

---

# Energiesysteme: regenerativ und dezentral



---

Günther Brauner

# Energiesysteme: regenerativ und dezentral

Strategien für die Energiewende

Günther Brauner  
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe  
TU Wien, Österreich

ISBN 978-3-658-12754-1                      ISBN 978-3-658-12755-8 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-658-12755-8

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

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.

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

---

## Der Autor



**Günther Brauner** Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe.

Studium der Nachrichtentechnik und Promotion auf dem Gebiet Hochspannungstechnik an der Technischen Universität Darmstadt. Danach 14 Jahre bei AEG in Frankfurt im Fachgebiet Netzanlagen beschäftigt. Dort war er für die Entwicklung des „Programmsystem für Aufgaben der Netzplanung – PAN“ verantwortlich und hat Systemstudien über Netzdynamik, Netzregelung, Blackout und Netzwiederaufbau durchgeführt. Seit 1990 an der Technischen Universität Wien im Bereich Energietechnik mit Forschungsarbeiten auf den Gebieten: Netzintegration regenerativer Energiequellen insbesondere Photovoltaik und Windenergie, Netzdynamik und Netzregelung, Masterplan für Übertragungsnetze, Elektromobilität und dezentrale regenerative Energiesysteme.

Leitung der VDE-Arbeitsgruppen: „Flexible Kraftwerke 2020“ und „Zentrale versus dezentrale Energieerzeugung 2050“.



---

## Vorwort

Heute basiert die Energieversorgung der Welt vorwiegend auf fossilen Energieträgern. Der fossile Energiebedarf wird durch die Entwicklung der Welt weiter ansteigen. Entwicklungsländer werden zu Schwellenländern und Schwellenländer werden zu Industrienationen. Europa hat eine sehr starke Abhängigkeit von fossilen Energieträgern aber nicht ausreichende eigene fossile Ressourcen. Die Strategie der Europäischen Union geht daher in Richtung einer überwiegend regenerativen Energieversorgung. Damit werden die Unsicherheit durch Abhängigkeit von Lieferländern von Energie verringert, die Preisstabilität der Energie verbessert und die Treibhausgasemissionen zumindest innerhalb der Europäischen Union vermindert.

Der Weg zur nachhaltigen Energieversorgung ist prinzipiell über zentrale und dezentrale Versorgungsstrukturen möglich. Bei zentralen Ansätzen werden weiträumige Übertragungsnetze – das Supergrid – zur interkontinentalen Verbindung von regenerativen Erzeugungsgebieten geplant.

In diesem Buch werden dezentrale Ansätze dargestellt, bei denen die Erzeugung möglichst dort erfolgen soll, wo der Energiebedarf besteht. Die Erzeugung, der Bedarf und die Speicherung von regenerativer Energie sollten dabei so aufeinander abgestimmt sein, dass möglichst eine lokale und regionale Vorbilanzierung möglich ist und dadurch der massive Ausbau von Übertragungs- und Verteilungsnetzen vermieden wird. Ganz ohne Netzausbau kommt auch der dezentrale Ansatz nicht aus, insbesondere für die Netzintegration der regenerativen Quellen sind Netzanbindungen und für den Energietransport Netzverstärkungen notwendig. Diese halten sich aber im Vergleich zu einem Supergrid in Grenzen.

Die Umstrukturierung von der heutigen zentralen nuklear-fossilen zur dezentralen regenerativen Energieversorgung erfolgt nicht als Revolutions- sondern als Evolutionsprozess. Da erhebliche Investitionen hierzu notwendig sind, sind pro Jahr nur kleine Änderungen von weniger als einem Prozent möglich und die regenerativen Anteile der Energie wachsen nur langsam aber stetig. Die langen Vorlaufzeiten bis etwa 2050 sind eine Chance für die Energieversorger, die Industrie und die Investoren der dezentralen Versorgungsstrukturen, in einem längerfristigen Evolutionsprozess neue technologische und wirtschaftliche Energie-Versorgungsmodelle zu entwickeln und umzusetzen.

Derzeit ist die Unsicherheit bei diesem langfristigen Evolutionsprozess groß. Traditionelles Struktur- und begrenztes Komponentendenken kann zu bedeutenden Fehlinvestitionen führen. Es sind ganzheitliche Lösungsansätze notwendig, die Ressourcen und Potenziale, Technologie, Umweltauswirkungen, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit gleichermaßen zusammenführen. Die ganzheitliche Betrachtung bestimmt zukünftig die notwendigen Eigenschaften der Systemkomponenten und nicht die derzeit vorhandenen Komponententechniken die Eigenschaften der zukünftigen dezentralen regenerativen Systeme. Modellansätze können dabei helfen, die geeigneten Zielpfade frühzeitig zu erkennen und damit auch längerfristig erfolgreich und wirtschaftlich umzusetzen.

Da die Energiewende als langfristiger Evolutionsprozess alle Menschen und Industrien als Energieanwender betrifft, sind ein breites Verständnis und darauf aufbauend auch eine breite Akzeptanz für die Umstrukturierung notwendig. Ich habe mich daher bemüht, in diesem Buch sparsam mit Formeln und Rechenalgorithmen umzugehen, damit das Buch für möglichst Viele lesbar bleibt. Da ich selbst in der Industrie längerfristig Programme für die Simulation von Energiesystemen entwickelt habe, sollen die hier dargestellten Modelle auch den Programmanwendern helfen, geeignete innovative Simulationsmodelle zu entwickeln, um den dezentralen Evolutionsprozess fundiert technisch und wirtschaftlich begleiten zu können.

Abschließend möchte ich Herrn Dr.-Ing. Herbert Bessei für das Korrekturlesen und wertvolle Hinweise und Anregungen danken. Meiner Frau Hannelore möchte ich für das Verständnis und die Geduld bedanken, mit denen Sie den arbeitsaufwendigen Vorgang, ein Buch zu schreiben, begleitet hat.

Herzlich bedanken möchte ich mich beim Springer-Verlag für die hervorragende Betreuung und Gestaltung dieses Buches.

Wien  
3. November 2015

Günther Brauner



---

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>Energiesituation und Herausforderungen</b> .....                       | 1  |
| 1.1      | Historische Voraussetzungen und Entwicklungstendenzen .....               | 1  |
| 1.2      | Sicherheit der Ressourcen.....  | 3  |
| 1.3      | Entwicklung des Primärenergiebedarfs .....                                | 4  |
| 1.4      | Bevölkerungsentwicklung.....  | 5  |
| 1.5      | Energiebedarf nach Regionen .....   | 7  |
| 1.6      | Fossile Reichweite bei Gleichverteilung und Effizienz .....               | 9  |
| 1.7      | Potenzialgrenzen: The Point of no Return .....                            | 10 |
| 1.8      | Langfristige Energieperspektive in Deutschland .....                      | 13 |
| 1.9      | Langfristige Energieperspektive in Österreich.....                        | 14 |
|          | Literatur.....  | 15 |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen der dezentralen nachhaltigen Energieversorgung</b> .....    | 17 |
| 2.1      | Historischer Rückblick auf die elektrische Energieversorgung .....        | 17 |
| 2.2      | Entwicklungsperioden des elektrischen Energiesystems.....                 | 19 |
| 2.3      | Supergrid als zentrale Orientierung .....                                 | 23 |
| 2.4      | Microgrid als dezentrale Orientierung.....                                | 24 |
| 2.5      | Strukturen der zentralen Elektrizitätsversorgung.....                     | 25 |
| 2.6      | Strukturen der dezentrale Energieversorgung .....                         | 29 |
| 2.6.1    | Definition der dezentralen Energieversorgung.....                         | 29 |
| 2.6.2    | Energieautarkie .....   | 29 |
| 2.6.3    | Leistungsautarkie .....   | 29 |
| 2.6.4    | Eigenschaften der neuen dezentralen Energieversorgung.....                | 30 |
| 2.6.5    | Langfristige Anforderungen bei der dezentralen<br>Energieversorgung ..... | 32 |
| 2.7      | Energiewirtschaft der Erzeugungsanlagen.....                              | 34 |
| 2.8      | Energiewirtschaft des Energiesystems.....                                 | 36 |
|          | Literatur.....  | 39 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>3 Windenergie</b> .....   | 41  |
| 3.1 Windenergiepotenzial und Anlagencharakteristik .....                 | 42  |
| 3.2 Energiewirtschaft der Windenergie.....                               | 45  |
| 3.3 Zukünftige Erfordernisse zur Netzintegration der Windenergie.....    | 47  |
| 3.3.1 Das Flächengesetz der dezentralen Windenergie.....                 | 47  |
| 3.3.2 Investitions- und Kostenrechnung bei Windenergieanlagen.....       | 50  |
| 3.3.3 Änderung der Netztarife durch Windintegration .....                | 52  |
| 3.4 Windenergie für Großstädte .....                                     | 56  |
| Literatur.....   | 58  |
| <b>4 Photovoltaik</b> .....  | 61  |
| 4.1 Solares Dargebot .....   | 61  |
| 4.2 Strahlungsabsorption durch geneigte Flächen .....                    | 63  |
| 4.3 Gebäudeintegrierte Solarenergie.....                                 | 65  |
| 4.4 Entwicklung der gebäudeintegrierten Fotovoltaik bis 2050 .....       | 68  |
| 4.5 Energiewirtschaft der Photovoltaik.....                              | 69  |
| 4.5.1 Volle Nutzung der PV ohne Rückspeisung .....                       | 70  |
| 4.5.2 PV-Nutzung mit Rückspeisung .....                                  | 72  |
| Literatur.....   | 74  |
| <b>5 Bilanzierung und Ausgleichsenergie</b> .....                        | 75  |
| 5.1 Eigenschaften der regenerativen Energiequellen .....                 | 75  |
| 5.2 Regenerativer Erzeugungsmix .....                                    | 78  |
| 5.3 Bereitstellung von Ausgleichsenergie.....                            | 78  |
| 5.4 Speicher und deren Einsatzmöglichkeiten .....                        | 81  |
| 5.4.1 Speichertechnologien zur Bilanzierung .....                        | 81  |
| 5.4.2 Pumpspeicher.....  | 82  |
| 5.4.3 Stationäre Batteriespeicher .....                                  | 83  |
| 5.4.4 Mobile Speicher von Elektrofahrzeugen.....                         | 84  |
| 5.5 Flexible thermische Kraftwerke.....                                  | 85  |
| 5.6 Dezentrales Energiemanagement.....                                   | 86  |
| 5.7 Power-to-Gas und Gas-to-Power .....                                  | 87  |
| Literatur.....   | 89  |
| <b>6 Netzdienstleistungen in der dezentralen Energieversorgung</b> ..... | 91  |
| 6.1 Aufgaben der Netzdienstleistungen und der Netzregelung.....          | 92  |
| 6.2 Kinetik der Schwungmassen.....                                       | 93  |
| 6.3 Primärregelung.....  | 95  |
| 6.4 Sekundärregelung .....   | 98  |
| 6.5 Regelungsaufgaben bei Erzeugungsszenarien bis 2050.....              | 101 |
| 6.6 Primärregelung mit Windenergie und Photovoltaik.....                 | 102 |
| 6.7 Netzdienstleistungen durch Windenergieanlagen .....                  | 104 |
| 6.8 Netzdienstleistungen durch Photovoltaik-Anlagen.....                 | 105 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.9      | Anforderungen an die Netzregelung mit Batteriespeichern.....               | 107        |
| 6.10     | Einfluss von dezentralen Systemen auf das Engpassmanagement.....           | 108        |
|          | Literatur.....   | 109        |
| <b>7</b> | <b>Strukturierung der dezentralen Versorgung.....</b>                      | <b>111</b> |
| 7.1      | Dezentrale Kleinzelle versus dezentrales Kollektiv.....                    | 111        |
| 7.2      | Dezentrales Energiesystem.....   | 117        |
| 7.2.1    | Dezentrale Energieversorgungsstruktur.....                                 | 117        |
| 7.2.2    | Einfamilienhaus.....   | 119        |
| 7.2.3    | Gebäude.....   | 122        |
| 7.2.4    | Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen.....                       | 122        |
| 7.2.5    | Niederspannungsnetz.....   | 123        |
| 7.2.6    | Mittelspannungsnetz: Dörfer und Städte mit WEA.....                        | 125        |
| 7.2.7    | Windintegration in Hoch- und Höchstspannungsnetze.....                     | 126        |
|          | Literatur.....   | 128        |
| <b>8</b> | <b>Rahmenbedingungen und Strategien der nachhaltigen Entwicklung.....</b>  | <b>129</b> |
| 8.1      | Rahmenbedingungen der nachhaltigen Entwicklung in Europa.....              | 129        |
| 8.2      | Langfristszenarien der Elektrizitätserzeugung in Deutschland.....          | 133        |
| 8.3      | Langfristszenarien der Elektrizitätserzeugung in Österreich.....           | 136        |
| 8.4      | Speichereinsatz zur Bilanzierung der regenerativen Erzeugung.....          | 138        |
| 8.5      | Strategien für die nachhaltige Entwicklung.....                            | 141        |
| 8.6      | Speichertechnologien und deren Wirtschaftlichkeit.....                     | 144        |
| 8.6.1    | Pumpspeicher.....  | 144        |
| 8.6.2    | Batteriespeicher.....  | 145        |
| 8.6.3    | Vergleich der Speichertechnologien.....                                    | 146        |
| 8.7      | Energieaustausch zwischen Regionen.....                                    | 147        |
|          | Literatur.....   | 150        |
| <b>9</b> | <b>Organisation und Marktmodell der dezentralen Energieversorgung.....</b> | <b>151</b> |
| 9.1      | Organisation des Elektrizitätsmarktes vor der Liberalisierung.....         | 151        |
| 9.2      | Organisation der heutigen Energieversorgung.....                           | 153        |
| 9.2.1    | Marktmodell eines freien Endkunden.....                                    | 155        |
| 9.2.2    | Marktmodell eines Netzbetreibers.....                                      | 156        |
| 9.2.3    | Marktmodell der Elektrizitätsversorgung.....                               | 158        |
| 9.3      | Neue Ansätze für die dezentrale Energieversorgung.....                     | 158        |
| 9.4      | Neue Marktmodelle der dezentralen Niederspannungsnetze.....                | 160        |
| 9.4.1    | Marktmodell für Einfamilienhäuser.....                                     | 162        |
| 9.4.2    | Marktmodell für Siedlungsgebäude.....                                      | 162        |
| 9.4.3    | Marktmodell für Siedlungen.....  | 164        |
| 9.5      | Neue Geschäftsmodelle für die dezentrale Energieversorgung.....            | 166        |
|          | Literatur.....   | 167        |

---

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>10</b> | <b>Dezentrale Entwicklungspotenziale und -konzepte</b> .....              | 169 |
| 10.1      | Heutige Fördermodelle der regenerativen Energie .....                     | 170 |
| 10.2      | Vom passiven Konsumernetz zum aktiven Prosumernetz.....                   | 171 |
| 10.3      | Die Entwicklung des Bankwesens als Vergleichsmodell.....                  | 172 |
| 10.4      | Neue Geschäftsmodelle der dezentral organisierten Energieversorgung ..... | 173 |
| 10.4.1    | Investormodelle für die regenerative Erzeugung .....                      | 173 |
| 10.4.2    | Contractingmodelle beim Endkunden zur Effizienzsteigerung ...             | 174 |
| 10.4.3    | Virtuelle Kraftwerke und Energiedirektvermarktung .....                   | 178 |
| 10.5      | Energie-Automatisierung .....   | 179 |
|           | Literatur.....  | 183 |
| <b>11</b> | <b>Energieeffizienz in der Endanwendung</b> .....                         | 185 |
| 11.1      | Bedeutung der Energieeffizienz .....                                      | 185 |
| 11.2      | Effizienzpotenziale bei der mechanischen Energie.....                     | 188 |
| 11.3      | Effizienzpotenziale bei der Raumwärme .....                               | 191 |
| 11.4      | Effizienzpotenziale bei Warmwasser .....                                  | 192 |
| 11.5      | Effizienzpotenziale bei der Beleuchtung .....                             | 192 |
| 11.6      | Effizienzpotenziale bis 2050 .....  | 193 |
|           | Literatur.....  | 194 |
| <b>12</b> | <b>Nachhaltige Energieversorgung für Industrie und Gewerbe</b> .....      | 195 |
| 12.1      | Endenergiebedarf des industriellen Sektors.....                           | 195 |
| 12.2      | Prozesswärme im industriellen Sektor und ihre Bereitstellung .....        | 197 |
| 12.3      | Möglichkeiten zur Bereitstellung von elektrischer Prozesswärme .....      | 201 |
| 12.4      | Verfahrensübersicht der Elektrothermie .....                              | 203 |
| 12.5      | Geschäftsmodelle der Industrie für die regenerative Prozesswärme .....    | 205 |
|           | Literatur.....  | 205 |
|           | <b>Sachwortverzeichnis</b> .....  | 207 |