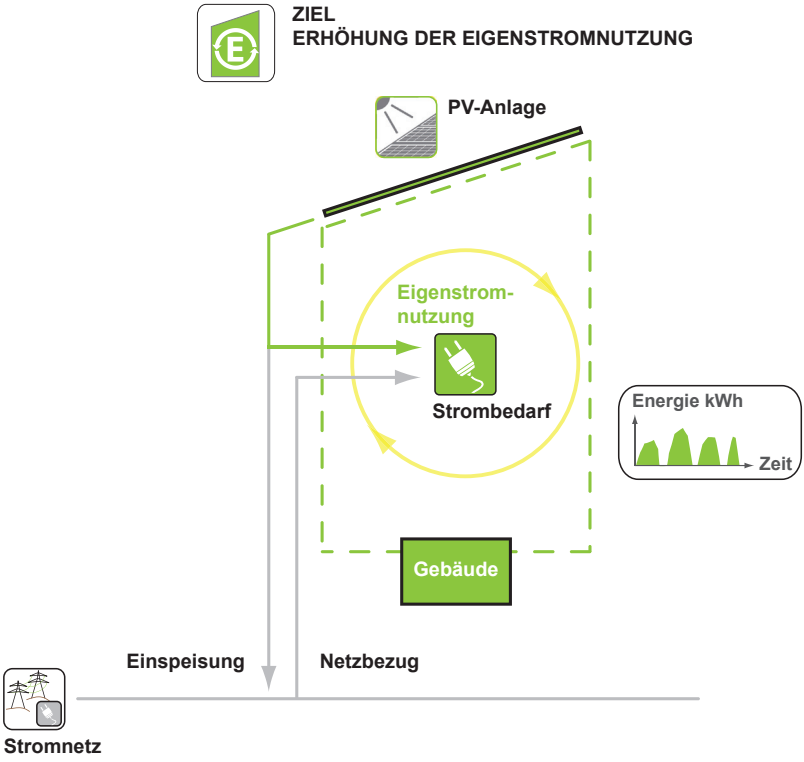
DISSERTATION

CHRISTIAN KLEY

Untersuchungen zur Steigerung der Eigenstromnutzung in EnergiePLUS – Gebäuden



Untersuchungen zur Steigerung der Eigenstromnutzung in EnergiePLUS – Gebäuden

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

Dissertation

von
Christian Kley
geboren am 21.01.1983
aus Riedlingen

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades
eines Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Eingereicht am:	22. November 2017
Disputation am:	10. April 2018
Berichterstatter:	Univ. Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch
	Univ. Prof. Dr.-Ing. D. Bohne

Berichte aus dem Maschinenbau

Christian Kley

Untersuchungen zur Steigerung der Eigenstromnutzung in EnergiePLUS-Gebäuden

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6095-9
ISSN 0945-0874

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand auf der Basis meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch am Institut für Gebäude- und Solartechnik der TU Braunschweig. Bei der Erstellung meiner Dissertation durfte ich von Anfang an die Hilfe vieler Menschen erfahren. Ohne diese Hilfsbereitschaft und Unterstützung hätte ich die vorliegende Arbeit nicht anfertigen können. Für all jene, sei an dieser Stelle ein recht herzliches Dankeschön gesagt. Bei einigen Menschen möchte ich mich noch namentlich ganz besonders für ihre Mithilfe bedanken:

Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch vom Institut für Gebäude- und Solartechnik der TU Braunschweig bin ich sehr dankbar für die Anregung der Arbeit, die fachliche Betreuung und Unterstützung, dem Wissenstransfer sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen. Danke für die vergangenen Jahre der erfolgreichen Zusammenarbeit.

Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. D. Bohne danke ich besonders für die spontane Bereitschaft der Übernahme des Korreferats.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Kollegen am Institut für Gebäude- und Solartechnik der TU Braunschweig für die fachliche Unterstützung bedanken. Besonderer Dank gilt Franziska Bockelmann, Florian Witowski und Mathias Schlosser, die durch ihre wertvolle Unterstützung und Anregungen zum Gelingen der Arbeit beitrugen. Des Weiteren danke ich ganz besonders Herrn Dr.-Ing. R. Himmler von EGS-plan International GmbH für die fachliche Unterstützung der Arbeit und das seit Jahren mir entgegengebrachte Vertrauen. Einen großen Anteil am erfolgreichen Abschluss der Arbeit verdanke ich insbesondere Herrn Markus Peter, der mich immer wieder ermutigt hat und mir allzeit mit Rat und Tat zur Seite stand. Danke für die wertvollen Kommentare, Kritiken und Anregungen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Familie, mit deren Unterstützung diese Arbeit erst möglich war. Das Fundament der Durchführung dieser Arbeit war die verständnisvolle und liebevolle Unterstützung sowie der ununterbrochene Rückhalt meiner Frau Beate, den man nur begrenzt in Worte fassen kann. Während der Arbeit hat es viele Höhen und Tiefen gegeben. Mit der Geburt meiner beiden Kinder Maxima und Jona durfte ich das schönste Geschenk auf Erden erfahren. Leider mussten diese in den letzten Jahren oftmals auf Ihren Papa verzichten. Deshalb drücke ich euch beide zukünftig umso mehr!

*„Mit **aktiven Gebäuden** können wir **Klimaneutralität** schaffen, die alle Energiedienstleistungen des Gebäudes berücksichtigt, also auch **Strom und Mobilität**. […]*

***Jedes Gebäude** sollte seinen möglichen **Beitrag zur Energieerzeugung und -speicherung** leisten. Das stabilisiert urbane Netze, reduziert den Bedarf an Fernleitungen und den Landschaftsverbrauch.“*

Prof. Manfred Hegger (Architekt und Hochschullehrer, 1946 - 2016)

KURZFASSUNG

Ein klimaneutraler Gebäudebestand kann durch eine Kombination der Reduzierung des Energieverbrauchs und der Nutzung erneuerbarer Energien erreicht werden. Einen Lösungsansatz bilden sog. EnergiePLUS-Gebäude, die aus regenerativen Quellen mehr Energie bereitstellen, als zu ihrer Bewirtschaftung benötigt. Die Überschüsse werden im Allgemeinen über das öffentliche Stromnetz für andere Liegenschaften zu Verfügung gestellt. Die Steigerung der Eigenstromnutzung in EnergiePLUS-Gebäuden und die Netzdienlichkeit von gebäudeintegrierten Photovoltaikanlagen bilden die Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit. Auf der Basis eines Gebäude- und Anlagenmodells des „Nur-Strom-Konzeptes“ eines realisierten Einfamilienhauses werden mittels numerischer Simulationen Untersuchungen zu Anlagenkonfigurationen und Details für einen eigenstromoptimierten und netzdienlichen Betrieb der Photovoltaikanlage durchgeführt. Zusammenhänge zwischen Maßnahmen zur Erhöhung der Eigenstromnutzung und der angestrebten Klimaneutralität werden dargestellt und diskutiert. Als Dimensionierungshilfen für vergleichbare Gebäude wurden Auslegungsdiagramme und ein auf MS Excel basierendes Tool entwickelt.

Zur Steigerung der solaren Eigenstromnutzung werden im ersten Teil der Arbeit unterschiedliche Systemvarianten und geringfügige Modifikationen an der bestehenden Gebäudetechnik untersucht. Im Kontext der Zielsetzung des EnergiePLUS-Standards werden Nachtabsenkung, Strategien zur PV-Überschussregelung mit angepasstem Wärmepumpenbetrieb, die Vergrößerung des vorhandenen Pufferspeichervolumens sowie der Kapazität des Stromspeichers in Systemsimulationen abgebildet. Durch die betrachteten Maßnahmen können der PV-Eigennutzungsanteil und der PV-Deckungsanteil von jeweils 30 % auf beiderseits 60 % verdoppelt werden. Eine wetterprognosegeführte Regelstrategie zur Ladung der Batterie führte zu keiner nennenswerten Erhöhung der Eigenstromnutzung.

Die Auswertungen zeigen, dass zur Erhöhung des solaren Eigenstromanteils grundsätzlich zunächst Wasserspeicher und die Gebäudemasse zur Speicherung von Wärme genutzt werden sollten (sog. „Power-to-Heat“). Das Pufferspeichervolumen sollte etwa 100 bis 130 l je kWp der Photovoltaikanlage entsprechen. Bei der Verwendung von Stromspeichern sind für die in Deutschland zu erwartenden PV-Erträge etwa 1 kWh nutzbare Speicherkapazität je kWp der Photovoltaikanlage zu empfehlen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird der netzdienliche Betrieb von gebäudeintegrierten Photovoltaikanlagen untersucht. Mit *Netzdienlichkeit* werden meistens die Einflüsse der Einbindung jedweder dezentraler Stromerzeugung ins öffentliche Stromnetz bewertet. Für den Betrieb von PV-Anlagen ist Netzdienlichkeit vor allem aus der Sicht von Stromnetzbetreibern ein wesentliches Kriterium. Wichtige Aspekte sind Netzbezugs- und Einspeisespitzen, die im Rahmen der Arbeit durch unterschiedliche Lastmanagements (z. B. Lastabwurf) sowie variierende Betriebsführung beim Laden des Stromspeichers untersucht werden.

Für das Referenzgebäude kann gezeigt werden, dass der Lastabwurf der Wärmepumpe (Sperrung des Wärmepumpenbetriebs) ab einem Netzstrombezug größer 3 kW zu einem netzdienlichen Betrieb führt, ohne den thermischen Komfort des Gebäudes zu beeinflussen.

Mit angepasster Ladestrategie können Stromspeicher zur Entlastung der Stromnetze beitragen. Während hoher PV-Generatorleistungen kann ein Stromspeicher die Einspeiseleistung verringern und in den Abendstunden dämpfend auf Netzbezugsspitzen wirken. Im Zusammenhang mit einer Reduzierung der solaren Eigenstromnutzung durch eine netzdienliche Betriebsweise der Anlage, ist abzuwägen, ob Netzdienlichkeit oder eine eigenstromoptimierte Betriebsweise des Stromspeichers im Vordergrund stehen.

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT

KURZFASSUNG

NOMENKLATUR

1 EINLEITUNG 1

1.1 Wege zum klimaneutralen Gebäude 1

1.2 Netzparität und Stromgestehungskosten 3

1.3 Zielsetzung 3

1.4 Methodik 5

2 ÜBERBLICK ZUM STAND DER FORSCHUNG 7

2.1 Standards in der Praxis 7

2.2 Das EnergiePLUS-Gebäude 9

2.2.1 Methodische Grundlagen der Bilanzierung 9

2.2.2 Aktueller Stand zur Begriffsdefinition und Bilanzierung 11

2.2.3 Verwendete Definition und Bewertungsmethodik 12

2.3 Solarer Deckungsanteil 13

2.3.1 PV-Eigennutzungsanteil und PV-Deckungsanteil 13

2.3.2 Einfluss unterschiedlicher zeitlicher Berechnungswerte 16

2.4 Kostenentwicklung Photovoltaikanlagen und Haushaltsstrompreise 16

2.5 EEG-Umlage für Eigenverbrauch und Einspeisevergütung 17

2.6 Batteriesysteme für Photovoltaikanlagen 18

2.6.1 Batterietyp: Blei-Säure Akkumulatoren 18

2.6.2 Der Batterielader – Laderegler 19

2.7 Demand Side Management – Potenzial der Wärmepumpen 20

3 DAS REFERENZGEBÄUDE – ARCHITEKTUR, BAUPHYSIK UND ENERGIEKONZEPT 22

3.1 Baukörper und Gebäudehülle 22

3.2 Gebäudetechnik und Elektromobilität 23

3.2.1 Wärmeübertragungssystem Fußbodenheizung 23

3.2.2 Kontrollierte Wohnungslüftung 24

3.2.3 Beleuchtung und Haushaltsgeräte 24
3.2.4 Elektromobilität 25
3.3 Energieversorgung 26
3.3.1 Photovoltaikanlage mit Stromspeichersystem 26
3.3.2 PV-Überschussregelung 27
3.4 Energiekonzept mit Regelstrategien für die Anlagensimulation 29

4 ENTWICKLUNG DER GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION 31
4.1 Vorgehensweise 31
4.2 Simulationswerkzeug TRNSYS 32
4.3 Modell der Gebäudesimulation 32
4.3.1 Gebäudemodell 32
4.3.2 Modellierung der Wärmeübertragungssysteme und deren Regelung 38
4.3.3 Validierung des Gebäudesimulationsmodells 41
4.4 Modellierung der Trinkwarmwasserbereitung 43
4.5 Modellierung der Photovoltaikanlage mit Stromspeichersystem 44
4.5.1 Photovoltaikanlage 44
4.5.2 Stromspeichersystem 45
4.5.3 Laderegler und Energiemanagementsystem 46
4.5.4 Kalibrierung der PV-Anlage 47
4.6 Anlagensimulationsmodell 48
4.7 Funktionsbeschreibung Gebäude- und Anlagensimulationsmodell 56
4.8 Ergebnisse der Basisvariante 60
4.8.1 Energiebedarf und thermischer Komfort 60
4.8.2 PV-Eigennutzungsanteil und PV-Deckungsanteil 64
4.8.3 Lastverlauf Strombedarf, Netzstrombezug und Netzstromeinspeisung 67

5 ERHÖHUNG DER EIGENSTROMNUTZUNG 71
5.1 Vorgehensweise 71
5.2 Nachtabsenkung 73
5.3 PV-Überschussregelung 75
5.4 Pufferspeichervolumen 79

5.5 Stromspeicherkapazität 82
5.6 Systemvarianten 83
5.7 Wirtschaftlichkeit der Einzelmaßnahmen zur Eigenstromnutzung 86
5.8 Einfluss der Größe der Photovoltaikanlage 89
5.9 Gegenüberstellung thermische und elektrische Speichersysteme 93
5.10 wetterprognosegeführte Regelung 99
5.11 Bestätigung der Simulationsergebnisse – Simulation versus Praxis 105
5.12 Auslegungswerkzeuge 106
5.12.1 Vorgehensweise 106
5.12.2 Sensitivitätsanalyse zu EnergiePLUS-Einfamilienhäusern 106
5.12.3 Auslegungsdiagramme 110
5.12.4 Rechnergestützte Dimensionierung – EnergiePLUS und Eigenstromnutzung 118

6 BETRIEBSSTRATEGIEN FÜR EINEN NETZDIENLICHEN BETRIEB 121
6.1 Vorgehensweise 121
6.2 Lastabwurf der Wärmepumpe 121
6.3 Betriebsstrategie zur Beladung des Stromspeichers 128
6.3.1 Betriebsweise zur vorrangigen Steigerung der Eigenstromnutzung 128
6.3.2 Betriebsweise mit Freigabe der Batterieladung nach Uhrzeit 131
6.3.3 Betriebsweise mit wetterprognosegeführter Batterieladung 138

7 ZUSAMMENFASSUNG 147

8 ENERGIEPOLITISCHER AUSBLICK 165

LITERATURVERZEICHNIS 166
ABBILDUNGSVERZEICHNIS 173
TABELLENVERZEICHNIS 184
GLOSSAR 187
ANHANG 192