

Effizienter Einsatz erneuerbarer Energieträger in vernetzten Wohnquartieren

Entwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur
energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

von

Claudia Weißmann M.Sc.

aus
Rüsselsheim

D 17

Darmstadt 2017

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Korreferent: Prof. Dr. Anette von Ahsen

Tag der Einreichung: 11. April 2017

Tag der mündlichen Prüfung: 03. Juli 2017

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau
Franziska-Braun-Str. 3
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.tu-darmstadt.de>

Weißmann, Claudia:

Effizienter Einsatz erneuerbarer Energieträger in vernetzten Wohnquartieren

Entwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 37

ISBN 978-3-942886-15-4

Claudia Lisa Weißmann

Geboren 1988 in Rüsselsheim. Von 2008 bis 2013 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens mit Fachrichtung Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Darmstadt. Von Ende 2013 bis 2017 wissenschaftliche Mitarbeiterin von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit auch Stipendiatin der Exzellenz-Graduiertenschule für Energiewissenschaft und Energietechnik. Von April bis Juli 2016 Forschungsaufenthalt am Lawrence Berkeley National Laboratory, Building Technology and Urban Systems Division.

FÜR
MONIKA ECKER
&
JOHANNA WEIßMANN

VORWORT

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt sowie als Stipendiatin der Darmstädter Exzellenz-Graduiertenschule für Energiewissenschaft und Energietechnik entstanden.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich für seine kritischen Anmerkungen, das mir entgegengebrachte Vertrauen, die mir eröffneten Möglichkeiten, seine Begeisterung für die Thematik und die ein oder andere spannende Institutsreise.

Frau Prof. Dr. Anette von Ahsen danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Korreferates sowie die sehr produktive Zusammenarbeit in Form von verschiedenen Fachpublikationen.

Bei Jessica Engel, Fabian Staab, Valentin Förster, Robert Burgaß, André Müller und insbesondere Patrick Wörner bedanke ich mich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Meinen Kolleginnen und Kollegen danke ich ganz besonders für die schöne Zeit am Institut, die sehr zur Motivation für die Dissertation beigetragen hat und an die ich mich immer sehr gerne zurückerinnern werde. Daneben möchte ich mich auch bei allen Doktorandinnen und Doktoranden der ESE Graduiertenschule für den interdisziplinären Austausch bedanken.

Besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern der EQUA Solutions AG für die geduldige Beantwortung sämtlicher Rückfragen rund um die Software IDA ICE sowie der Firma PRE-Halle und den Bauherren Jürgen Molt und Andreas Miller für die Übermittlung verschiedener Datensätze.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Studentinnen und Studenten, die im Rahmen von Studienarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders erwähnen möchte ich hierbei Lena Kumpf, Friederike Harder, Milena Frank und Tobias Weber.

Bei meinen Eltern Ulrich und Ingrid Weißmann sowie meinem Bruder Patrick bedanke ich mich für die kontinuierliche Unterstützung sowohl während meines Studiums als auch während meiner Promotionszeit.

Zu guter Letzt sei an dieser Stelle ganz besonders meinem Freund Robert Burgaß gedankt, für viele gemeinsam verbrachte Schreibabende an der Universität, erholsame Reisen an die Ostsee und sein hohes Vertrauen in das Gelingen dieser Arbeit.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Kontext der Energiewende besteht die Vermutung, dass erneuerbare Energien effizienter in die Energieversorgung von Wohngebäuden integriert werden können, wenn das Planungskonzept den Quartierverbund im Rahmen einer dezentralen Versorgungsstrategie fokussiert. Hierbei ist bislang unklar, welche erneuerbare Technologie hinsichtlich energetischer, ökologischer und ökonomischer Ziele für die Versorgung von Wohnquartieren das größte Potential bietet. Zur Identifikation geeigneter Versorgungskonzepte unter Einsatz erneuerbarer Energiequellen und zur Überprüfung möglicher Vorteile des vernetzten Planungsansatzes bedarf es jedoch zunächst eines geeigneten Instruments, welches eine Bewertung auf Quartierebene sowohl in energetischer als auch in ökologischer und ökonomischer Hinsicht erlaubt.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bewertungsverfahren ist auf eine Vielzahl der gegenwärtig verfügbaren Erzeugungs- und Speichertechnologien zur Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden anwendbar und berücksichtigt gebäudespezifische Anforderungen an die Anlagendimensionierung. Zur Beschreibung der Energieflüsse innerhalb der Quartiergrenze werden zeitlich hoch aufgelöste Lastprofile verwendet, die mittels der Methoden der dynamischen Gebäudesimulation sowie basierend auf Messdaten generiert wurden. Durch diesen profilbasierten Ansatz können sowohl unvernetzte als auch vernetzte sowie sektorgekoppelte Versorgungsoptionen hinsichtlich definierter Indikatoren bewertet werden.

ABSTRACT

In the context of the German energy transition, it is assumed that renewable energies may be used more efficiently in domestic buildings if the planning concept focuses the aggregated energy supply of urban districts as a decentralized supply strategy. However, it is currently unclear which renewable energy technology is appropriate concerning energetic, ecological and economic objectives. In order to identify convenient supply strategies employing renewable energy sources and to verify advantages of the district planning focus, a suitable assessment approach is required.

In this thesis, an approach is developed which is applicable on several available producer or storage technologies for the heat and electricity supply of buildings and accomplishes building specific design requirements. For describing the energy flows within the urban district, time specific decomposed load profiles are applied. These profiles are either generated by dynamic building simulation or extracted from real data. This profile based approach facilitates the assessment of interconnected and non-interconnected as well as sector-integrated supply strategies regarding defined key indicators.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Parameter- und Variablenverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis.....	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Vorgehensweise.....	4
2 Status Quo der Energiewende in Deutschland	7
2.1 Aktuelle Nutzung erneuerbarer Energiequellen in Deutschland	7
2.2 Politische Zielsetzungen im Rahmen der Energiewende	10
2.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen der Energiewende.....	12
2.4 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen der Energiewende.....	14
2.5 Zusammenfassung	22
3 Energieversorgung von Gebäuden.....	23
3.1 Energiebedarf von Gebäuden	23
3.1.1 Hinführende Erläuterungen	23
3.1.2 Wohngebäude	25
3.1.3 Nicht-Wohngebäude.....	27
3.2 Anlagen zur Erzeugung und Speicherung von Strom und Wärme.....	28
3.2.1 Vorbemerkungen	28
3.2.2 Anlagen zur Stromerzeugung und -speicherung	28
3.2.3 Anlagen zur Wärmeerzeugung und -speicherung	31
3.3 Vom Effizienzhaus zum vernetzten Effizienzquartier.....	38
3.4 Technische Infrastruktur in vernetzten Quartieren	43
3.5 Prozess der Planung von Energieversorgungskonzepten für Quartiere.....	46
3.6 Zusammenfassung	48
4 Methoden zur Bewertung der Energieversorgung von Gebäuden	49
4.1 Einleitung	49

4.2	Ansätze zur energetischen Bewertung von Gebäuden	49
4.2.1	Vorbemerkungen	49
4.2.2	Normative Verfahren	50
4.2.3	Dynamische Simulationsmodelle	53
4.2.4	Empirische Lastprofile	55
4.3	Ökologische Bewertung der Energieversorgung von Gebäuden.....	59
4.4	Ökonomische Bewertung der Energieversorgung von Gebäuden.....	62
4.5	Existierende Bewertungsansätze für die Energieversorgung von Quartieren	65
4.6	Zusammenfassung und Implikationen für die Entwicklung eines integralen Bewertungsmodells	69
5	Profilbibliothek zur Beschreibung der Energieversorgung von Gebäuden.....	73
5.1	Nutzenergiebedarfsprofile des Gebäudes	73
5.1.1	Allgemeine Annahmen und Parameter	73
5.1.2	Nutzenergiebedarf Strom.....	78
5.1.3	Nutzenergiebedarf Trinkwarmwasser.....	84
5.1.4	Nutzenergiebedarf Heizwärme	89
5.2	Endenergiebedarfs- und Erzeugungsprofile der Anlagen.....	95
5.2.1	Vorbemerkungen	95
5.2.2	Anlagenmodelle.....	96
5.2.3	Auswahl der Typgebäude-Anlagen-Kombinationen.....	107
5.2.4	Dimensionierung der Anlagensysteme und Parameterstudie	109
5.2.5	Verifizierung der Simulationsergebnisse durch Endenergiebedarfs- und Verbrauchskennwerte	128
5.3	Zusammenfassung	132
6	Bewertungsverfahren für Energieversorgungskonzepte auf Quartierebene..	133
6.1	Hinführende Erläuterungen	133
6.2	Wärmebilanzmodell.....	134
6.2.1	Allgemeine Modellstruktur, Parameter und Indikatoren.....	134
6.2.2	Validierung des Nahwärmenetzmodells.....	141
6.2.3	Parameterstudie	143

6.3	Strombilanzmodell	147
6.3.1	Allgemeine Modellstruktur, Parameter und Indikatoren.....	147
6.3.2	Validierung des Strombilanzmodells	151
6.3.3	Parameterstudie	153
6.4	Ökologische Bewertung	156
6.4.1	Implementierung der LCA-Methode in das Bewertungsmodell	156
6.4.2	Ökologische Datenbasis	159
6.5	Ökonomische Bewertung	160
6.5.1	Implementierung der LCC-Methode in das Bewertungsmodell	160
6.5.2	Ökonomische Datenbasis	163
6.6	Zusammenfassung	168
7	Szenarioanalyse zur Überprüfung der Modellanwendbarkeit.....	169
7.1	Beschreibung des Untersuchungsquartiers	169
7.2	Szenario A – Stromvernetzung.....	171
7.2.1	A.1 Wärmepumpe im Einzelgebäude.....	171
7.2.2	A.2 Photovoltaik und Wärmepumpe im Einzelgebäude	173
7.2.3	A.3 Quartierstromnetz mit Batterie	176
7.2.4	A.4 Versorgung von Nicht-Wohngebäuden über das Quartierstromnetz	178
7.3	Szenario B – Wärmevernetzung.....	186
7.3.1	B.1 Solarthermie im Einzelgebäude	186
7.3.2	B.2 Solares Nahwärmenetz	187
7.3.3	B.3 Solares Nahwärmenetz mit Kraft-Wärme-Kopplung	190
7.3.4	B.4 Versorgung von Nicht-Wohngebäuden über das Nahwärmenetz.....	196
7.4	Zusammenfassende Gegenüberstellung der Szenarien.....	201
8	Kritische Würdigung und Ableitung von Anwendungsempfehlungen	205
9	Resümee und Ausblick	211
	Literaturverzeichnis	217
	Anhang.....	237