

BestMasters

Dominik Eller

Integration erneuerbarer Energien mit Power-to-Heat in Deutschland

Potentiale zur Nutzung von Strom-
überschüssen in Fernwärmenetzen

 Springer Vieweg

BestMasters

Dominik Eller

Integration erneuerbarer Energien mit Power-to-Heat in Deutschland

Potentiale zur Nutzung von Strom-
überschüssen in Fernwärmenetzen

BestMasters

Mit „BestMasters“ zeichnet Springer die besten Masterarbeiten aus, die an renommierten Hochschulen in Deutschland, Österreich und der Schweiz entstanden sind. Die mit Höchstnote ausgezeichneten Arbeiten wurden durch Gutachter zur Veröffentlichung empfohlen und behandeln aktuelle Themen aus unterschiedlichen Fachgebieten der Naturwissenschaften, Psychologie, Technik und Wirtschaftswissenschaften. Die Reihe wendet sich an Praktiker und Wissenschaftler gleichermaßen und soll insbesondere auch Nachwuchswissenschaftlern Orientierung geben.

Dominik Eller

Integration erneuerbarer Energien mit Power-to- Heat in Deutschland

Potentiale zur Nutzung von Strom-
überschüssen in Fernwärmenetzen

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Wolfgang Berger

 Springer Vieweg

Dominik Eller
Tulfes, Österreich

BestMasters

ISBN 978-3-658-10560-0

ISBN 978-3-658-10561-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-10561-7

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Geleitwort

Sehr gerne komme ich der Bitte nach, für das vorliegende Buch ein Geleitwort zu verfassen. Der Gedanke, aus erneuerbaren Quellen erzeugten Strom in andere Energieformen zu transformieren und ihn somit auch für die Anwendung in Sektoren wie dem Transport und der Wärmeversorgung zur Verfügung zu stellen, kann in der Fachliteratur bereits seit Jahrzehnten nachvollzogen werden. Auch Pilotanlagen haben Historie, erinnert sei hier etwa an das Solar-Wasserstoff-Bayern-Projekt unter Federführung des Bayernwerks in Neuburg vorm Wald, das bereits Ende der Achtziger Jahre initiiert und im Jahr 2000 beendet worden war.

Allerdings hat der erwähnte Gedanke erst in der jüngeren Vergangenheit Virulenz entwickelt und sukzessive und systematisch in sich anbahnende Umsetzung zu drängen begonnen. Bedingt ist dies wesentlich durch sehr umfassende Förderprogramme insbesondere für die Photovoltaik und die Windkraft mit in der Folge starker Durchdringungstiefe des deutschen Stromversorgungssystems mit diesen Wandlungstechniken. Im Spannungsfeld des umweltpolitisch motivierten, weiteren Ausbaus der Versorgung auf Basis fluktuierender Quellen einerseits und dem Imperativ der Aufrechterhaltung einer sicheren Stromversorgung andererseits kommt hier auch die Technik von „Power-to-Heat“ zum Tragen. An diesem Punkte setzt das Werk von Herrn Dominik Eller an.

Dabei wird das Themenfeld dezidiert und übersichtlich erschlossen und im Kontext stringent zur Technologie Power-to-Heat (P2H) geführt. Daraus werden schlüssig Fragen abgeleitet und im Zuge der Arbeit beantwortet, die auf den Beitrag gerichtet sind, den P2H zur Systemintegration erneuerbarer Energien in Deutschland leisten kann. Ein spezieller Fokus liegt dabei auf dem Einsatz von Elektrodenheißwasserkesseln in Fernwärmenetzen.

Die Darstellung erfolgt durchgängig mit großer inhaltlicher Plausibilität. Der gegenwärtige Forschungsstand wird umfassend erörtert. Stilistisch gelingt Transparenz, zu erwähnen ist außerdem ein maßvoll austarierter Blick auch über den engeren Tellerrand der Thematik hinaus. Schließlich liegt auch in optischer Hinsicht ein anspruchsvolles Werk vor. Vervollständigt wird die Arbeit durch umfangreiche eigene Simulationen und Berechnungen, welche grundlegend erklärt und dezidiert aufgeführt werden.

In Summe legt Herr Eller ein konzentriertes und facettenreiches Werk auf einem Gebiet von entschiedener energiewirtschaftlicher Relevanz vor. Dem Buch des jungen Autors, das auf eine Masterarbeit im Studiengang Europäische Energiewirtschaft der Fachhochschule Kufstein zurückgeht, ist eine gute Aufnahme in der Fachwelt und die Entfaltung angeregter und anhaltender Diskussion zu wünschen.

Prof. Dr. Wolfgang Berger

Vorwort

Die Masterarbeit mit dem Titel „Integration erneuerbarer Energien durch die Technologie Power-to-Heat in Deutschland“ wurde im Juli 2014 beim Studiengang Europäische Energiewirtschaft an der Fachhochschule Kufstein eingereicht. Das persönliche Interesse zum Thema entstand durch ein Praktikum, das ich während des Studiums bei einem Energieversorgungsunternehmen absolvierte. Meine Aufgabe während des Praktikums war die Entwicklung eines Modells zur Nutzung von überschüssigen Wind- und Solarstrom für die zentrale Bewirtschaftung flexibler elektrischer Warmwasserboiler, worüber ich auch meine Bachelorarbeit verfasst habe. Bereits damals faszinierte mich die Möglichkeit, verschiedene Verbraucher des Wärmesektors zu flexibilisieren, um in einem zukünftigen Stromversorgungssystem mit hohen Anteilen volatiler Wind- und Photovoltaikerzeugung Stromüberschüsse speichern zu können. Als ich mir selbst die Frage danach stellte, mit welchen Wärmeverbrauchern möglichst einfach und schnell hohe Potentiale nutzbar wären, fielen meine Überlegungen auf Fernwärmenetze. Dadurch entstand die Motivation, eigene Berechnungen und Recherchen anzustellen, um das Potential der Nutzung von Stromüberschüssen in Fernwärmenetzen beziffern zu können.

Das Verfassen der Arbeit wurde durch die tatkräftige Unterstützung vieler Personen erleichtert, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte. Insbesondere meine Familie und Freunde waren eine große Hilfe und hatten stets Geduld und Verständnis, dass ich während dieser Periode merklich weniger Zeit mit Ihnen verbringen konnte. Zudem danke ich meinem Betreuer Robert Fröhler und Studiengangsleiter Wolfgang Berger für die zahlreichen Tipps und Ratschläge sowie die kompetente fachliche Beratung.

Innsbruck, im April 2015
Dominik Eller

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis.....	XVII
Formelverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Problematik und Relevanz des Themas	1
1.2 Aufgabenstellung und Forschungsfrage	2
1.3 Methodik.....	4
2 Grundlagen Power-to-Heat	7
2.1 Definition und Kritik	7
2.2 Intelligentes Lastmanagement	7
2.3 Funktionsprinzip	9
2.4 Einsatzmöglichkeiten	12
2.4.1 Elektroheizer für Fernwärmenetze und Industrie.....	14
2.4.2 Elektrische Speicherheizungen	14
2.4.3 Elektrische Warmwasserbereitung	15
2.4.4 Hybride Heizsysteme	16
2.5 Energieflüsse bei Elektroheizern in Fernwärmenetzen	16
3 Ausbau erneuerbarer Energien	19
3.1 Historische Entwicklung	19
3.2 Ausbauziele.....	21
3.3 Herausforderungen und Lösungsansätze.....	22
4 Simulation von Stromsystemen	25
4.1 Prämissen und Annahmen.....	26
4.2 Gegenwärtiges Stromsystem.....	28
4.2.1 Methodik	28
4.2.2 Bruttostromverbrauch	31
4.2.3 Wind und Photovoltaik	34
4.2.4 Biomasse	37
4.2.5 Geothermie	37

4.2.6	Wasserkraft.....	38
4.2.7	Ergebnisse Gesamtsystem.....	43
4.3	Zukünftige Stromsysteme	48
4.3.1	Methodik	49
4.3.2	Ausbaupfade.....	50
4.3.3	Bruttostromverbrauch	53
4.3.4	Biomasse, Geothermie, Laufwasser.....	54
4.3.5	Wind.....	55
4.3.6	Photovoltaik	60
4.3.7	Wasserkraft Speicher	64
4.3.8	Ergebnisse Gesamtsystem.....	68
5	Wärmenachfrage in Deutschland	75
5.1	Endenergieverbrauch nach Nutzungsart	75
5.2	Energieverbrauch in Fernwärmenetzen.....	76
5.3	Verbrauchsprofile von Fernwärmenetzen.....	78
5.4	Anlagenbestand zur Deckung des Fernwärmebedarfs.....	83
5.5	Zukünftige Entwicklung des Fernwärmebedarfs.....	85
5.6	Stündlicher Fernwärmelastgang Deutschland	87
5.6.1	Methodik	87
5.6.2	Temperatur	89
5.6.3	Jährliche Fernwärmenetzeinspeisung	93
5.6.4	Tägliche Fernwärmenetzeinspeisung.....	94
5.6.5	Stündliche Fernwärmenetzeinspeisung.....	102
6	Status Quo Elektroheizer in Fernwärmenetzen.....	109
6.1	Elektrodenheißwasserkessel	109
6.1.1	Kesselarten und Funktionsweise.....	109
6.1.2	Hydraulische Einbindung und Netzanschluss	111
6.1.3	Regelbarkeit.....	112
6.1.4	Kosten.....	114
6.1.5	Realisierte Anlagen.....	116
6.2	Thermische Wärmespeicher	117
6.2.1	Physikalische Grundlagen	117
6.2.2	Speicherarten und Größen	118
6.2.3	Kosten.....	120

6.2.4	Rechtliche Aspekte	123
6.3	Einsatz von Elektroheizern am Großhandelsmarkt	125
6.4	Einsatz von Elektroheizern am Regelenergiemarkt.....	127
6.4.1	Grundlagen zu Regelenergie.....	127
6.4.2	Der Markt für Regelenergie	129
6.4.3	Eignung Elektroheizer für Regelenergie.....	132
6.4.4	Analyse SRL-Markt Österreich und Deutschland	133
6.4.5	Simulation Vermarktung Elektroheizer am SRL Markt ..	144
7	Potential von Power-to-Heat.....	157
7.1	Anzahl nutzbarer Fernwärmenetze.....	158
7.2	Stromüberschuss und zeitgleiche Fernwärmenachfrage.....	159
7.3	Nutzbare Stromüberschüsse	163
7.4	Wirtschaftlichkeit	166
7.4.1	Vollkostenrechnung und Wärmegestehungskosten	166
7.4.2	Prinzip des Bewertungsansatzes Vollkosten.....	167
7.4.3	Investitionskosten	170
7.4.4	Betriebskosten, Zinssatz, Nutzungsdauer	172
7.4.5	Wärmegestehungskosten Elektrokessel	172
7.5	Primärenergieeinsparung.....	175
7.6	Erhöhung Potential durch Wärmespeicher	177
7.6.1	Methodik	177
7.6.2	Zusätzlich nutzbare Stromüberschüsse	184
7.6.3	Wirtschaftlichkeit.....	187
7.7	EHK im Gesamtsystem der flexiblen KWK	195
7.8	Prämissen für Potentialberechnung.....	198
8	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	201
9	Literaturverzeichnis.....	205
10	Anhang	215
10.1	Simulation zukünftiger Stromsysteme.....	216
10.2	Potential von Power-to-Heat	224
10.2.1	Stromüberschüsse und Fernwärmenachfrage	224
10.2.2	Erhöhung des Potentials durch Wärmespeicher	233

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen stehen in Farbe auf springer.com kostenlos als Download zur Verfügung.

Abbildung 1: Intelligentes Lastmanagement	8
Abbildung 2: Übersichtsgrafik Funktionsprinzip P2H	9
Abbildung 3: Vereinfachendes Systemabbild P2H mit EHK	17
Abbildung 4: Historische Entwicklung EE und BSV	20
Abbildung 5: Stromlast ENTSO-E und BSV	32
Abbildung 6: BSV 2011, 2012 und 2013	33
Abbildung 7: Wind 2011, 2012 und 2013	35
Abbildung 8: PV 2011, 2012 und 2013	36
Abbildung 9: Biomasse 2011, 2012 und 2013	37
Abbildung 10: EEX gemeldete Wasserkrafterzeugung	39
Abbildung 11: Modellierung Speicherkraftwerke 2012	41
Abbildung 12: Laufwasser und Speicher 2011, 2012 und 2013	42
Abbildung 13: Jahresdauerlinie Residuallast 2011, 2012 und 2013	43
Abbildung 14: Einspeisung EE, BSV und RL 2011, 2012 und 2013	45
Abbildung 15: Stromsystem 2011 und 2012 Detail	47
Abbildung 16: Volllaststunden erneuerbarer Stromerzeugung	51
Abbildung 17: Laufwasser, Biomasse und Geothermie Zukunft	55
Abbildung 18: Fehlmengen Wind Ausbaupfad BEE 2012	57
Abbildung 19: Winderzeugung Zukunft BEE	58
Abbildung 20: Winderzeugung Zukunft OwnGuess	59
Abbildung 21: Fehlmengen PV Ausbaupfad BEE	60
Abbildung 22: Photovoltaikerzeugung Zukunft BEE	62
Abbildung 23: Photovoltaikerzeugung Zukunft OwnGuess	63
Abbildung 24: Wasser Speicher Detail BEE 2012	64
Abbildung 25: Wasser Speicher Zukunft BEE	66
Abbildung 26: Wasser Speicher Zukunft OwnGuess	67
Abbildung 27: Stromsystem Zukunft Residuallastanalyse	68
Abbildung 28: Stromsystem Zukunft BEE 2011 Detail	72
Abbildung 29: Fernwärmebedarf 2003-2012	77
Abbildung 30: Typischer stündlicher Fernwärmelastgang	79
Abbildung 31: Temperaturabhängigkeit und Tagesprofil Musterstadt	81
Abbildung 32: Brennstoff- und Technologiemit in Fernwärmenetzen	84

Abbildung 33: Zukunftsszenarien Fernwärmebedarf	86
Abbildung 34: Tagesmitteltemperatur Deutschland gewichtet.....	91
Abbildung 35: Erklärung und Anwendung der Sigmoidfunktion.....	96
Abbildung 36: Tagessummen Fernwärmebedarf	101
Abbildung 37: Tagesprofilverläufe Fernwärmebedarf	103
Abbildung 38: Stündlicher Fernwärmelastgang 2012	105
Abbildung 39: Stündlicher Fernwärmelastgang 2011	105
Abbildung 40: EHK Funktionsprinzip.....	110
Abbildung 41: EHK hydraulische Einbindung.....	112
Abbildung 42: EHK Nachweis Regelbarkeit.....	113
Abbildung 43: EHK Investitionskosten	114
Abbildung 44: Kenndaten realisierter Wärmespeicher.....	119
Abbildung 45: Wärmespeicher Investitionskosten	122
Abbildung 46: EPEX Spot Preise 2013 geordnet.....	126
Abbildung 47: SRL Abrufe APG und NRV	135
Abbildung 48: SRL Abrufwahrscheinlichkeiten 2012	137
Abbildung 49: SRL Leistungspreise Deutschland 2013-2014.....	139
Abbildung 50: SRL Leistungspreise Österreich 2013-2014	139
Abbildung 51: SRL Arbeitspreise 2013-2014	141
Abbildung 52: SRL Merit Order Arbeitspreise Deutschland.....	143
Abbildung 53: Heizkraftwerk ohne EHK	146
Abbildung 54: EHK angebotene SRL-Leistung	147
Abbildung 55: Heizkraftwerk mit EHK	149
Abbildung 56: SRL Sensitivität Wirtschaftlichkeit Deutschland.....	153
Abbildung 57: SRL Sensitivität Wirtschaftlichkeit Österreich	154
Abbildung 58: Potential P2H Szenario OwnGuess 2011 alle Netze	160
Abbildung 59: Potential P2H Szenario OwnGuess 2011 größte Netze	161
Abbildung 60: Stromüberschüsse Jahressummen.....	162
Abbildung 61: Nutzbare Stromüberschüsse alle Netze.....	164
Abbildung 62: Nutzbare Stromüberschüsse größte Netze.....	164
Abbildung 63: Wärmegestehungskosten EHK Sensitivität.....	169
Abbildung 64: Spezifische- und Gesamtinvestitionskosten EHK.....	172
Abbildung 65: Wirtschaftlichkeit EHK alle Netze	173
Abbildung 66: Wirtschaftlichkeit EHK größte Netze	173
Abbildung 67: Primärenergieeinsparung bei diversen Brennstoffen.....	175
Abbildung 68: Anlagenschema EHK mit Wärmespeicher	178
Abbildung 69: Speichersimulation Detailauszug Januar alle Netze.....	182

Abbildung 70: Speichersimulation Detailauszug Mai alle Netze	183
Abbildung 71: Wärmespeicher Potential 2011 alle Netze	184
Abbildung 72: Wärmespeicher Potential 2011 größte Netze	185
Abbildung 73: Wärmegestehungskosten Wärmespeicher Sensitivität..	187
Abbildung 74: Gesamtspeichervolumen und Ø Volumen je Speicher ..	189
Abbildung 75: Wärmespeicher spezifische- und Gesamtkosten.....	191
Abbildung 76: Wärmegestehungskosten Speicher 2011 alle Netze	192
Abbildung 77: Wärmegestehungskosten Speicher 2011 größte Netze	193
Abbildung 78: Flexible stromgeführte KWK	196
Abbildung 79: Stromsystem Zukunft BEE 2011 Detail.....	216
Abbildung 80: Stromsystem Zukunft BEE 2012 Detail.....	217
Abbildung 81: Stromsystem Zukunft OwnGuess 2011 Detail	218
Abbildung 82: Stromsystem Zukunft OwnGuess 2012 Detail	219
Abbildung 83: Stromsystem Zukunft Residuallast BEE 2011	220
Abbildung 84: Stromsystem Zukunft Residuallast BEE 2012	221
Abbildung 85: Stromsystem Zukunft Residuallast OwnGuess 2011.....	222
Abbildung 86: Stromsystem Zukunft Residuallast OwnGuess 2012.....	223
Abbildung 87: Potential P2H Szenario BEE 2011 alle Netze.....	225
Abbildung 88: Potential P2H Szenario BEE 2012 alle Netze.....	226
Abbildung 89: Potential P2H Szenario OwnGuess 2011 alle Netze	227
Abbildung 90: Potential P2H Szenario OwnGuess 2012 alle Netze	228
Abbildung 91: Potential P2H Szenario BEE 2011 größte Netze	229
Abbildung 92: Potential P2H Szenario BEE 2012 größte Netze	230
Abbildung 93: Potential P2H Szenario OwnGuess 2011 größte Netze	231
Abbildung 94: Potential P2H Szenario OwnGuess 2012 größte Netze	232
Abbildung 95: Wärmespeicher Potential 2012 alle Netze	233
Abbildung 96: Wärmespeicher Potential 2012 größte Netze	234
Abbildung 97: Wärmegestehungskosten Speicher 2012 alle Netze	235
Abbildung 98: Wärmegestehungskosten Speicher 2012 größte Netze	236