
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.

Springer awards “**BestMasters**” to the best master’s theses which have been completed at renowned Universities in Germany, Austria, and Switzerland. The studies received highest marks and were recommended for publication by supervisors. They address current issues from various fields of research in natural sciences, psychology, technology, and economics. The series addresses practitioners as well as scientists and, in particular, offers guidance for early stage researchers.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13198>

Vanessa Hagedorn

Wohnquartiere mit einem Niedrig- Temperatur-Wärmenetz

Eine modellgestützte Analyse
zentraler und dezentraler
Energieversorgungssysteme

Mit einem Geleitwort von
Herrn Prof. Dr. Russell McKenna



Springer Spektrum

Vanessa Hagedorn
Rottweil, Deutschland

ISSN 2625-3577

ISSN 2625-3615 (electronic)

BestMasters

ISBN 978-3-658-25992-1

ISBN 978-3-658-25993-8 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-25993-8>

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

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Für meine Mutter,
welche immer an mich glaubt und
mir stets den Rücken freihält.

Danksagung

Ich möchte mich hiermit bei Prof. Dr. Russell McKenna für seine hervorragende Betreuung der Masterarbeit herzlichst bedanken. Durch seine Unterstützung und Anleitung habe ich im Laufe der Masterarbeit viel lernen können.

Auch geht mein Dank an die Kollegen des Lehrstuhls für Energiewirtschaft des Karlsruher Instituts für Technologie für Ihre Unterstützung und anregenden Diskussionen.

Gerne möchte ich mich zudem bei den Stadtwerken Karlsruhe und den Stadtwerken Böblingen für die zur Verfügung gestellten Informationen und den unkomplizierten Austausch bedanken.

Ebenfalls gilt mein Dank meiner Familie für ihren Rückhalt und ihre Ermutigung.

Abschließend möchte ich mich bei meinem Freund bedanken, der mir während des Verfassens stets mit Tipps und aufmunternden Worten unterstützend zur Seite stand.

Geleitwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Wintersemester 2017/2018 im Rahmen des Masterstudiengangs für Wirtschaftsingenieurwesen am Lehrstuhl für Energiewirtschaft des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter meiner Betreuung durchgeführt.

In ihrer Masterarbeit adressierte Frau Hagedorn eine wichtige Thematik im Rahmen der Energiewende, nämlich die Dekarbonisierung der Quartierswärmeversorgung durch effizientere Technologien und die Integration erneuerbarer Wärmequellen. Der Ausbau der Erneuerbaren Energietechniken erfolgt weitgehend dezentral und Investitionen werden vor allem von Privatpersonen, Landwirten und Energiegenossenschaften getätigt. Diese Akteure investieren überwiegend in stromerzeugende Technologien, welche die sogenannte Stromwende stark vorantreiben und dazu führen, dass aktuell etwa 36% des deutschen Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Quellen stammt. Andererseits liegt die Wärmewende, also die Umstellung der Wärmeerzeugung auf erneuerbare Energiequellen, mit aktuell etwa 13% des deutschen Wärmeverbrauchs aus erneuerbaren Quellen, weit dahinter. Eine zentrale daraus resultierende Frage, der in dieser Arbeit nachgegangen wird, ist wie die Kombination zentraler und dezentraler auf erneuerbaren Energiequellen basierten Quartiersenergieversorgungssysteme eine wirtschaftliche, umweltverträgliche und zuverlässige Option darstellen können.

In ihrer Masterarbeit erweiterte Frau Hagedorn ein bestehendes Optimierungsmodell auf Gebäudeebene dahingehend, dass einzelne Gebäude und deren Energieflüsse in einem Wohnquartier abgebildet werden können. Des Weiteren wurde das Modell ebenfalls um ein Niedrig-Temperatur-Wärmenetz von ihr erweitert, wobei das Modell in der Lage ist, sowohl dessen Betriebsweise als auch die Netzdimensionierung zu optimieren. Anhand des Modells können für städtebaulich unterschiedliche Wohnquartiere sowohl dezentrale als auch zentrale Energieversorgungssysteme hinsichtlich verschiedener Kriterien, wie beispielsweise ökonomische oder ökologische Aspekte miteinander verglichen werden. Die wissenschaftliche Innovation der Masterarbeit liegt in der Optimierung dezentraler Energiesysteme auf Gebäude- sowie Quartiersebene, die bisher in vielen Modellen nur getrennt umgesetzt wurden. Im Gegensatz zu anderen Veröffentlichungen, die sich mit dieser Thematik befassen, hat Frau Hagedorn sowohl eine detaillierte Modellierung durchgeführt als auch die entwickelte Methodik auf reale Daten angewandt und somit validiert. Dies macht die Arbeit im wissenschaftlichen Kontext einzigartig. Die Arbeit ist sowohl für Wissenschaftler als auch Entscheidungsträger im Bereich der Quartiersenergieversorgung relevant.

Prof. Dr. Russell McKenna

Lyngby, Dänemark, Januar 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	1
2	Grundlagen	3
2.1	Definition Energieautarkie	3
2.2	Entwicklung des Wärmesektors	5
2.3	Wärmetransport durch Wärmenetze	7
2.3.1	Definition und Entwicklung von Wärmenetzen	7
2.3.2	Dimensionierung von Wärmenetzen	10
2.4	Einordnung der Arbeit in die Literatur	14
3	Modellierung eines Wärmenetzes	19
3.1	Ausgangsbasis des Modells zur Auslegung und Einsatzplanung	19
3.2	Zielsetzung der Modellerweiterung um ein Wärmenetz	23
3.3	Vorgehen zur Abbildung des Wärmenetzes	23
3.4	Dimensionierungsmöglichkeiten der Netzleitungen	24
3.4.1	Berechnung der Wärmeverluste pro Trassenmeter	26
3.4.2	Berechnung der Druckverluste pro Trassenmeter	27
3.5	Nennleistung & Einsatzplanung der Wärmeerzeugungsanlage	27
3.6	Bestimmung der Nennleistung & Einsatzplanung der Förderpumpe	30
3.6.1	Ermittlung der Förderhöhe und des Volumenstroms	30
3.6.2	Linearisierung der Nennleistung & Einsatzplanung	32
3.7	Zielfunktion des Modells	36
3.8	Validierung des modellierten Wärmenetzes	37
3.8.1	Modell Anpassungen für die Validierung	37
3.8.2	Ergebnisse der Validierung	40
4	Anwendung des Modells zur Analyse der Versorgungskonfigurationen	47
4.1	Betrachtete Siedlungstypen	47
4.1.1	Stadtteil Karlsruhe Rüppurr	49
4.1.2	Stadtteil Karlsruhe City Park	50
4.2	Verwendete Lastprofile	51
4.3	Betrachtete Szenarien	55
4.4	Umsetzung der Modellierung	57
5	Auswertung der Ergebnisse der Modellanwendung	59
5.1	Netzdimensionierung	59

5.2 Kapazitäten und Betriebsweisen	65
5.3 Unterschiede der zentralen und dezentralen Quartierslösungen	72
5.3.1 Ökologische Aspekte	72
5.3.2 Autarkiegrade	74
5.3.3 Ökonomische Aspekte	76
6 Schlussbetrachtung	79
6.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	79
6.2 Kritische Betrachtung	82
6.3 Ausblick	83
Literaturverzeichnis	85
Anhang	91

Abkürzungen

Abkürzungen	Größe	Einheit
A	Wärmeerzeugungsanlage	[-]
a	Abstand zwischen verlegten Vor- und Rücklaufrohren	[m]
$demand_{N,t}$	Wärmebedarf von Knoten N im Zeitschritt t	[W]
DSS	Grad der Selbstversorgung (degree of self-sufficiency)	[-]
ΔT_L	Temperaturunterschied zwischen den verlegten Leitungen	[K]
$fh_{N,N+1,t}$	Wärmefluss zwischen Knoten N und N+1 im Zeitschritt t	[W]
$fr_{ave,R}$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Rohr R	[m/s]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
$h_{\ddot{u}}$	Überdeckungshöhe	[m]
λ_{Bo}	Wärmeübertragungskoeffizient des Bodens	[W/(m K)]
λ_D	Wärmeübertragungskoeffizient der Rohrdämmung	[W/(m K)]
λ_R	Rohrwidestandsbeiwert	[-]
$l_{N-1,N}$	Leitungslänge zwischen Knoten N-1 und N	[m]
l_R	Leitungslänge von Rohr R	[m]
$loss_{max,R}^{heat,l}$	Max. Wärmeverluste von Rohr R pro Trassenmeter	[W/m]
$loss_{max,R}^{press}$	Max. Druckverluste von Rohr R	[Pa]
$loss_{max,R}^{press,l}$	Max. Druckverluste von Rohr R pro Trassenmeter	[Pa/m]
N	Knoten im Wärmenetzgraph	[-]

Abkürzungen	Größe	Einheit
$N - 1$	Vorgänger Knoten von N im Wärmenetzgraph	[-]
$N + 1$	Nachfolger Knoten von N im Wärmenetzgraph	[-]
$p. K.$	Pro Kopf	[-]
PV	Photovoltaikanlage	[-]
$RMSE$	Root-Mean-Square-Error	[-]
r_A	Außenradius	[m]
r_R	Innenradius des Rohres R	[m]
ρ_W	Dichte des Wärmeträgermediums	[kg/m ³]
SCR	Rate des Eigenverbrauchs (self-consumption rate)	[-]
$surf_R$	Maßgebende Oberfläche des Rohres R	[m ²]
$surf_{R,l}$	Maßgebende Oberfläche des Rohres R pro Trassenmeter	[m ² /m]
SYS	System	[-]
t	Zeitschritt	[min]
$t - 1$	Vorheriger Zeitschritt	[min]
T_{Bo}	Bodentemperatur	[K]
T_{RL}	Rücklauftemperatur	[K]
T_{VL}	Vorlauftemperatur	[K]
U_R	Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m ² K)]
$x_{cap,A}^{heat}$	Nennleistung der Wärmeerzeugungsanlage	[W]
$x_{cap,A,t}^{heat}$	Wärmeproduktion der Wärmeerzeugungsanlage pro Zeitschritt t	[W]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Struktur der Raumwärmebereitstellung in privaten Haushalten in Deutschland im Jahr 2016	5
Abbildung 2:	Darstellung der Klimaschutzziele: Primärenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser bis 2050 um mindestens 80% abzusenken	6
Abbildung 3:	Schematischer Aufbau eines Nahwärmenetzes	8
Abbildung 4:	Verlauf der Ausgaben in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers	10
Abbildung 5:	Abschnittsweise Lineare Approximation für die Gesamtinvestition eines Blockheizkraftwerks	20
Abbildung 6:	Mögliche Energieflüsse der Versorgungskonfiguration "System 8"	21
Abbildung 7:	Schematische Darstellung eines Wärmenetzes als gerichteter Graph	24
Abbildung 8:	Schematische Darstellung von erdverlegten Rohren	26
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der Energieflüsse innerhalb der Balancegleichung in einem Zeitschritt t	28
Abbildung 10:	Schematische Darstellung der Ermittlung des kritischen Pfades mittels einer Routenmatrix	31
Abbildung 11:	Gestapeltes Druckschaubild für ein Wärmenetz in Funktion der Netzlänge zum Schlechtpunkt	31
Abbildung 12:	Graphische Darstellung der Bestimmung der Pumpenleistung	33
Abbildung 13:	Vergleich von verschiedenen Pumpenkennlinien	34
Abbildung 14:	Graphische Darstellung der Bestimmung des Pumpenbetriebs	35
Abbildung 15:	Beispiele von Kennlinien für Pumpen mit verschiedenen Leistungen	35
Abbildung 16	Links: Ein Beispiel für eine Pumpenkennlinie Rechts: Linearisierte Pumpenkennlinie	36
Abbildung 17:	Schematische Darstellung des Validierungsnetzes	38
Abbildung 18	Jahresdauerlinie des bestehenden Wärmenetzes und des im Modell verwendeten Wärmelastprofils	40
Abbildung 19:	Vergleich der Leitungslängen der verwendeten Leitungsdurchmesser	41
Abbildung 20:	Verlauf der Wärmezeugung im Validierungsnetz	43
Abbildung 21:	Pumpenbetrieb der Validierung am maximalen Tag im Winter	44

Abbildung 22:	Bebauungsstruktur Blockrandbebauung	48
Abbildung 23:	Bebauungsstruktur kleinteilige, freistehende Wohnbebauung	49
Abbildung 24:	Wärmenetzverlauf im Wohnquartier Rüppurr	50
Abbildung 25:	Wärmenetzverlauf im Wohnquartier City Park	51
Abbildung 26:	Verteilung der Lastprofile in den Quartieren; Häuser mit denselben Lastprofilen haben dieselbe Farbe	53
Abbildung 27:	Jahresdauerlinien der im Modell verwendeten Lastprofile	54
Abbildung 28:	Entwicklung des Modells mit dessen Möglichkeit zentrale und dezentrale Versorgungssysteme abzubilden	56
Abbildung 29:	Verlauf Wärmeerzeugung für System 9 für Quartiere City Park und Rüppurr	62
Abbildung 30:	Wärmeerzeugung für den maximalen Wintertag für System 9 der beiden Quartiere	63
Abbildung 31:	Darstellung der im Modell berechneten Kapazitäten	66
Abbildung 32:	Berechnete Kapazitäten pro Kopf	66
Abbildung 33:	Anteil der Strombedarfsdeckung an einem Tag	69
Abbildung 34:	PV-Stromverwendung an zwei ausgewählten Tagen	70
Abbildung 35:	Absoluter Stromaustausch zwischen den Gebäuden in den beiden Quartieren	71
Abbildung 36:	Aufschlüsselung der Strombedarfsdeckung des Systems 9 für beide Wohnquartiere	73
Abbildung 37:	Jährliche Emissionen der Systeme im Vergleich	74
Abbildung 38:	DSS und SCR in Bezug auf die Elektrizität	75
Abbildung 39:	Autarkiegrade in Bezug auf die Elektrizität	76
Abbildung 40:	Annualisierte Gesamtausgaben auf Quartiersebene	77
Abbildung 41:	Annualisierte Gesamtausgaben pro Kopf	78
Abbildung 42:	Energieflüsse des Systems 1 im Ausgangsmodell	91
Abbildung 43:	Energieflüsse des Systems 2 im Ausgangsmodell	91
Abbildung 44:	Energieflüsse des Systems 3 im Ausgangsmodell	92
Abbildung 45:	Energieflüsse des Systems 4 im Ausgangsmodell	92
Abbildung 46:	Energieflüsse des Systems 5 im Ausgangsmodell	93
Abbildung 47:	Energieflüsse des Systems 6 im Ausgangsmodell	93
Abbildung 48:	Energieflüsse des Systems 7 im Ausgangsmodell	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Charakteristiken der vier Generationen von Wärmenetzen	9
Tabelle 2:	Beschreibung möglicher Netzstrukturen	11
Tabelle 3:	Die wichtigsten vom Rohrdurchmesser abhängigen Parameter des Modells	25
Tabelle 4:	Auflistung der Restriktionen des Wärmeflusses innerhalb eines Rohres	29
Tabelle 5:	Einteilung der abgebildeten Tage im Modell	39
Tabelle 6:	Vergleich der Modellergebnisse mit den Originaldaten	45
Tabelle 7:	Auflistung der verwendeten Lastprofile im Modell	52
Tabelle 8:	Auflistung der möglichen Versorgungskonfigurationen im Modell	57
Tabelle 9:	Modellspezifikationen	58
Tabelle 10:	Auflistung der Input- und Ergebnisdaten für die Netzdimensionierung	60
Tabelle 11:	Zusammenfassung der Schlussfolgerungen	81

Kurzfassung

Der fortschreitende Klimawandel erfordert eine Reduktion der Treibhausgase. Durch den vermehrten Einsatz von Erneuerbaren Energien zur Energieversorgung kann der Emissionsausstoß gesenkt werden. Für die Stromversorgung werden bereits heute vermehrt Erneuerbare Energien eingesetzt, während in der Wärmeversorgung von privaten Haushalten weiterhin fossile Energieträger dominieren. Aufgrund dessen bietet der Wärmesektor ein hohes Einsparungspotential an Emissionen. Mittels Niedrig-Temperatur-Wärmenetzen können Erneuerbare Energien für die Wärmebereitstellung effizient eingesetzt werden. Diese Systeme können meist erst für Wohnquartiere oder Stadtteile wirtschaftlich betrieben werden, da diese Wärmenetze mit Wärmetransportverlusten und hohen Anfangsinvestitionen verbunden sind. Es stellt sich daher die Frage, für welche Wohnquartiere der Einsatz von zentralen Energieerzeugungssystemen gegenüber dezentralen geeigneter ist. Dabei werden die Systeme sowohl im Hinblick auf ihre ökologischen und ökonomischen Aspekte als auch in Bezug auf ihre Energieautarkie miteinander verglichen. In dieser Arbeit wird eine modellgestützte Analyse verschiedener zentraler und dezentraler Energieversorgungssysteme anhand zweier städtebaulich unterschiedlicher Wohnquartiere durchgeführt.

In den Energieversorgungssystemen werden Technologien wie Photovoltaikanlagen, Quartiersbatteriespeicher, Kessel sowie ein Niedrig-Temperatur-Wärmenetz verwendet. Dabei ist ein Strombezug aus dem Netz jederzeit möglich. Das im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelte Optimierungsmodell minimiert die annualisierten Gesamtausgaben der Energieversorgungssysteme. Dabei werden die Kapazitäten der betrachteten Technologien in dem Modell ausgelegt sowie deren Betriebsweise für das gesamte Wohnquartier bestimmt. Im Zuge dessen werden für die zentralen Versorgungssysteme die Rohrdimensionen des Wärmenetzes sowie die Leistung der Förderpumpe und Wärmeerzeugungsanlage endogen optimiert. Dabei sind der Standort der Wärmeerzeugungsanlage sowie der Netzverlauf exogen vorgegeben.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass für Wohngebiete mit einer geringen Bebauungs- und Bewohnerdichte zentrale Energieversorgungssysteme aufgrund der hohen Anfangsinvestitionen und den, im Verhältnis zum Bedarf, hohen Wärmetransportverlusten unrentabel sind sowie höhere CO₂ Emissionen aufweisen. Dagegen zeigt sich, dass für Wohnquartiere mit einer höheren Bebauungs- und Bewohnerdichte zentrale Versorgungssysteme sowohl wirtschaftlich als auch effizient betrieben werden können. Dabei unterscheiden sich die zentralen und dezentralen Systeme nur geringfügig in ihrem CO₂-Ausstoß. Aufgrund der Ergebnisse lässt sich vermuten, dass mit steigender Bewohnerdichte die Wirtschaftlichkeit sowie die CO₂-Reduktion der zentralen Energieversorgung im Vergleich zur dezentralen zunehmen. Im Hinblick auf die Energieautarkie weisen Wohnquartiere mit einer höheren Bewohner- und Bebauungsdichte höhere Autarkiegrade auf. Dabei unterscheiden sich die dezentralen und zentralen Systeme innerhalb eines Quartiers nur geringfügig.

Abstract

Progressive climate change requires a reduction in greenhouse gases. The increased use of renewable energies for energy supply can reduce emissions. Renewable energies are already increasingly being used for electricity supply, while fossil fuels continue to dominate the heat supply of private households. As a result, the heating sector offers a high savings potential in emissions. Renewable energies can be used efficiently for heat supply by means of low-temperature heating networks. These systems can usually only be operated economically for residential districts or city districts, since these heating networks are connected with heat transport losses and high initial investments. The question therefore arises as to which residential areas the use of centralised energy generation systems is more suitable than decentralised ones. The systems are compared both in terms of their ecological and economic aspects and in terms of their energy self-sufficiency. In this thesis, a model-based analysis of different central and decentralised energy supply systems is carried out on the basis of two urban structurally different residential areas.

The energy supply systems use technologies such as photovoltaic systems, residential battery storage, boilers and a low-temperature heat network. Electricity can be drawn from the grid at any time. The optimization model further developed in the context of this work minimizes the annualized total expenditures of the energy supply systems. The capacities of the technologies under consideration are determined in the model and their mode of operation is determined for the entire residential area. In the course of this, the pipe dimensions of the heating network and the performance of the feed pump and heat generation system are endogenously optimised for the central supply systems. The location of the heat generation plant and the grid topology are specified exogenously.

The results of the work show that central energy supply systems are unprofitable for residential areas with a low building and population density due to the high initial investments and the high heat transport losses in relation to demand as well as higher CO₂ emissions. In contrast, central supply systems can be operated both economically and efficiently for residential districts with a higher building and population density. The CO₂ emissions of the centralised and decentralised systems differ only slightly. Based on the results, it can be assumed that the greater the population density, the greater the economic efficiency and CO₂ reduction of the central energy supply compared to decentralized systems. With regard to energy self-sufficiency, residential areas with a higher population and building density have higher degrees of self-sufficiency. The decentralised and central systems within a quarter differ only slightly.