


Betriebsoptimierung Energieflexibler Siedlungen unter Berücksichtigung der bidirektionalen Integration elektrischer Fahrzeuge

Autor: Georg Franke, M.Sc.
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT





Betriebsoptimierung Energieflexibler Siedlungen unter Berücksichtigung der bidirektionalen Integration elektrischer Fahrzeuge

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

GEORG FRANKE, M.SC.

aus Leipzig

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider
Tag der Einreichung:	27.10.2022
Tag der mündlichen Prüfung:	14.12.2022

Darmstadt 2022

D17

Forschungsberichte Mechatronische Systeme im Maschinenbau

Georg Franke

**Betriebsoptimierung Energieflexibler Siedlungen
unter Berücksichtigung der bidirektionalen
Integration elektrischer Fahrzeuge**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8961-5

ISSN 2198-8536

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Die Notwendigkeit einer nachhaltigen und sozialverträglichen Energieversorgung auf Basis regenerativer Ressourcen ist in Deutschland und Europa so hoch wie nie zuvor. Im Zuge verschiedener Gesetze werden deshalb Regelungen für unterschiedliche Sektoren und Bereiche definiert. Zwei der wichtigsten dieser Bereiche stellen der Verkehrssektor und der Gebäudebereich dar, welche für einen großen Teil der ausgestoßenen Treibhausgasemissionen verantwortlich sind. Der Verkehrssektor wird in den letzten Jahren vor allem durch das Voranschreiten der Mobilitätswende geprägt, die Elektromobilität entwickelt sich in Deutschland und Europa mit wachsender Dynamik. Im Gebäude- und Wohnbereich zeichnet sich parallel ein Trend zur innerstädtischen Verdichtung ab. Zentral gelegene, mehrstöckige Wohnquartierkonzepte nehmen in Ballungsgebieten weiter zu. Deshalb werden auch Energieversorgungssysteme für Wohnquartiere mit integrierter Ladeinfrastruktur zunehmend an Bedeutung gewinnen. Durch mögliche Effizienzsteigerungen und vor dem Hintergrund steigender Energiepreise können hierbei durch einen optimierten energetischen Betrieb verschiedene Potenziale gehoben werden. Weitere Vorteile der energetischen Systemintegration birgt der Einsatz des bidirektionalen Ladens, da die energetische Flexibilität des Gesamtsystems so erhöht werden kann.

Vor diesem Hintergrund wird untersucht, inwieweit das bidirektionale Laden als integrativer Bestandteil des Betriebs multimodaler Energieversorgungssysteme für Wohnquartiere ökonomischen und ökologischen Nutzen schaffen kann. Hierfür wird systematisch ein Modell entwickelt, welches sämtliche relevanten energiewirtschaftlichen, rechtlichen, technologischen und verhaltensbedingten Aspekte abbildet. Der Betrieb des Energieversorgungssystems wird hierbei mittels gemischt-ganzzahliger linearer Modellierung optimiert. Das Mobilitätsverhalten der Bewohner wird mit Copula-Funktionen abgebildet, während ihr Entscheidungs- und Ladeverhalten regelbasiert modelliert wird. Das Zusammenwirken aller Modellentitäten wird übergeordnet agentenbasiert realisiert. Das Gesamtmodell wird genutzt, um auf Basis von erhobenen Realdaten das Betriebsverhalten des simulierten Gesamtsystems aus stationären und mobilen energetischen Komponenten zu analysieren.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das bidirektionale Laden im Zuge des optimierten Betriebs der untersuchten Energieversorgungssysteme von Wohnquartieren unter den aktuellen regulatorischen und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland nicht ökonomisch zielführend eingesetzt werden kann. Anpassungen dieser Rahmenbedingungen in Bezug auf den direkten Zugang kleinerer Wirtschaftseinheiten zum Energiemarkt sowie bei bestimmten regulatorisch bedingten Umlagen können jedoch dazu führen, dass das bidirektionale Laden im energetischen Betrieb ökonomische Parität erlangt. Zusätzlich wird gezeigt, dass übergeordnete Netzbeben entlastet werden können. Eine ökologische Vorteilhaftigkeit des bidirektionalen Ladens kann im Zuge der Simulationen hingegen nicht nachgewiesen werden. Das entwickelte Modell und die gewonnen Erkenntnisse können zukünftig dabei helfen, Wohnquartiere mit integrierter bidirektionaler Ladeinfrastruktur energetisch besser zu gestalten und effizienter zu betreiben.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Nomenklatur.....	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	2
1.2 Ziel der Arbeit.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1 Energieflexible Siedlung.....	5
2.2 Elektromobilität in Deutschland	23
2.3 Elektromobilität im Kontext Energieflexibler Siedlungen	35
2.4 Bestehende Forschungslücken.....	53
3 Methodisches Vorgehen.....	56
3.1 Ziele und Anforderungen	56
3.2 Konzeptionierung.....	57
3.3 Auswahl der Modellierungsansätze	66
3.4 Beschreibung der verwendeten Datengrundlagen	69
3.5 Modellbeschreibung.....	73
4 Modellgestützte Analysen verschiedener Szenarien	106
4.1 Parametrierung der Modelle.....	106
4.2 Szenariendefinition.....	111
4.3 Implementierung und Simulation.....	114
4.4 Validierung und Verifikation	114
5 Auswertungen und Diskussion	117
5.1 Analyse der Basisvarianten.....	117
5.2 Analyse des intelligenten Lademanagements und möglicher Erweiterungen	123
5.3 Analyse veränderter regulatorischer Rahmenbedingungen	130
5.4 Analyse ökologischer Aspekte.....	147
6 Schlussbetrachtung	152
6.1 Zusammenfassung	152
6.2 Verwertbarkeit und Ausblick.....	155

Anhang A	Allgemeine inhaltliche Ergänzungen	158
Anhang A1	Relevante wissenschaftliche Beiträge des Autors	158
Anhang A2	Aufbau der Arbeit	160
Anhang A3	Übersicht regulatorische Kosten- und Erlösbestandteile	161
Anhang A4	Systematisierung der Literatur im Bereich Microgrids	164
Anhang A5	Ergänzende Ausführungen zur gemischt-ganzzahlig linearen Modellierung und Optimierung	165
Anhang A6	Ergänzende Ausführungen zu allgemeinen regulatorischen Aspekten der Elektromobilität und Ladeinfrastruktur	167
Anhang A7	Ergänzungen zur ökologischen Bewertung von Energiesystemen	171
Anhang B	Ergänzende Modellerläuterungen.....	173
Anhang B1	Systematik der ökonomischen und ökologischen Gesamtbewertung	173
Anhang B2	Ergänzende Parametrierung des Modells	181
Anhang B3	Ergänzungen zur Szenariendefinition	193
Anhang B4	Ergänzungen zum Temperaturmodell des stationären Batteriespeichers.....	195
Anhang B5	Berechnung der dynamischen Lade- und Entladepreise.....	196
Anhang B6	Abbildung des unkontrollierten Ladens in der Energieflexiblen Siedlung ...	198
Anhang B7	Ergänzende Ausführungen zur Modellierung der Reichweitenangst	201
Anhang B8	Ergänzende Ausführungen zur modelltechnischen Vorbereitung der Ladeentscheidungen	203
Anhang B9	Ergänzende Ausführungen zur Modellierung der Ladeentscheidungen.....	205
Anhang C	Verwendete Daten und Zeitreihen	209
Anhang C1	Inputdaten des Modells der Energieflexiblen Siedlung	209
Anhang C2	Beispielhafte Zeitreihen der Fahrzeugmodellierung	210
Anhang C3	Datengrundlage der technischen Daten der elektrischen Fahrzeuge	212
Anhang D	Simulationsergebnisse	222
Anhang D1	Ergebnisübersicht Basisvarianten.....	222
Anhang D2	Ergebnisübersicht DP-Varianten	228
Anhang D3	Ergebnisübersicht PM-Varianten	233
Anhang D4	Ergebnisübersicht PB-Varianten.....	238
Anhang D5	Ergebnisübersicht PK-Varianten	243
Anhang D6	Ergebnisübersicht DP-ökologisch-Varianten	248
Anhang D7	Ergebnisübersicht weitere ökologisch optimierte Varianten.....	253
Anhang E	Gemischt-ganzzahlig lineares Optimierungsmodell der Energieflexiblen Siedlung	254
Anhang E1	Variablendefinition.....	254
Anhang E2	Zielfunktionen und Zielfunktionsbestandteile	259
Anhang E3	Formulierung der Nebenbedingungen	264
Literaturverzeichnis.....		273

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Konzept der Energieflexiblen Siedlung	6
Abbildung 2.2: Day-Ahead-Preise an der EEX im April 2021	12
Abbildung 2.3: Zusammensetzung des Nettostrompreises für Haushaltskunden im April 2021	12
Abbildung 2.4: Entwicklung der elektrischen PKW. In a ist die weltweite Entwicklung von 2017 bis 2021 abgebildet, während b die Entwicklung in Deutschland für den gleichen Zeitraum darstellt [74].....	24
Abbildung 2.5: Faktoren der Beeinflussung des Ladeverhaltens (angelehnt an [164, S. 26 ff.].....	47
Abbildung 3.1: Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Alt- und Neubauvariante des Wohnquartiers	59
Abbildung 3.2: Aggregation und Eigenschaften von Fahrzeugen und Fahrern.....	60
Abbildung 3.3: Bilanzraum der Modellierung: Ökologische Bewertung	62
Abbildung 3.4: Bilanzraum der Modellierung: Ökonomische Bewertung	64
Abbildung 3.5: Abstrakte Struktur des Gesamtmodells.....	65
Abbildung 3.6: SWIVT-Quartier mit Neubau- und Bestandsgebäuden (erstellt von planungsgruppeDREI im Rahmen von SWIVT II)	70
Abbildung 3.7: Verteilung der Mobilitätsvariablen für die Gruppe der Vollzeitbeschäftigten mit einem h2h-Trip pro Tag an einem Wochentag. In a sind die Abfahrts- und Ankunftszeiten und in b die Distanzen dargestellt.....	72
Abbildung 3.8: Modellstruktur der Energieflexiblen Siedlung	77
Abbildung 3.9: Übersicht Lade- und Entladeentscheidungen.....	99
Abbildung 3.10: Zeitlicher Ablauf des Modells und Übersicht der Zeithorizonte	103
Abbildung 3.11: Übersicht der Datenflüsse zwischen den Teilmodellen für einen Problemlösungsschritt	105
Abbildung 4.1: Systematisierung der Szenarien.....	112
Abbildung 5.1: PV-Erzeugung und Gesamtladeleistung für ausgewählte Beispieltage in verschiedenen Varianten. In a sind die Varianten B1-N-F und UL1-N-F dargestellt, während b die Varianten B6-A-W und UL6-A-W zeigt.	125
Abbildung 5.2: Skalierte PV-Erzeugung, Ladeleistung und Fahrtzeit eines einzelnen Fahrzeugs an einem beispielhaften Tag der Varianten B4-A-S und DP4-A-S	128
Abbildung 5.3: PV-Erzeugung und Gesamtladeleistung für einen Beispieltag in den Varianten B4-A-S und DP4-A-S	129
Abbildung 5.4: Day-Ahead-Börsenpreise für die drei verschiedenen Jahreszeit-Szenarien	131
Abbildung 5.5: Börsenpreis und Gesamtladeleistung für ausgewählte Beispieltage in verschiedenen Varianten. In a sind die Varianten DP1-N-F und PM1-N-F dargestellt, während b die Varianten DP2-A-F und PM2-A-F zeigt.	134
Abbildung 5.6: Bidirektionale Flexibilisierung von Netzstrom dargestellt für ein einzelnes Fahrzeug in PM5-N-W	137

Abbildung 5.7: Anteilige Aufteilung der PV-Erzeugung auf die Netzeinspeisung und das Laden der Fahrzeuge für drei beispielhafte Tage. In a für DP2-A-F und in b für PB2-A-F.	141
Abbildung 5.8: Anteilige Deckung des elektrischen Bedarfs der Bewohner durch PV, Batterie, BHKW und das Entladen der Fahrzeuge für drei beispielhafte Tage. In a für DP2-A-F und in b für PB2-A-F.	142
Abbildung 5.9: Übersicht der relevanten Effekte der Veränderung der regulatorischen Rahmenbedingungen und deren Folgen auf die ökonomische Gesamtbewertung und die bidirektionale Fahrzeugnutzung	146
Abbildung 6.1: Systematisierung der Literatur im Bereich Microgrids.	164
Abbildung 6.2: Vertragsstrukturen des Ladesäulenbetreibers (angelehnt an [12, S. 47])	170
Abbildung 6.3: Ablauf der Vorbereitung der Ladeentscheidungen	205
Abbildung 6.4: Detaillierter Ablauf der Ladeentscheidungen.	208
Abbildung 6.5: Aufteilung der Gesamtenergiemengen im elektrischen Subsystem. In a für die Basisvariante B1-N-F und in b für die Basisvariante B2-A-F.	222
Abbildung 6.6: Aufteilung der Gesamtenergiemengen im thermischen Subsystem. In a für die Basisvariante B1-N-F und in b für die Basisvariante B2-A-F.	223
Abbildung 6.7: Aufteilung der Gesamtenergiemengen im elektrischen Subsystem. In a für die Basisvariante B3-N-S und in b für die Basisvariante B4-A-S.	224
Abbildung 6.8: Aufteilung der Gesamtenergiemengen im thermischen Subsystem. In a für die Basisvariante B3-N-S und in b für die Basisvariante B4-A-S.	225
Abbildung 6.9: Aufteilung der Gesamtenergiemengen im elektrischen Subsystem. In a für die Basisvariante B5-N-W und in b für die Basisvariante B6-A-W.	226
Abbildung 6.10: Aufteilung der Gesamtenergiemengen im thermischen Subsystem. In a für die Basisvariante B5-N-W und in b für die Basisvariante B6-A-W.	227

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Staatliche veranlasste Bestandteile des Strompreises.....	10
Tabelle 2.2: Aggregation der Fahrzeugsegmente für BEVs.....	25
Tabelle 2.3: Batteriekapazität und Elektrischer Verbrauch der kategorisierten elektrischen Fahrzeuge	26
Tabelle 2.4: Lademodi nach IEC 62196 [86, S. 96 ff.].....	27
Tabelle 2.5: Maximale Lade- und Entladeleistung der kategorisierten elektrischen Fahrzeuge.....	28
Tabelle 3.1: Generelle Variablenbezeichnung.....	75
Tabelle 3.2: Indizes der Erzeuger- und Verbraucherzuordnung.....	76
Tabelle 3.3: Bestandteile der ökonomischen Zielfunktion	87
Tabelle 3.4: Durchschnittsgeschwindigkeiten der verschiedenen h2h-Trips.....	92
Tabelle 4.1: Parameter der zeitlichen Struktur des Modells	106
Tabelle 4.2: Grundlegende Eigenschaften der abgebildeten Quartiersvarianten.....	107
Tabelle 4.3: Dimensionierung der energietechnischen Komponenten.....	108
Tabelle 4.4: Eigenschaften der externen Lademöglichkeiten.....	111
Tabelle 5.1: Externes Laden in den Basisvarianten.....	120
Tabelle 5.2: Ökonomische Bewertungsbestandteile der Basisvarianten des simulierten Gesamtsystems in €.....	121
Tabelle 5.3: Ökologische Bewertungsbestandteile der Basisvarianten des simulierten Gesamtsystems in kg CO ₂ -Äq.	122
Tabelle 5.4: Verschlechterung der ökonomischen Gesamtbewertung der UL-Varianten gegenüber den entsprechenden Basisvarianten	124
Tabelle 5.5: Verschlechterung der ökonomischen Gesamtbewertung der DP-Varianten gegenüber den entsprechenden Basisvarianten	127
Tabelle 5.6: Summe der gebuchten Ladeenergie in der Energieflexiblen Siedlung für die DP-Varianten	127
Tabelle 5.7: Deskriptive statistische Werte der Day-Ahead-Börsenpreise und konstante Beschaffungspreise für die drei verschiedenen Jahreszeit-Szenarien.....	132
Tabelle 5.8: Veränderung der ökonomischen Gesamtbewertung der PM-Varianten gegenüber den entsprechenden DP-Varianten.....	133
Tabelle 5.9: Geforderte Preise der Fahrer für Entladeenergie nach Jahreszeiten in den PB-Varianten	139
Tabelle 5.10: Veränderung der ökonomischen Gesamtbewertung der PB-Varianten gegenüber den entsprechenden DP-Varianten.....	139
Tabelle 5.11: Relevante Veränderungen der Energieströme in PB2-A-F im Vergleich zu DP2-A-F... 140	
Tabelle 5.12: Veränderung der ökonomischen Gesamtbewertung der PK-Varianten gegenüber den entsprechenden PM- und PB-Varianten.....	144
Tabelle 6.1: Übersicht relevanten wissenschaftlichen Beiträge des Autors	159

Tabelle 6.2: Kosten- und Erlösbestandteile in Abhängigkeit vom jeweiligen Verbraucher für PV-Strom	161
Tabelle 6.3: Kosten- und Erlösbestandteile in Abhängigkeit vom jeweiligen Verbraucher für Entladestrom.....	161
Tabelle 6.4: Kosten- und Erlösbestandteile in Abhängigkeit vom jeweiligen Verbraucher für BHKW-Strom.....	162
Tabelle 6.5: Kosten- und Erlösbestandteile in Abhängigkeit vom jeweiligen Verbraucher für aus dem Batteriespeicher gespeicherten Strom	162
Tabelle 6.6: Kosten- und Erlösbestandteile in Abhängigkeit vom jeweiligen Verbraucher für aus dem öffentlichen Netz bezogenen Strom.....	163
Tabelle 6.7: Kosten- und Erlösbestandteile in Abhängigkeit vom jeweiligen Erzeuger für Ladestrom	163
Tabelle 6.8: Ökologische Bewertungsbestandteile für die Energieflexible Siedlung	174
Tabelle 6.9: Ökologische Bewertungsbestandteile für die Fahrzeuge und Fahrer	174
Tabelle 6.10: Ökologische Bewertungsbestandteile des Gesamtsystems	175
Tabelle 6.11: Ökonomische Bewertungsbestandteile für die Energieflexible Siedlung	178
Tabelle 6.12: Ökonomische Bewertungsbestandteile für die Fahrzeuge und Fahrer	178
Tabelle 6.13: Ökonomische Bewertungsbestandteile des Gesamtsystems.....	179
Tabelle 6.14: Parametrierung stationärer Batteriespeicher.....	182
Tabelle 6.15: Parametrierung BHKW.....	184
Tabelle 6.16: Parametrierung thermischer Speicher.....	184
Tabelle 6.17: Parametrierung von Umlagen, Vergütungen und Kosten.....	185
Tabelle 6.18: Übersicht ökologische Parameter.....	186
Tabelle 6.19: Fahrzeuganzahl für Ist-Bestand in Deutschland	187
Tabelle 6.20: Fahrzeuganzahl für zukünftigen Bestand in Deutschland.....	187
Tabelle 6.21: Aufteilung der simulierten Fahrzeuge auf die Personengruppen.....	188
Tabelle 6.22: Parametrierung der technischen Fahrzeugeigenschaften für die Fahrzeug-Kategorie „PHEV“	189
Tabelle 6.23: Parametrierung der technischen Fahrzeugeigenschaften für die Fahrzeug-Kategorie „Klein“	189
Tabelle 6.24: Parametrierung der technischen Fahrzeugeigenschaften für die Fahrzeug-Kategorie „Mittel“	190
Tabelle 6.25: Parametrierung der technischen Fahrzeugeigenschaften für die Fahrzeug-Kategorie „Groß“	190
Tabelle 6.26: Parametrierung Verschiebepotenzial Fahrten.....	192
Tabelle 6.27: Parametrierung Berechnung der gewünschten Startladestände	192
Tabelle 6.28: Veränderte Parameter nach Szenarien in der Dimension Jahreszeit.....	193
Tabelle 6.29: Variablenübersicht unkontrolliertes Laden mit Dimension, Art und unterer und oberer Grenze	200

Tabelle 6.30: Beispielhafte Zeitreihen eines Tages (Wochenende und Feiertag) für einen Vollzeitbeschäftigten mit einem Fahrzeug der Kategorie „Mittel“	210
Tabelle 6.31: Informationen des Fahrtenbuchs eines beispielhaften Tages (Wochenende und Feiertag) für einen Vollzeitbeschäftigten mit einem Fahrzeug der Kategorie „Mittel“	211
Tabelle 6.32: Datengrundlage technische Daten Fahrzeug-Kategorie „PHEV“	212
Tabelle 6.33: Datengrundlage technische Daten Fahrzeug-Kategorie „Klein“	214
Tabelle 6.34: Datengrundlage technische Daten Fahrzeug-Kategorie „Mittel“	216
Tabelle 6.35: Datengrundlage technische Daten Fahrzeug-Kategorie „Groß“	219
Tabelle 6.36: Gesamtenergiemengen im elektrischen Subsystem der Basisvarianten B1-N-F und B2-A- F in MWh	222
Tabelle 6.37: Gesamtenergiemengen im thermischen Subsystem der Basisvarianten B1-N-F und B2- A-F in MWh	223
Tabelle 6.38: Gesamtenergiemengen im elektrischen Subsystem der Basisvarianten B3-N-S und B4-A- S in MWh	224
Tabelle 6.39: Gesamtenergiemengen im thermischen Subsystem der Basisvarianten B3-N-S und B4- A-S in MWh	225
Tabelle 6.40: Gesamtenergiemengen im elektrischen Subsystem der Basisvarianten B5-N-W und B6- A-W in MWh	226
Tabelle 6.41: Gesamtenergiemengen im thermischen Subsystem der Basisvarianten B5-N-W und B6- A-W in MWh	227
Tabelle 6.42: Ökonomische Bewertungsbestandteile der DP-Varianten des simulierten Gesamtsystems in €	228
Tabelle 6.43: Ökologische Bewertungsbestandteile der DP-Varianten des simulierten Gesamtsystems in kg CO ₂ -Äq.	228
Tabelle 6.44: Gesamtenergiemengen der elektrischen Erzeugung der DP-Varianten in MWh	229
Tabelle 6.45: Gesamtenergiemengen des elektrischen Verbrauchs der DP-Varianten in MWh	229
Tabelle 6.46: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DP1-N-F	230
Tabelle 6.47: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DP2-A-F	230
Tabelle 6.48: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DP3-N-S	230
Tabelle 6.49: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DP4-A-S	231
Tabelle 6.50: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DP5-N-W	231
Tabelle 6.51: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DP6-A-W	231
Tabelle 6.52: Gesamtenergiemengen der thermischen Erzeugung der DP-Varianten in MWh	232
Tabelle 6.53: Gesamtenergiemengen des thermischen Verbrauchs der DP-Varianten in MWh	232
Tabelle 6.54: Ökonomische Bewertungsbestandteile der PM-Varianten des simulierten Gesamtsystems in €	233
Tabelle 6.55: Ökologische Bewertungsbestandteile der PM-Varianten des simulierten Gesamtsystems in kg CO ₂ -Äq.	233
Tabelle 6.56: Gesamtenergiemengen der elektrischen Erzeugung der PM-Varianten in MWh	234

Tabelle 6.57: Gesamtenergiemengen des elektrischen Verbrauchs der PM-Varianten in MWh.....	234
Tabelle 6.58: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PM1-N-F.....	235
Tabelle 6.59: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PM2-A-F.....	235
Tabelle 6.60: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PM3-N-S.....	235
Tabelle 6.61: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PM4-A-S.....	236
Tabelle 6.62: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PM5-N-W.....	236
Tabelle 6.63: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PM6-A-W.....	236
Tabelle 6.64: Gesamtenergiemengen der thermischen Erzeugung der PM-Varianten in MWh.....	237
Tabelle 6.65: Gesamtenergiemengen des thermischen Verbrauchs der PM-Varianten in MWh.....	237
Tabelle 6.66: Ökonomische Bewertungsbestandteile der PB-Varianten des simulierten Gesamtsystems in €.....	238
Tabelle 6.67: Ökologische Bewertungsbestandteile der PB-Varianten des simulierten Gesamtsystems in kg CO ₂ -Äq.	238
Tabelle 6.68: Gesamtenergiemengen der elektrischen Erzeugung der PB-Varianten in MWh.....	239
Tabelle 6.69: Gesamtenergiemengen des elektrischen Verbrauchs der PB-Varianten in MWh.....	239
Tabelle 6.70: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PB1-N-F.....	240
Tabelle 6.71: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PB2-A-F.....	240
Tabelle 6.72: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PB3-N-S.....	240
Tabelle 6.73: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PB4-A-S.....	241
Tabelle 6.74: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PB5-N-W.....	241
Tabelle 6.75: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PB6-A-W.....	241
Tabelle 6.76: Gesamtenergiemengen der thermischen Erzeugung der PB-Varianten in MWh.....	242
Tabelle 6.77: Gesamtenergiemengen des thermischen Verbrauchs der PB-Varianten in MWh.....	242
Tabelle 6.78: Ökonomische Bewertungsbestandteile der PK-Varianten des simulierten Gesamtsystems in €.....	243
Tabelle 6.79: Ökologische Bewertungsbestandteile der PK-Varianten des simulierten Gesamtsystems in kg CO ₂ -Äq.	243
Tabelle 6.80: Gesamtenergiemengen der elektrischen Erzeugung der PK-Varianten in MWh.....	244
Tabelle 6.81: Gesamtenergiemengen des elektrischen Verbrauchs der PK-Varianten in MWh.....	244
Tabelle 6.82: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PK1-N-F.....	245
Tabelle 6.83: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PK2-A-F.....	245
Tabelle 6.84: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PK3-N-S.....	245
Tabelle 6.85: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PK4-A-S.....	246
Tabelle 6.86: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PK5-N-W.....	246
Tabelle 6.87: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in PK6-A-W.....	246
Tabelle 6.88: Gesamtenergiemengen der thermischen Erzeugung der PK-Varianten in MWh.....	247
Tabelle 6.89: Gesamtenergiemengen des thermischen Verbrauchs der PK-Varianten in MWh.....	247
Tabelle 6.90: Ökonomische Bewertungsbestandteile der DPö-Varianten des simulierten Gesamtsystems in €.....	248

Tabelle 6.91: Ökologische Bewertungsbestandteile der DPö-Varianten des simulierten Gesamtsystems in kg CO ₂ -Äq.	248
Tabelle 6.92: Gesamtenergiemengen der elektrischen Erzeugung der DPö-Varianten in MWh.....	249
Tabelle 6.93: Gesamtenergiemengen des elektrischen Verbrauchs der DPö-Varianten in MWh.....	249
Tabelle 6.94: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DPö1-N-F.....	250
Tabelle 6.95: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DPö2-A-F.....	250
Tabelle 6.96: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DPö3-N-S.....	250
Tabelle 6.97: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DPö4-A-S.....	251
Tabelle 6.98: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DPö5-N-W.....	251
Tabelle 6.99: Prozentuale Aufteilung der Energiequellen auf die Energiesenken in DPö6-A-W.....	251
Tabelle 6.100: Gesamtenergiemengen der thermischen Erzeugung der DPö-Varianten in MWh....	252
Tabelle 6.101: Gesamtenergiemengen des thermischen Verbrauchs der DPö-Varianten in MWh....	252
Tabelle 6.102: Ökonomische und ökologische Gesamtbewertung sowie Summe der insgesamt aus den Fahrzeugen entladene Energie für alle PMö-, PBö- und PKö-Varianten.....	253
Tabelle 6.103: Variablenübersicht mit Dimension, Art und unterer und oberer Grenze.....	254

Nomenklatur

Abkürzungen

Akronym	Beschreibung
AC	Alternating Current (dt.: Wechselstrom)
B&B	Branch&Bound-Methode
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BEV	Battery Electric Vehicle (dt.: Batterieelektrisches Fahrzeug)
BHKW	Blockheizkraftwerk
CO ₂ -Äq.	CO ₂ -Äquivalente
COP	Coefficient of Performance (dt.: Leistungszahl)
DC	Direct Current (dt.: Gleichstrom)
DoD	Depth-of-discharge (dt.: Entladetiefe)
ECC	European Commodity Clearing
EGIX	European Gas Index
EU	Europäische Union
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
GWP	Global Warming Potential (dt.: Treibhauspotenzial)
h2h	Home-to-home
iMsys	Intelligentes Messsystem
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (dt.: Weltklimarat)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
mHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle (dt.: Mild-Hybrid-Fahrzeug)
MILP	Mixed-Integer Linear Programming (dt.: gemischt-ganzzahlige lineare Modellierung)
OEM	Original Equipment Manufacturer (dt.: Fahrzeughersteller)
PEB	Primärenergiebedarf
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (dt.: Plug-in Hybrid-Fahrzeug)
PKW	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
REEV	Range Extended Electric Vehicle
sHEV	Strong Hybrid Electric Vehicle (dt.: Voll-Hybrid-Fahrzeug)
SOC	State-of-charge (dt.: Ladestand)

Akronym	Beschreibung
SUV	Sport Utility Vehicle
V2B	Vehicle-to-building
V2D	Vehicle-to-device
V2G	Vehicle-to-grid
V2H	Vehicle-to-home
V2I	Vehicle-to-infrastructure
V2N	Vehicle-to-network
V2P	Vehicle-to-pedestrian
V2V	Vehicle-to-vehicle
V2X	Vehicle-to-everything

Gesetze

Akronym	Beschreibung
AbLaV	Verordnung zu abschaltbaren Lasten
BDSG	Bundesdatenschutzgesetz
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EmoG	Elektromobilitätsgesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
GEG	Gebäudeenergiegesetz
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LSV	Ladesäulenverordnung
MsbG	Messstellenbetriebsgesetz
NAV	Niederspannungsanschlussverordnung
PAngV	Preisangabenverordnung
StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
StromStG	Stromsteuergesetz
WEMoG	Wohnungseigentumsmodernisierungsgesetz

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Beschreibung
B	Bewertungsbestandteil
C	Kosten
COP	Coefficient of Performance
E	Elektrische Energie
G	Gas
GWP	Beitrag zum Treibhauseffekt
H	Thermische Leistung
N	Anzahl
P	Elektrische Leistung
p	Preis, Kostenfaktor
Q	Thermische Energie
q	CO ₂ -Äquivalenzfaktor
S	Schalter, Binärvariable
T	Temperatur
Z	Zeitlicher Anteil

Griechische Formelzeichen

Symbol	Beschreibung
α	Strom-Wärme-Umwandlungsfaktor
γ	Score
δ	Potenzial
Δ	Differenz, Schritt
η	Wirkungsgrad
μ	Erwartungswert
ρ	Rate
σ	Standverlustfaktor, Standardabweichung
T	Zeiträume
ω	Leistungsanteil, Betriebspunkt

Sub- und Superskripte

Index	Beschreibung
€	Ökonomisch
A	Altbau
a	Allgemein, ausgewählt
AC	Wechselstrom
AP	Arbeitsplatz
Aus	Ausgangswert
CHP	Blockheizkraftwerk
CO ₂	Ökologisch
crg	Laden
curt	Abregelung
cyc	Zyklisch
d	Bedarf Bewohner
D	Distanz
DC	Gleichstrom
dcrg	Entladen
DI	Externer Dateninput
dif	Differenz
dyn	Dynamisch, veränderlich
E	Entscheidung
el	Elektrisch
ErdS	Erdsonden
ES	Energieflexible Siedlung
EV, ev	Elektrisches Fahrzeug
exl	Zählvariable externe Lademöglichkeiten
ext	Extern
F	Fahrzeuge und Fahrer
G, g	Öffentliches Netz
Ges	Gesamtsystem
h	Hilfsenergie
h2h	Home-to-home
HTR	Heizkessel

Index	Beschreibung
i	Allgemeine Zählvariable
in	Intern
iV	Interne Vorgänge
k	Zählvariable Linearisierungsflächen
K	Kontrolle
konst	Konstant
l	Leitungsverluste
LE	Lokale Erzeugung
LI, li	Ladeinfrastruktur
LV	Lokaler Verbrauch
max	Maximalwert
min	Minimalwert
n	Zählvariable Fahrzeuge und Fahrer
N	Neubau
pot	potenziell
PV	Photovoltaikanlage
R	Residuallast
RA	Reichweitenangst
ref	Referenz
res	Reserviert, gebucht
S, s	Speicher
t	Zeit
th	Thermisch
THP, thp	Wärmepumpe
TMB	Thermisches Modell Batteriespeicher
U	Umgebung
uL	Unkontrolliertes Laden
V	Verschiebung
WT	Wärmetauscher