

Holger Watter

Nachhaltige Energiesysteme

**Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik**

von H. Eichlseder und M. Klell

**Windkraftanlagen**

herausgegeben von R. Gasch und J. Twele

**Industrial Ecology**

von A. von Gleich und S. Gößling-Reisemann

**Umweltschutz in der Automobilindustrie**

von D. Gruden

**Windkraftanlagen**

von S. Heier

**Elektrische Energieversorgung**

von K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz

**Brennstoffzellentechnik**

von P. Kurzweil

**Energietechnik**

von R. Zahoransky

Holger Watter

# Nachhaltige Energiesysteme

Grundlagen, Systemtechnik und Anwendungsbeispiele  
aus der Praxis

Mit 178 Abbildungen und 45 Tabellen

STUDIUM



**VIEWEG+**  
**TEUBNER**

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.

1. Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Thomas Zipsner | Imke Zander

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

[www.viewegteubner.de](http://www.viewegteubner.de)



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Technische Redaktion: Stefan Kreickenbaum, Wiesbaden

Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0742-7

---

# Vorwort

Die „erneuerbaren Energien“ und „nachhaltigen Energiesysteme“ stehen wegen der Klimadebatte im Mittelpunkt der gesellschaftlichen Diskussion. Politisch werden Rahmenbedingungen definiert; in der Wirtschaft und im Privaten sucht man nach Wegen zur Minimierung der Energiekosten. Im Internet und in den Medien werden Lösungsvorschläge diskutiert und propagiert. Der „einfache Verbraucher“ ist mit der Beurteilung überfordert und muss den „Heilsversprechungen der Alchimisten der Neuzeit“ mehr oder minder glauben. Ist die betriebswirtschaftliche Beurteilung auf der Grundlage von Erfahrungswerten vielleicht gerade noch möglich; bei der klimarelevanten CO<sub>2</sub>-Bilanz wird das Projekt dann oft zur „Glaubensfrage“.

Ziel dieses Buches ist es,

- die wesentlichen Funktionsmechanismen darzustellen,
- Einflussparameter, Stell- und Störgrößen zu erläutern und
- Potentiale und Begrenzungen durch Überschlagsrechnungen aufzuzeichnen.

Es wendet sich an Studierende in den Bachelor- und Masterstudiengängen mit den Schwerpunkten *erneuerbare Energie, nachhaltige und regenerative Energiesysteme* an Universitäten, Technischen Hochschulen und Fachhochschulen sowie an Fachberater (in Banken, bei der Presse und in der Politik), die die o. g. Zusammenhänge ihrer Zielgruppe anschaulich erläutern wollen. Gleichzeitig gibt es einen aktuellen Überblick zum Stand der Technik und zu den möglichen Potentialen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf kleineren, dezentralen Anlagen; großtechnische Anlagen werden nur der Vollständigkeit halben angesprochen.

Ausgehend von einer sehr persönlichen Perspektive (Was kann ich selber tun?) werden zunächst die Lösungsvorschläge für die Gebäudetechnik erörtert (Photovoltaik, Solarthermie, Erdwärme und Wärmepumpe). Anschließend werden industrielle Lösungsvorschläge aus dem Anlagenbau vorgestellt. Hier sind die finanziellen Möglichkeiten von Privatpersonen erschöpft und es müssen betriebswirtschaftliche und kostendeckende Geschäftsmodelle (im Regelfall finanziert durch Banken oder Investoren) gefunden sowie aufwendige Genehmigungsverfahren überstanden werden. Daher werden im Anhang die Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung kurz zusammengefasst.

Dabei wird versucht, Prognosemöglichkeiten anhand von handelsüblichen Anlagen exemplarisch zu bearbeiten. Es werden jeweils Beispielanlagen aus dem täglichen Alltag vorgestellt und im Rahmen von Übungen analysiert. Dabei ist ausdrücklich zu beachten, dass die Schlussfolgerungen wegen des exemplarischen Charakters grundsätzlich nicht verallgemeinert werden können. Es soll jedoch gezeigt werden, dass mit verhältnismäßig kleinem Aufwand recht gute Prognosewerkzeuge bereitgestellt werden können. Das Buch möge auch als Beitrag verstanden werden, nicht alle Heilsversprechungen aus dem Internet kritiklos zu übernehmen, sondern von Zeit zu Zeit auch auf das eigene Denkvermögen zu vertrauen!

## Danksagung

Der Autor bedankt sich bei den Fachkollegen der *Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg* und den Firmenvertretern für die fachliche Beratung und kollegiale Unterstützung dieses Projektes:

- *Prof. Dr. rer. nat. Bernd Baumann,*
- *Dr. Dietmar Bendix (Bioenergy Systems GmbH),*
- *Dr. Rolf Bayerbach (Pytec GmbH),*
- *Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell,*
- *Prof. Dr. Victor Gheorghiu,*
- *Dr.-Ing. Jens-Uwe Jendrossek (DIN NSMT),*
- *Prof. Dr.-Ing. Jochen Koeppen,*
- *Dipl.-Ing. Siegfried Prust,*
- *Prof. Dr. Paul A. Scherer,*
- *Prof. Dr.-Ing. Bernd Sankol,*
- *Prof. Dr. Timon Kampschulte,*
- *Prof. Dr.-Ing. Thomas Veesper,*
- *Prof. Dr.-Ing. Franz Vinnemeier,*
- *Prof. Dr. tech. Wolfgang Winkler,*
- *Prof. Dr. Thomas Willner.*

Bei dem Lektorat von *Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage*, namentlich

- *Frau Imke Zander und*
- *Herrn Dipl.-Ing. Thomas Zipsner,*

bedanke ich mich für die Initiative zu diesem Buch und die vertrauensvolle, gute Zusammenarbeit.

Tarp, November 2008

*Holger Watter*

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen .....	XI
<b>1 Einleitung</b> .....	1
<b>2 Photovoltaik</b> .....	4
<b>2.1 Grundlagen</b> .....	7
Berechnung des Sonnenstandes nach DIN 5034-2 .....	9
<b>2.2 Funktionsprinzip</b> .....	11
<b>2.3 Beispielanlagen</b> .....	21
<b>2.4 Übungen</b> .....	25
<b>3 Solarthermie</b> .....	26
<b>3.1 Grundlagen</b> .....	26
<b>3.2 Funktionsprinzip</b> .....	28
<b>3.3 Beispielanlage</b> .....	37
<b>3.4 Übungen</b> .....	42
<b>4 Windenergie</b> .....	44
Auswertung von Standortmessungen .....	46
<b>4.1 Grundlagen</b> .....	47
Energieumsetzung am Rotor .....	51
<b>4.2 Funktionsprinzip</b> .....	53
Leistungsregelung .....	62
Gitterteilung / Flügelzahl .....	63
<b>4.3 Beispielanlagen</b> .....	64
Kleinstwindkraftanlage .....	64
Widerstandsläufer .....	65
Großanlage .....	67
<b>4.4 Übungen</b> .....	69
<b>5 Wasserkraft</b> .....	70
<b>5.1 Grundlagen</b> .....	70
Wasserrad .....	72
Wasserturbine .....	75
<b>5.2 Funktionsprinzip</b> .....	82
Laufwasserkraftwerk .....	82
Speicherkraftwerk .....	84
Gezeitenkraftwerk .....	85
Wellenkraftwerk .....	87
Meereswärmekraftwerk .....	93
Osmosekraftwerk .....	95

5.3	<b>Beispielanlagen</b> .....	96
	Pelton-Turbine .....	96
	Francis-Turbine .....	96
	Beispiele für Laufkraftwerke .....	97
	Gezeitenkraftwerk .....	98
	Pumpspeicherkraftwerk .....	98
5.4	<b>Übungen</b> .....	100
<b>6</b>	<b>Erdwärme und Wärmepumpe</b> .....	102
6.1	<b>Grundlagen</b> .....	102
	6.1.1 CARNOT-Prozess .....	102
	6.1.2 Kältemittel .....	109
6.2	<b>Funktionsprinzip</b> .....	117
	Erdkollektor und Rückwirkungen auf das Erdreich .....	120
	Wärmeträgermedium .....	123
	Anfahren der Anlage / Instationäre Betriebszustände / Leistungsregelung .....	124
	Nachhaltigkeit und Effizienz .....	124
	Absorptionskälteanlage .....	126
6.3	<b>Beispielanlagen</b> .....	129
	Messdaten einer Beispielanlage im Taunus .....	129
	Messdaten einer Beispielanlage in Nordfriesland .....	130
	Daten aus einer Herstelleranimation .....	131
	Daten eines Kompressorherstellers .....	134
6.4	<b>Übungen</b> .....	135
<b>7</b>	<b>Biomasse</b> .....	136
7.1	<b>Grundlagen</b> .....	136
	7.1.1 Biochemische Grundlagen .....	136
	7.1.2 Verbrennung von Biomasse .....	144
	7.1.3 Thermochemische Umwandlung .....	150
7.2	<b>Funktionsprinzipien</b> .....	160
	7.2.1 Holzvergasersysteme .....	160
	7.2.2 Verkokung .....	165
	7.2.3 Hausfeuerungsanlagen .....	166
7.3	<b>Anwendungsbeispiele</b> .....	171
7.4	<b>Übungen</b> .....	182
<b>8</b>	<b>Biogas</b> .....	184
8.1	<b>Anlagenbeschreibung</b> .....	184
8.2	<b>Fermentation</b> .....	184
8.3	<b>Gaszusammensetzung und Aufbereitung</b> .....	190
8.4	<b>Kraft-Wärme-Kopplung</b> .....	194
8.5	<b>Betriebliche Aspekte</b> .....	197
8.6	<b>Anlagenbeispiel</b> .....	201
8.7	<b>Übungen</b> .....	202



<b>9</b>	<b>Biokraftstoffe</b>	203
<b>9.1</b>	<b>Biokraftstoffe der 1. Generation</b>	204
9.1.1	Biodiesel (Rapsölmethylester, RME)	204
9.1.2	Bioethanol	207
9.1.3	Pflanzenöl	209
9.1.4	Dimethylether (DME)	210
9.1.5	Biogas	211
<b>9.2</b>	<b>Biokraftstoffe der 2. Generation</b>	211
9.2.1	Biomass-to-Liquid (BtL)-Kraftstoffe	211
9.2.2	Bioethanol der 2. Generation	219
<b>9.3</b>	<b>Übungen</b>	221
<b>10</b>	<b>Geothermische Stromerzeugung</b>	222
<b>10.1</b>	<b>Grundlagen</b>	222
Hochenthalpie-Lagerstätten		223
Niederenthalpie-Lagerstätten		225
<b>10.2</b>	<b>Funktionsbeschreibung</b>	229
Entspannungsverdampfung (Flash-Evaporation)		230
ORC- und KALINA-Prozess		231
<b>11</b>	<b>Solare Kraftwerke</b>	233
<b>11.1</b>	<b>Parabolrinnenkraftwerk</b>	235
FRESNEL-Kollektoranlagen		236
<b>11.2</b>	<b>Solarturmkraftwerk /Zentralreceiverkraftwerke</b>	237
<b>11.3</b>	<b>Dish-Stirling-Anlage</b>	239
<b>11.4</b>	<b>Nicht konzentrierende Kraftwerkskonzepte</b>	240
Solarteichkraftwerke		240
Aufwindkraftwerk / Thermikkraftwerke		241
Fallwindkraftwerk		242
<b>12</b>	<b>Kraft-Wärme-Kopplung</b>	243
<b>12.1</b>	<b>Verbrennungsmotoren</b>	243
Pflanzenölmotor		244
Gasmotor		244
<b>12.2</b>	<b>Dampfturbinenkraftwerk</b>	245
<b>12.3</b>	<b>Gasturbinenprozess</b>	246
<b>12.4</b>	<b>Kombinierter Gas-Dampfturbinenprozess</b>	248
<b>12.5</b>	<b>STIRLING-Motor</b>	250
Kinematik		250
Thermodynamik		253
<b>12.6</b>	<b>ORC-Prozess</b>	256
<b>12.7</b>	<b>KALINA-Prozess</b>	258
<b>12.8</b>	<b>Brennstoffzellen</b>	260
Übung		271
<b>12.9</b>	<b>Kernenergie</b>	272

---

<b>ANHANG</b> .....	283
<b>A1 Beispieldaten Wärmeverbrauch eines Einfamilienhaus</b> .....	283
<b>A2 Beispieldaten elektr. Verbrauch eines Einfamilienhaushalts</b> .....	283
<b>A3 Verbrauchsdaten exemplarischer Haushaltsgeräte</b> .....	284
<b>A4 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung</b> .....	285
A4.1 Bilanz .....	285
A4.2 Gewinn- und Verlustrechnung .....	289
A4.3 Finanzplanung und Finanzkontrolle .....	291
A4.4 Darlehens- und Tilgungsrechnung .....	293
<b>A5 Periodensystem der Elemente</b> .....	294
<b>A6 Lösungen zu den Übungen</b> .....	296
Lösungen zu Kap. 2 .....	296
Lösungen zu Kap. 3 .....	297
Lösungen zu Kap. 4 .....	300
Lösungen zu Kap. 5 .....	304
Lösungen zu Kap. 6 .....	309
Lösungen zu Kap. 7 .....	313
Lösungen zu Kap. 8 .....	322
Lösungen zu Kap. 12.8 .....	325
Lösungen zu Kap. 13 .....	326
 <b>Quellen- und Literaturhinweise</b> .....	 327
 <b>Sachwortverzeichnis</b> .....	 332

## Formelzeichen und Abkürzungen

$a$	Jahr („anno“); p.a. = pro anno = pro Jahr	
$A$	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
$c$	Absolutgeschwindigkeit	[m/s]
$c$	Konzentration, Stoffmengenkonzentration	[mol/kg, mol/Ltr]
$c_A$	Auftriebsbeiwert	[-]
$c_p$	spez. Wärmekapazität	[kJ/kg K]
$c_p$	Leistungsbeiwert	[-]
$c_W$	Widerstandsbeiwert	[-]
COP	Coefficient of Performance, Leistungszahl	[-]
C	Kohlenstoff	
d	Tag („day“); p. d. = per day = pro Tag	
$E$	Energie = Arbeitsvermögen W	[Ws ~ kWh]
$F$	Kraft	[N=kg · m/s <sup>2</sup> ]
F	Fluor	
$FF$	Füllfaktor	[-]
$G$	frei Enthalpie, GIBBSche Energie	[kJ/kg]
$\dot{G}_G$	Globalstrahlung	[W]
$\dot{G}_{Dir}$	Direktstrahlung	[W]
$\dot{G}_{Diff}$	Diffusstrahlung	[W]
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe	
$h$	spez. Enthalpie	[kJ/kg]
$H$	Enthalpie	[kJ]
$H$	Fall- oder Förderhöhe	[m]
H	Wasserstoff	
$H_U$	(unterer) Heizwert	[kJ/kg]
$H_O$	Brennwert (oberer Heizwert)	[kJ/kg]
$I$	Strom	[A]
$K$	Gleichgewichts-/Massenwirkungskonstante	[-]
$k$	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
$l_{min}$	Mindestluftbedarf	[m <sup>3</sup> /kg]
$m$	Masse	[kg]
$\dot{m}$	Massenstrom	[kg/s]
$M$	Molare Masse	[kg/kmol]
$M$	Drehmoment	[Nm]
MPP	Maximum Power Point (Peak-Leistung)	[W]
Nu	NUSSELT-Zahl	[-]
NN	Normal Null	[m]
$n$	stöchiometrische Umsatzzahl, Stoff-/Substanzmenge	[mol]
$n$	Drehzahl	[1/min]
$n_q$	spez. Drehzahl	[1/min]
$o_{min}$	Mindestsauerstoffbedarf	[m <sup>3</sup> /kg]
$p$	Druck	[bar]
$P$	Leistung	[W]

Pr	PRANDTL-Zahl	[-]
$Q$	Wärmemenge	[J=Ws~kWh]
$\dot{Q}$	Wärmestrom	[W]
$r$	Verdampfungsenthalpie ( $r = h'' - h'$ )	[kJ/kg]
R	Abkürzung für Kältemittel (Refrigerant)	
$R$	spez. Gaskonstante	[J/kg K]
$\mathfrak{R}$	allg. Gaskonstante	8,314 kJ/kmol K
Re	REYNOLDS-Zahl	[-]
$S$	Entropie	[kJ/K]
$s$	spez. Entropie	[kJ/kg K]
$T$	Temperatur	[K]
$u$	Umfangs- bzw. Drehgeschwindigkeit	[m/s]
$u$	spez. innere Energie	[kJ/kg]
$U$	innere Energie	[kJ]
$U$	Spannung	[V]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /s; Ltr/Min]
$w$	Relativgeschwindigkeit	[m/s]
$W$	Arbeit	[Ws ~ kWh]
$Y$	spez. Stutzenarbeit	[Nm/kg=W/(kg/s)]
$y$	Mol- bzw. Volumenanteil	[-]
$\alpha$	Absorptionsgrad	[-]
$\beta$	Formparameter der WEIBULL-Verteilung	[-]
$\varepsilon$	Emissionsgrad	[-]
$\varepsilon$	Gleitzahl	[-]
$\varepsilon$	Leistungszahl, COP	[-]
$\eta$	Wirkungsgrad	[-]
$\varphi$	Durchflusszahl	[-]
$\Phi$	Summenhäufigkeit der WEIBULL-Verteilung	[-]
$\kappa$	Isentropenexponent	[-]
$\lambda$	Verbrennungsluftverhältnis	[-]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/m K]
$\lambda$	Laufzahl	[-]
$\rho$	Reflexionsgrad	[-]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Schnellläufigkeit / Laufzahl	[-]
$\tau$	Zeit	[s]
$\tau$	Transmissionsgrad	[-]
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	[1/s]
$\psi$	Druckzahl	[-]
$\psi$	Molverhältnis (Volumenanteil, Partialdruckverhältnis)	[-]
$\infty$	unendlich	
$\xi$	Massenanteil	[-]