systemen (z. B. Spitzenlast) ☒ Energiekosten pro Zeit oder Produkt/-variante je Energieträger
SE.9	6	Zielsystem	- Energiebedarf von Netzbetreiber reduzieren → Differenz Energiebedarf und lokales Energieangebot über die Zeit minimieren - Energiekosten über Zeit reduzieren - Durchlaufzeiten je Produkttyp möglichst konstant halten - Liefertreue je Produkttyp möglichst konstant halten
SE.10	6	Art der zu untersuchenden Alternativen lt. Hypothese	☒ Komplexe Handlungsalternativen ☐ Parameter ☐ Handlungsalternativen und Parameter Umgang mit kombiniertem MADM-MODM-Problem:
SE.11	6	Untersuchungsziel	☐ Systemverhalten analysieren ☐ Beste Parameter finden ☒ nicht zutreffend

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.12	6	Anzahl relevanter Parameter	☐ < 4 ☐ ≥ 4 ☒ nicht zutreffend Anzahl der Parameter:
SE.13	6	Anzahl möglicher Parameterkombinationen	☐ < 10 ☐ < 100 ☐ ≥ 100 ☒ nicht zutreffend Anzahl der Parameterkombinationen:
SE.14	6	Methodenkenntnis des Anwenders	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
SE.15	6	Automatisierbarkeit der Auswertung	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
SE.16	6	Experimentplanungsmethode	☒ Szenarioanalyse ☐ Sensitivitätsanalyse ☐ Teil-/faktorielle Untersuchung ☐ Methoden der statistischen Versuchsplanung ☐ Optimierung mittels Kopplung mit (Meta-)Heuristik (summarische Zielfunktion) ☐ Optimierung mittels Kopplung mit multikriterieller (Meta-)Heuristik ☐ Untersuchung als kombiniertes MADM-MODM-Problem Vorgehen bei kombiniertem MADM-MODM-Problem:

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.17	6	Initialer Experimentplan	Vergleich von Status Quo mit verschiedenen Szenarien unter Nutzung von Resource Networks Steuerung mit ConEnIP (unterschiedliche Lastgrenzen für ConEnIP bzw. Verschiebung von Tag-Schichten in die Nacht o. ä.)	
SE.18	7	Systemgrenzen des Materialflusssystems	Wareneingang (Rohmaterial) bzw. Auftragseingang bis Übergang in Warenausgang	
SE.19	7	Simulationsrelevante Energieflusssysteme	Energieflusssystem 1 Elektrische Energie	Energieflusssystem 2 … n
SE.20	7	IVS-Bezug der Veränderung	☐ Ja ☒ Nein	☐ Ja ☐ Nein
SE.21	7	Systemdynamik	☐ Ja ☒ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.22	7	Aggregationsbedarf von Ergebnisdaten	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.23	7	Systemgrenze stromaufwärts (je Energieflusssystem)	☐ Verbraucher ☒ Verteilung ☐ Erzeuger	☐ Verbraucher ☐ Verteilung ☐ Erzeuger
SE.24	7	Verbrauchsvariabilität	☐ Ja ☒ Nein	☐ Ja ☐ Nein
SE.25	7	Aktor-Bezug der Veränderung	☐ Ja ☒ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.26		Datenverfügbarkeit	☐ Ja ☒ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.27	7	Systemgrenze stromabwärts (je Energieflusssystem)	☒ Verbraucher ☐ Aktor / Teil von Verbraucher	☐ Verbraucher ☐ Aktor / Teil von Verbraucher
SE.28	7	Untersuchungsrelevante Systemelemente (je Energieflusssystem)	13 Produktionsmaschinen für Fertigung von Getriebekomponenten sowie vereinfacht der Bereich Karosseriebaufertigung der E³-Forschungsfabrik	
SE.29	7	Struktur aller betrachteten Systemelemente (Konzeptmodell)	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste] *Erfolgt.*	
SE.30	7	Energiemodell (je Energieflusssystem)	☐ Äquivalente ☒ Betriebszustände mit Durchschnittsleistung ☐ Betriebszustände mit Leistungsverläufen ☐ Betriebszustände mit mathematischen Ersatzmodellen ☐ Kontinuierliche/physikalische Modelle ☐ Rein Betriebszustände	☐ Äquivalente ☐ Betriebszustände mit Durchschnittsleistung ☐ Betriebszustände mit Leistungsverläufen ☐ Betriebszustände mit mathematischen Ersatzmodellen ☐ Kontinuierliche/physikalische Modelle ☐ Rein Betriebszustände

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.31	7	Architekturansatz	☐ Materialflusssimulation mit Auswertung von Ersatzgrößen ☐ Materialflusssimulation mit nachgelagerter Auswertung von Energie-Kennzahlen ☒ Materialflusssimulation mit integrierter Energiebewertung ☐ Mehrere Simulationsmodelle mit Offline-Kopplung ☐ Mehrere Simulationsmodelle mit Online-Kopplung ☐ Simulationswerkzeug mit mehreren Simulationsmethoden ☐ Alternative Simulationsmethoden (z. B. kontinuierliche Simulation)	
SE.32	7	Einzusetzende Software	Siemens Tecnomatix Plant Simulation	
SE.33	7	Spezifikation des Modellierungsansatzes (je Energieflusssystem)	Energieflusssystem 1 Gemäß eniBRIC	Energieflusssystem 2 … n
SE.34	7	Erforderliche Modelldaten	Betriebszustände und zugehöriger durchschnittlicher Leistungsbedarf für die 13 Maschinen sowie Karosseriebau-Bereich.	
SE.35	7	Wiederverwendbare Komponenten	Standardarbeitsplatz bestehend aus einer Maschine, vorgelagertem sowie nachgelagertem Puffer.	

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.36	8	Ablauflogik zur Interaktion der einzelnen Flusssysteme	☐ Simulation von Energiefluss folgt Betriebszuständen im Materialfluss ☐ Simulation von Energiefluss wird beeinflusst durch Materialflussereignisse ☒ Simulation von Material- und Energiefluss beeinflussen sich gegenseitig	
SE.37	8	Modellierung der Energieflusselemente	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste] *Erfolgt.*	
SE.38	8	Ablauflogik für die Steuerung von Energieflusselementen	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste] *Erfolgt.*	
SE.39	9	Energiedatenakquisemethode	Energieflusssystem 1 ☐ Herstellerangaben ☐ LCI-Datenbanken ☐ Analytisches/physikalisches Modell ☐ Numerische Simulation ☒ Historische Messungen ☐ Spot-Messungen ☐ (☒) Dauerhafte Messungen ☐ Historische Verbrauchsdaten ☐ Umlage/kalkulatorische Ermittlung ☒ Vergleichen und Schätzen	Energieflusssystem 2 … n ☐ Herstellerangaben ☐ LCI-Datenbanken ☐ Analytisches/physikalisches Modell ☐ Numerische Simulation ☐ Historische Messungen ☐ Spot-Messungen ☐ Dauerhafte Messungen ☐ Historische Verbrauchsdaten ☐ Umlage/kalkulatorische Ermittlung ☐ Vergleichen und Schätzen
			Markiert sind die tatsächlich eingesetzten Methoden; in Klammern zudem die ideale Auswahl unter Verwendung der Methodik.	

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.40	9	Rohdaten	[Ablage unabhängig der Checkliste in geeigneter Weise]
SE.41	10	Planung der Datenaufbereitung	Überführung von vorhandenen historischen Messdaten in Durchschnittsleistungswerte durch visuelles Fitting; Ableitung weiterer Leistungsdaten durch Vergleichen und Schätzen auf Grundlage von Nennleistungsangaben; Aufbereitung als Listen für jedes einzelne Simulationselement in Tabellenkalkulationssoftware
SE.42	10	Notwendige Vorbereitungen	Vorbereitung von Arbeitsvorlage zur Aufbereitung der Leistungsdaten je Betriebzustand inkl. Definition zu verwendender Betriebszustände je Element
SE.43	10	Durchführung der Datenaufbereitung	[Dokumentation in Übergabeformat für Simulation unabhängig der Checkliste] *Erfolgt.*
SE.44	10	Ergebnis der Verifikation und Validierung von aufbereiteten Daten	Qualitativ erfolgt.
SE.45	11	Ergebnis der Prüfung der Realisierbarkeit der vorgenommenen Modellierung	Positiv erfolgt.

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.46	11	Ergebnisse der Modellverifikation und -modellierung sowie Grenzen des Modells	Positiv geprüft. Es wurde die Vereinfachung vorgenommen, dass der Leistungsbedarf nicht vom Produkttyp abhängt, insofern können evtl. bestehende Abhängigkeiten nicht im Modell abgebildet werden.
SE.47	12	Randbedingungen für die Simulationsläufe	Länge der Einschwingphase: 30 Tage Vorgehen zur Erfassung von Messwerten: Durchführung mehrerer Simulationsläufe je Experiment Länge eines Simulationslaufs: 365 Tage Anzahl von Simulationsläufen je Experiment: 20
SE.48	12	Experimentpläne	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.49	12	Auswertung der Ergebnisdaten	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.50	12	Zusammenfassungen der bewerteten Simulationsergebnisse	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*

Tabelle E.4: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.51	13	Zusammenstellung der Bewertungs-kriterien der Planungslösung	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.52	13	Projektabschluss-bericht	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*

Anhang E.3: Checklisten zur Fallstudie 3

Tabelle E.5: Checkliste fabrikplanerische Vorarbeiten zur Fallstudie 3

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.1	1	Projektziele	Untersuchung von Flexibilitätspotenzialen im Tagebau zur Steigerung der ökonomischen Effizienz im Zusammenspiel von Tagebau und Braunkohlekraftwerk
PE.2	1	Bewertungskriterien	Versorgungssicherheit des Braunkohlekraftwerks Gewinn des Tagebau-Kraftwerk-Systems
PE.3	1	Energieeffizienzfokus	Reduktion von Energiekosten / Flexibilisierung des Energieverbrauchs
PE.4	1	Betrachtungsbereich	Tagebau Welzow-Süd
PE.5	2	Bestimmtheitsgrad des Fertigungsablaufs	0_____½_____X_____1

Tabelle E.5: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.6	2	Bestimmtheitsgrad des Produktionssystems	0_____½_____X_1
PE.7	2	Bestimmtheitsgrad der Infrastruktur- und Versorgungssysteme	0_____½_____X___1
PE.8	2	Fokussierte System-bestandteile (optional)	Direkt in Materialfluss eingebundene Anlagen/Maschinen (keine Peripherien)
PE.9	2	Planungsfall	☒ 1: Fabrik- und Anlagensteuerung ☐ 2: Produktionsplanung ☐ 3: Produktionssystemplanung ☐ 4: Produktionsprozessplanung ☐ 5: IVS-Planung ☐ 6: Produktions- und IVS-Planung ☐ 7: Fabriksystemplanung ☐ 8: Fabriksystem- und Produktions-planung
PE.10	3	Vorausgewählte Handlungsansätze (Mehrfachauswahl)	☒ Energiesparende Fahrweisen ☒ Reduktion von Verlustenergie ☐ Energetisch optimierte Produkt-gestaltung ☐ Steigerung des Wirkungsgrads
PE.11	3	Vorausgewählte abstrahierte Maßnahmen (Mehrfachauswahl)	☒ Optimierte Auftragssteuerung ☒ Optimierte Anlagensteuerung ☒ Veränderte Prozessparameter ☒ Reduktion unproduktiver Einschalt-zeiten ☐ Prozess-/-kettenanpassungen ☐ Veränderter Rohteil-/Rohmaterialbedarf ☐ Prozessintegration ☐ Substitution ☐ Prozesssicherheit/Fehlerrobustheit ☐ Sophistication ☐ Vermeidung von Umgebungsverlusten ☐ Vermeidung von Verlustleistung

Tabelle E.5: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.12	3	Maßnahmen-vorschläge	*Optimierte Auftragssteuerung* - Übertragung energiesensitiver PPS-Strategien aus dem Automobilbau *Optimierte Anlagensteuerung* - Entfällt: Bereits ausgeschöpft *Veränderte Prozessparameter* - Verbesserung von Anlagenverfügbarkeit durch Anpassungen an Wartungsregime *Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten* - Entfällt: Bereits ausgeschöpft
PE.13	3	Ausgewählter Handlungsansatz (Einfachauswahl)	☒ Energiesparende Fahrweisen ☐ Reduktion von Verlustenergie ☐ Energetisch optimierte Produktgestaltung ☐ Steigerung des Wirkungsgrads
PE.14	3	Ausgewählte abstrahierte Maßnahme (Einfachauswahl)	☒ Optimierte Auftragssteuerung ☐ Optimierte Anlagensteuerung ☐ Veränderte Prozessparameter ☐ Reduktion unproduktiver Einschaltzeiten ☐ Prozess-/-kettenanpassungen ☐ Veränderter Rohteil-/Rohmaterialbedarf ☐ Prozessintegration ☐ Substitution ☐ Prozesssicherheit/Fehlerrobustheit ☐ Sophistication ☐ Vermeidung von Umgebungsverlusten ☐ Vermeidung von Verlustleistung

Tabelle E.5: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.15	3	Konkretisierung der verfolgten Maßnahme	Ansatz der Untersuchungen waren Überlegungen, nach denen der Tagebau möglichst in Zeiten mit geringer Netzbelastung fördern und in Zeiten mit großer Belastung ruhen sollte, wobei Ansätze aus dem Automobilbau zu adaptieren waren. Dies steht im Kontrast zur bisherigen Förderstrategie, die im weitesten Sinne einem „Build-to-Stock“ entspricht, d. h. es wird so viel wie möglich in der laufenden Schicht (innerhalb ihrer geplanten Zeiten) gefördert.
PE.16	4	Planungsphase	☒ Konzeptplanung ☐ Detailplanung
PE.17	4	Übersicht der ausgeplanten Effizienzmaßnahme	Die Ausplanung einer Effizienzmaßnahme konnte aufgrund der mangelnden Kenntnisse über bestehende Flexibilitätspotenziale nicht erfolgen. Folglich wurde auf Grundlage der Konkretisierung der verfolgten Maßnahme gearbeitet (PE.15)
PE.18	4	Hypothese(n) für ausgeplante Effizienzmaßnahme	- Unter Nutzung von Informationen über Energiepreise, Energiebedarfe (von Betriebsmitteln) und Kohlebedarfen sowie bestehenden Materialspeichern kann die Betriebsstrategie zur Erhöhung des ökonomischen Betriebs im Tagebau-Braunkohlekraftwerk-System erhöht werden
PE.19	5	Simulationswürdig ohne Betrachtung von Energie?	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.20	5	Dynamische Betrachtung von Energie notwendig?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.21	5	Energie ist Bestandteil der Hypothese?	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend

Tabelle E.5: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
PE.22	5	Erfassung energetischer Größen über Zeit notwendig?	☒ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
PE.23	5	Leistungsverlauf und Systemzustände komplex/stochastisch verknüpft?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.24	5	Energetische Größen beeinflussen Ablaufsteuerung?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.25	5	Große Anzahl Experimente/Wiederverwendung erwartet?	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
PE.26	5	Gewählter Ansatz zur Untersuchung	☒ Integrierte Simulation von Material- und Energieflüssen ☐ Konventionelle Materialflusssimulation ☐ Konventionelle Materialflusssimulation mit nachträglicher Energiebetrachtung ☐ Alternative Methoden (ohne Simulation)

Tabelle E.6: Checkliste Durchführung der Simulationsstudie zur Fallstudie 3

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.1	6	Aufgabenspezifikation: Zielbeschreibung und Aufgabenstellung	Die Simulation soll zur Untersuchung des Systemverhaltens auf Ebene der Betriebsmittel dienen. Damit sollen Erkenntnisse über den Effekt ausgewählter, als Szenarien definierter Änderungen quantifiziert und bewertet werden, um daraus Rückschlüsse über alternative Steuerungsregeln für den Tagebaubetrieb ableiten zu können.

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.2	6	Aufgaben-spezifikation: Beschreibung des zu untersuchenden Systems	Das System besteht aus zwei Vorschnitt-bereichen (je ein Bagger, eine Förderanlage und ein Absetzer), einem Brückenverband (zwei Bagger und eine Abraumbrücke zum Fördern sowie Verkippen), dem Gruben-verband (5 Bagger und eine Förderanlage) und dem Grabenbunker (Förderanlagen und 2 Absetzer). Die Förderanlagen bestehen dabei aus unabhängigen Bändern bzw. Bandabschnitten und verändern abhängig vom Fortschritt der Förderung und damit der Baggerposition ihre Länge.
SE.3	6	Aufgaben-spezifikation: Notwendige Informationen und Daten	Für die Abbildung der Materialflüsse sind insbesondere folgende Daten notwendig: • Fördermengen der Bagger • Verfügbarkeiten Betriebsmittel • Braunkohlebedarfe des Kraftwerks • Genaue Systemstruktur des Material-flusssystems • Schichtpläne • Energiedaten
SE.4	6	Aufgaben-spezifikation: Geplante Modellnutzung	Das Modell sollte durch den Ersteller zur Untersuchung von verschiedenen Szenarien entsprechend der Aufgabenstellung ein-gesetzt werden.
SE.5	6	Aufgaben-spezifikation: Lösungsweg und -methode	Einsatz von Plant Simulation vorbestimmt, alles weitere entsprechend Vorgehens-modell.

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.6	6	Aufgaben-spezifikation: Anforderungen an Modell und Modell-bildung	Keine Einschränkungen oder speziellen Anforderungen an Modell.
SE.7	6	Aufgabenkategorie	☒ Untersuchung / Prognose von Verbrauchsprofilen und -kennzahlen ☐ Machbarkeit / Gestaltung von Infrastruktur und Versorgungssystemen ☐ Kostenermittlung ☐ Bewertung der ökologischen Effizienz ☒ Bewertung der ökonomischen Effizienz
SE.8	6	Gruppen von möglichen Kennzahlen	☐ Wertschöpfungsanteil beim Energieverbrauch ☒ Energieverbrauch (absolut oder relativ) pro Produkt/-variante oder Transporteinheit ☒ Energieverbrauch (absolut oder relativ) pro Zeiteinheit pro Anlage/Teilsystem/System ☐ Energieverbrauch nach Anlagenzuständen ☒ Emissionen, Umweltwirkungen, Zusammensetzung von Energieträgern ☐ Abgeleitete Leistungskennzahlen von Anlagen/Teilsystemen/Systemen (z. B. Spitzenlast) ☒ Energiekosten pro Zeit oder Produkt/-variante je Energieträger

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.9	6	Zielsystem	- Gesamtenergiebedarf je Fördermengeneinheit - Energiebedarf des Tagebau-Systems - Primärenergieanteil des Tagebau-Systems - Energiekosten (über Zeit bzw. je Fördermengeneinheit) - Abweichungen von Braunkohlebedarf und -förderung - Durchlaufzeit je Fördermengeneinheit - Personal- und Transportkosten *Da es sich um eine explorative Untersuchung handelte, wurden zunächst keine Definitionen hinsichtlich der erwünschten Veränderungen (hoch/runter) einbezogen.*
SE.10	6	Art der zu untersuchenden Alternativen lt. Hypothese	☒ Komplexe Handlungsalternativen ☐ Parameter ☐ Handlungsalternativen und Parameter Umgang mit kombiniertem MADM-MODM-Problem:
SE.11	6	Untersuchungsziel	☐ Systemverhalten analysieren ☐ Beste Parameter finden ☒ nicht zutreffend
SE.12	6	Anzahl relevanter Parameter	☐ < 4 ☐ ≥ 4 ☒ nicht zutreffend Anzahl der Parameter:

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.13	6	Anzahl möglicher Parameterkombinationen	☐ < 10 ☐ < 100 ☐ ≥ 100 ☒ nicht zutreffend Anzahl der Parameterkombinationen:
SE.14	6	Methodenkenntnis des Anwenders	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
SE.15	6	Automatisierbarkeit der Auswertung	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend
SE.16	6	Experimentplanungsmethode	☒ Szenarioanalyse ☐ Sensitivitätsanalyse ☐ Teil-/faktorielle Untersuchung ☐ Methoden der statistischen Versuchsplanung ☐ Optimierung mittels Kopplung mit (Meta-)Heuristik (summarische Zielfunktion) ☐ Optimierung mittels Kopplung mit multikriterieller (Meta-)Heuristik ☐ Untersuchung als kombiniertes MADM-MODM-Problem Vorgehen bei kombiniertem MADM-MODM-Problem:
SE.17	6	Initialer Experimentplan	- Status Quo - Einfluss veränderter Energiepreise über Zeit - Einfluss veränderter Braunkohlebedarfe - Einfluss veränderter Betriebsmittelverfügbarkeiten

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.18	7	Systemgrenzen des Materialflusssystems	Modellierung von Abbauort bis vor die Zug-Verladung	
SE.19	7	Simulationsrelevante Energieflusssysteme	Energieflusssystem 1 Elektrische Energie	Energieflusssystem 2 … n
SE.20	7	IVS-Bezug der Veränderung	☐ Ja ☒ Nein	☐ Ja ☐ Nein
SE.21	7	Systemdynamik	☐ Ja ☒ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.22	7	Aggregationsbedarf von Ergebnisdaten	☐ Ja ☒ Nein ☐ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.23	7	Systemgrenze stromaufwärts (je Energieflusssystem)	☒ Verbraucher ☐ Verteilung ☐ Erzeuger	☐ Verbraucher ☐ Verteilung ☐ Erzeuger
SE.24	7	Verbrauchsvariabilität	☒ Ja ☐ Nein	☐ Ja ☐ Nein
SE.25	7	Aktor-Bezug der Veränderung	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend
SE.26		Datenverfügbarkeit	☐ Ja ☐ Nein ☒ nicht zutreffend	☐ Ja ☐ Nein ☐ nicht zutreffend

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.27	7	Systemgrenze stromabwärts (je Energieflusssystem)	☐ Verbraucher ☒ Aktor / Teil von Verbraucher *Relevant lediglich für Förderanlagen (bestehend aus mehreren Förderbändern)*	☐ Verbraucher ☐ Aktor / Teil von Verbraucher
SE.28	7	Untersuchungsrelevante Systemelemente (je Energieflusssystem)	Bagger der betrachteten Bereiche; einzelne Fördereinrichtungen innerhalb der Förderanlagen; Absetzer	
SE.29	7	Struktur aller betrachteten Systemelemente (Konzeptmodell)	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste] *Erfolgt.*	
SE.30	7	Energiemodell (je Energieflusssystem)	☐ Äquivalente ☐ Betriebszustände mit Durchschnittsleistung ☐ Betriebszustände mit Leistungsverläufen ☒ Betriebszustände mit mathematischen Ersatzmodellen ☐ Kontinuierliche/ physikalische Modelle ☐ Rein Betriebszustände	☐ Äquivalente ☐ Betriebszustände mit Durchschnittsleistung ☐ Betriebszustände mit Leistungsverläufen ☐ Betriebszustände mit mathematischen Ersatzmodellen ☐ Kontinuierliche/ physikalische Modelle ☐ Rein Betriebszustände

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.31	7	Architekturansatz	☐ Materialflusssimulation mit Auswertung von Ersatzgrößen ☐ Materialflusssimulation mit nachgelagerter Auswertung von Energie-Kennzahlen ☒ Materialflusssimulation mit integrierter Energiebewertung ☐ Mehrere Simulationsmodelle mit Offline-Kopplung ☐ Mehrere Simulationsmodelle mit Online-Kopplung ☐ Simulationswerkzeug mit mehreren Simulationsmethoden ☐ Alternative Simulationsmethoden (z. B. kontinuierliche Simulation)
SE.32	7	Einzusetzende Software	Siemens Tecnomatix Plant Simulation mit eniBRIC

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.33	7	Spezifikation des Modellierungsansatzes (je Energieflusssystem)	Energieflusssystem 1 - Nutzung von Zeitreihen zur Modellierung von Fördervolumen und Energieverbrauch von Baggern unter Verwendung von mehreren produktiven Betriebszuständen - Nutzung von Regressionsformeln für Fördermittel zur Verknüpfung des aktuellen Energieverbrauchs mit Fördermenge unter Verwendung von mehreren produktiven Betriebszuständen - nicht produktive Betriebszustände werden gemäß eniBRIC modelliert	Energieflusssystem 2 … n
SE.34	7	Erforderliche Modelldaten	Betriebszustände und zugehörige durchschnittliche Leistungsbedarfe bzw. mathematische Modelle zur Berechnung dieser (Regressionsformeln) für Bagger, Fördermittel und ggf. Absetzer	

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.35	7	Wiederverwendbare Komponenten	- Bagger - Fördermittel - Absetzer - Förderbrücke
SE.36	8	Ablauflogik zur Interaktion der einzelnen Fluss-systeme	☐ Simulation von Energiefluss folgt Betriebszuständen im Materialfluss ☒ Simulation von Energiefluss wird beeinflusst durch Materialflussereignisse ☐ Simulation von Material- und Energie-fluss beeinflussen sich gegenseitig
SE.37	8	Modellierung der Energieflusselemente	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.38	8	Ablauflogik für die Steuerung von Ener-gieflusselementen	[Dokumentation als Anlage zur Checkliste] *Erfolgt.*

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung	
SE.39	9	Energiedatenakquise-methode	Energieflusssystem 1 ☐ Herstellerangaben ☐ LCI-Daten-banken ☐ Analytisches/phy-sikalisches Modell ☐ Numerische Simulation ☒ Historische Messungen ☐ Spot-Messungen ☐ Dauerhafte Messungen ☐ Historische Verbrauchsdaten ☐ Umlage/kalku-latorische Ermitt-lung ☐ Vergleichen und Schätzen	Energieflusssystem 2 … n ☐ Herstellerangaben ☐ LCI-Daten-banken ☐ Analytisches/phy-sikalisches Modell ☐ Numerische Simulation ☐ Historische Messungen ☐ Spot-Messungen ☐ Dauerhafte Messungen ☐ Historische Verbrauchsdaten ☐ Umlage/kalku-latorische Ermitt-lung ☐ Vergleichen und Schätzen
SE.40	9	Rohdaten	[Ablage unabhängig der Checkliste in geeig-neter Weise]	
SE.41	10	Planung der Datenauf-bereitung	- Aufbereitung der Datenbasis (Überfüh-rung in einheitliches Format) - Korrelation von Energie- und Betriebsda-ten - Ableitung von Betriebszuständen, durch-schnittlichen Leistungsbedarfen und Re-gressionsformeln - Überführung von Parametern in von Plant Simulation verarbeitbares Format	
SE.42	10	Notwendige Vorberei-tungen	- Bereitstellung der Rohdaten durch Pro-jektpartner - Auswahl eines Datenanalysewerkzeugs - Festlegung von in Plant Simulation mit eniBRIC modellierbaren Regressionen	

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.43	10	Durchführung der Datenaufbereitung	[Dokumentation in Übergabeformat für Simulation unabhängig der Checkliste] *Erfolgt.*
SE.44	10	Ergebnis der Verifikation und Validierung von aufbereiteten Daten	Erfolgt; Abweichungen ausreichend gering; Freigabe für Modellierung
SE.45	11	Ergebnis der Prüfung der Realisierbarkeit der vorgenommenen Modellierung	Positiv geprüft
SE.46	11	Ergebnisse der Modellverifikation und -modellierung sowie Grenzen des Modells	Erfolgt; Abweichungen von ≤ 1 % festgestellt; positiver Befund Grenzen existieren insbesondere hinsichtlich der Modellierung der Bagger, bei der deutlich vom Analysezeitraum abweichende geologische Strukturen zu einem nicht vorhergesehenem Energiebedarf führen können.

Tabelle E.6: (Fortsetzung)

Nr.	Schritt-Nr.	Bezeichnung	Ergebnis/Entscheidung
SE.47	12	Randbedingungen für die Simulationsläufe	Länge der Einschwingphase: Keine – deterministisches Modell Vorgehen zur Erfassung von Messwerten: Messung ab Simulationsbeginn Länge eines Simulationslaufs: 1 Monat Anzahl von Simulationsläufen je Experiment: 1
SE.48	12	Experimentpläne	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.49	12	Auswertung der Ergebnisdaten	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.50	12	Zusammenfassungen der bewerteten Simulationsergebnisse	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.51	13	Zusammenstellung der Bewertungskriterien der Planungslösung	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*
SE.52	13	Projektabschlussbericht	[Dokumentation als Anlagen zur Checkliste] *Erfolgt.*