

Stephan Eduard Arno Röhrenbeck

### **Wärmepumpen und Speichersysteme als Flexibilitäten im Kontext des Zellularen Ansatzes**

Band 7

# Wärmepumpen und Speichersysteme als Flexibilitäten im Kontext des Zellularen Ansatzes

von

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stephan Eduard Arno Röhrenbeck  
geb. in Worms

Tag der mündlichen Prüfung: 05.07.2019

Dekan des Fachbereichs: Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Prof. Dr. Ping Zhang

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

D386



Forschungsberichte des Lehrstuhls für Energiesysteme und  
Energiemanagement

Band 7

**Stephan Eduard Arno Röhrenbeck**

**Wärmepumpen und Speichersysteme als  
Flexibilitäten im Kontext des Zellularen Ansatzes**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag  
Düren 2019

**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.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6838-2

ISSN 2366-4967

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Für meine Eltern.



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK). Ich möchte allen danken, die mich während der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank richtet sich an meinen Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellföw, für die Möglichkeit der Promotion an seinem Lehrstuhl und die vielen wertvollen Hinweise, Anregungen und Diskussionen im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit. Für das darüber hinaus entgegengebrachte Vertrauen in meine Person, die Offenherzigkeit sowie die hilfreichen Gespräche möchte ich Herrn Wellföw herzlich danken. Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner danke ich für die Übernahme des Koreferats und das Interesse an meiner Arbeit.

Wesentliche Grundlagen dieser Arbeit sind im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsprojektes *ThermSpe4EE* entstanden. Den beteiligten Projektpartnern *Pfalzwerke AG*, *ait-deutschland GmbH*, *geomer GmbH*, *Fachgebiet Hauskybernetik der TUK* und *Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der TUK* danke ich für die erfolgreiche und stets freundliche Zusammenarbeit.

Meinen ehemaligen und derzeitigen Kollegen am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement danke ich für die gute kollegiale Zusammenarbeit und die interessanten Diskussionen. Namentlich möchte ich an dieser Stelle Herrn Martin Ostermann und Herrn Anes Benzati nennen, deren Kritik und Motivation eine große Stütze waren.

Ein großer Dank gilt ebenfalls meiner Familie, die mich in jeder Hinsicht unterstützt und gefördert hat. Meiner Partnerin Julia Nowak danke ich von Herzen für den notwendigen Ausgleich zur Arbeit und Ihr Verständnis während dieser arbeitsreichen Zeit. Sehr dankbar bin ich für die Zeit mit meinem Sohn Florian, aus der ich immer wieder Kraft schöpfen konnte und die mich das Wichtige im Leben erkennen ließ.

Nicht zuletzt danke ich allen Studenten, die durch ihre Studien- und Abschlussarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Problemstellung . . . . .	1
1.2	Ziele und Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Ausbau elektrischer regenerativer Erzeugungsanlagen . . . . .	5
2.1.1	Historie und zukünftiger Trend . . . . .	5
2.1.2	Besonderheiten der Verteilung regenerativer Erzeugungsanlagen . . . . .	6
2.2	Energiebedarf in Deutschland . . . . .	7
2.2.1	Aktuelle Zusammensetzung und zukünftiger Trend . . . . .	7
2.2.2	Wärmewende, Mobilitätswende und neue Lasten . . . . .	8
2.3	Herausforderungen der Energiewende . . . . .	9
2.3.1	Grundsätze heutiger Energieversorgung und Energieversorgungsnetze . . . . .	9
2.3.2	Energieeffizienz versus neue Lasten . . . . .	11
2.3.3	Bilanzierung fluktuierender Stromerzeugung und Flexibilitätsbedarf . . . . .	12
2.3.4	Veränderung der Versorgungsstruktur . . . . .	13
2.3.5	Auswirkungen auf die elektrischen Verteilnetze . . . . .	14
2.4	Der Zellulare Ansatz der Energieversorgung . . . . .	16
2.4.1	Grundidee des Zellularen Ansatzes . . . . .	16
2.4.2	Aufbau und Komponenten von Energiezellen . . . . .	17
2.4.3	Zellebenen, Zellsteuerung und Zellinteraktion . . . . .	19
2.5	Flexibilitäten im elektrischen Energieversorgungssystem . . . . .	20
2.5.1	Definition der Flexibilität . . . . .	20
2.5.2	Anwendungszwecke von Flexibilität . . . . .	21
2.5.3	Technische Systeme zur Realisierung von Flexibilitätsoptionen . . . . .	22
2.5.4	Bereitstellung, Einsatz und Restriktionen . . . . .	23
2.6	Grundlagen elektrischer Wärmepumpen . . . . .	24
2.6.1	Grundlegende Funktionsweise . . . . .	24
2.6.2	Arten, Betriebsweisen und Dimensionierung . . . . .	25

<b>3</b>	<b>Systemdefinition und Modellierung</b>	<b>29</b>
3.1	Definition der Energiezellen . . . . .	29
3.1.1	Energiezelle Haushalt . . . . .	29
3.1.2	Energiezelle Niederspannungsnetz . . . . .	30
3.2	Modellierung der abführenden Wandler . . . . .	31
3.2.1	Haushaltslasten . . . . .	31
3.2.2	Wärmepumpensysteme . . . . .	35
3.2.2.1	Wärmepumpe . . . . .	35
3.2.2.2	Thermischer Speicher . . . . .	38
3.2.2.3	Wettermodell . . . . .	40
3.2.2.4	Wohngebäude . . . . .	40
3.2.2.5	Trinkwarmwasserbedarf . . . . .	44
3.2.3	Klassische Auslegung der Wärmepumpen-Speichersysteme . . . . .	44
3.2.4	Betriebsweisen der Wärmepumpen-Speichersysteme . . . . .	46
3.2.4.1	Wärmegeführte Betriebsweise (Referenzbetrieb) . . . . .	46
3.2.4.2	Strompreisorientierte Betriebsweise (marktlicher Flexibilitätsabruf) . . . . .	47
3.2.4.3	Netzdienliche Betriebsweise (Haushaltszellbilanzierung) . . . . .	49
3.2.4.4	Netzorientierte Betriebsweise (Niederspannungszellbilanzierung) . . . . .	50
3.2.5	Elektromobilität . . . . .	52
3.3	Modellierung der Photovoltaik als zuführender Wandler . . . . .	54
3.4	Modellierung und Steuerung des Batteriespeichersystems . . . . .	56
3.5	Modellierung der elektrischen Netze . . . . .	57
3.6	Modellierung der Stromtarife . . . . .	58
3.7	Weitere Annahmen, Dimensionierung und Zellcontroller . . . . .	59
3.7.1	Annahmen der Haushalts-Zellsimulation . . . . .	59
3.7.2	Annahmen und Szenarien der Niederspannungs-Zellsimulation . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Flexibilitätspotential von Wärmepumpen-Speichersystemen</b>	<b>61</b>
4.1	Einflussfaktoren und Charakteristika der Flexibilität . . . . .	61
4.2	Wärme- und Kältebedarfe als Flexibilitätsgrundlage . . . . .	62
4.2.1	Temperaturabhängigkeit des Heizwärme- und Kühlbedarfes . . . . .	62
4.2.2	Korrelation des Heizwärme- und Kühlbedarfs zur solaren Strahlung . . . . .	64
4.2.3	Korrelation des Heizwärme- und Kühlbedarfs zum Windaufkommen . . . . .	65
4.2.4	Zeitliche Betrachtung des Heizwärme- und Kühlbedarfes . . . . .	66

4.2.5	Korrelationen des Trinkwarmwasserbedarfes . . . . .	68
4.3	Quantifizierung der Flexibilitätscharakteristika . . . . .	69
4.3.1	Definition der einzelnen Flexibilitätscharakteristika . . . . .	69
4.3.2	Leistungsvergleich und Gleichzeitigkeit als Basis der Quantifizierung . . . . .	72
4.4	Leistungsänderungspotential von Wärmepumpen . . . . .	73
4.4.1	Zuschaltbare elektrische Leistung (negative Flexibilität) . . . . .	73
4.4.2	Abschaltbare elektrische Leistung (positive Flexibilität) . . . . .	75
4.5	Dauer des Flexibilitätsabrufes . . . . .	76
4.5.1	Einfluss der Dimensionierung des thermischen Speichers . . . . .	76
4.5.2	Einfluss der Dimensionierung der Wärmepumpe . . . . .	79
4.6	Einfluss des vorangegangenen Flexibilitätsabrufes . . . . .	80
4.7	Bewertung des generellen Flexibilitätspotentials . . . . .	84
4.8	Auswahl der Dimensionierung für die Zellbetrachtung . . . . .	85
<b>5</b>	<b>Bilanzierungsfähigkeit und Flexibilitätsabruf von Wärmepumpen auf Haushaltszelebene</b>	<b>87</b>
5.1	Untersuchungsgegenstand . . . . .	87
5.2	Analyse der Bilanzierungsfähigkeit . . . . .	88
5.2.1	Energiebedarf, Energiebereitstellung und Energiebilanz . . . . .	88
5.2.2	Gesamtenergie, ausgetauschte Energie und Eigenverbrauch . . . . .	89
5.3	Analyse des Flexibilitätsabrufes . . . . .	91
5.3.1	Durchschnittliche Wärmepumpen-Lastprofile . . . . .	91
5.3.1.1	Temperaturabhängige Lastverteilung . . . . .	91
5.3.1.2	Zeitabhängige Lastverteilung . . . . .	93
5.3.2	Verschobene Energiemengen . . . . .	94
5.3.3	Abrufdauern der Wärmepumpe als Flexibilität . . . . .	98
5.3.4	Ausnutzung von Preisstufen . . . . .	100
5.3.5	Leistungsverteilung der Residuallast der Haushaltzelle . . . . .	101
5.4	Auswirkungen des Flexibilitätsabrufes . . . . .	103
5.4.1	Effizienz der Wärmepumpe . . . . .	103
5.4.2	Thermische und elektrische Verluste . . . . .	104
5.4.3	Veränderung der Energiebedarfe und Energiebereitstellung . . . . .	105
5.4.4	Kostenbetrachtung . . . . .	108

---

<b>6</b>	<b>Bilanzierungsfähigkeit und Flexibilitätsabruf von Wärmepumpen auf Niederspannungs-Zellebene</b>	<b>111</b>
6.1	Untersuchungsgegenstand . . . . .	111
6.2	Analyse der Haushaltszellen im Kontext der Niederspannungszelle . . . . .	112
6.2.1	Energiebilanzen der Haushaltszellen . . . . .	112
6.2.2	Energieaustausch der Haushaltszellen . . . . .	113
6.2.3	Energieeffizienz der Wärmepumpen . . . . .	115
6.2.4	Kosten der Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpe . . . . .	116
6.3	Gleichzeitigkeit des Einsatzes von Wärmepumpen . . . . .	117
6.4	Auswirkungen des Flexibilitätsabrufs auf Niederspannungs-Zellebene . . . . .	120
6.4.1	Änderung des Energieaustauschs der Niederspannungszelle . . . . .	120
6.4.2	Eigenverbrauchsquote der Niederspannungszelle . . . . .	121
6.4.3	Verschobene elektrische Energie durch flexiblen Wärmepumpen-Einsatz . . . . .	123
6.4.4	Residuallastverteilung der Niederspannungszelle . . . . .	124
6.4.5	Netzbelastung der Niederspannungszelle . . . . .	125
6.5	Bewertung der Treiber für Netzausbau . . . . .	128
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>129</b>
<b>8</b>	<b>Kritische Würdigung der Ergebnisse und Ausblick</b>	<b>133</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>151</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>159</b>
<b>12</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>161</b>
<b>13</b>	<b>Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes</b>	<b>163</b>
<b>14</b>	<b>Anhang</b>	<b>169</b>
14.1	Koeffizienten des Wärmepumpenmodells . . . . .	169
14.2	Gebäudedaten . . . . .	170
14.3	Dimensionierung der Wärmepumpe . . . . .	170
14.4	Übersicht der Parameterausprägungen der Zellbetrachtungen . . . . .	171
14.5	Restriktionsorientierte Betriebsweise (Vermeidung von Netzüberlastungen) . . . . .	172

---

14.6	Mathematische Herleitungen . . . . .	175
14.6.1	Berechnung des Leistungsfaktors des Photovoltaik-Wechselrichters . . . . .	175
14.6.2	Berechnung der maximalen Wirkleistungsabgabe des Photovoltaik- Wechselrichters . . . . .	175
14.7	Berechnung der Preisstufen des Wärmestromtarifes . . . . .	176
14.8	Häufigkeitsverteilungen der Wetterdaten . . . . .	178
<b>15</b>	<b>Extended Abstrat</b>	<b>179</b>
15.1	Introduction . . . . .	179
15.2	Basics and state of the art . . . . .	180
15.3	System definition and modelling . . . . .	181
15.4	Flexibility potential of heat pump storage systems . . . . .	181
15.5	Balancing ability and flexibility calls of heat pumps at household level . . . . .	182
15.6	Balancing ability and flexibility calls of heat pumps at low voltage grid level . . . . .	183
15.7	Summary and outlook . . . . .	183
<b>16</b>	<b>Studentische Arbeiten</b>	<b>185</b>
<b>17</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>187</b>