

Energieeffizienz

Martin Pehnt
Herausgeber

Energieeffizienz

Ein Lehr- und Handbuch

 Springer

Herausgeber
Dr. Martin Pehnt
ifeu
Institut für Energie- und Umweltforschung
Heidelberg GmbH
Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg
Deutschland
martin.pehnt@ifeu.de

I., korrigierter Nachdruck

ISBN 978-3-642-14250-5

e-ISBN 978-3-642-14251-2

DOI 10.1007/978-3-642-14251-2

Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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.

Einbandentwurf: deblik, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Weiser Verbrauch ist eine weit schwierigere Kunst als weise Produktion.
John Ruskin, britischer Maler und Sozialkritiker

Klimawandel, Ressourcenknappheit und der steigende Energiebedarf einer wachsenden Weltbevölkerung sind wesentliche Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Energieeffizienz und Energieeinsparungen erweisen sich – heute mehr denn je – als energie-, umwelt- und klimapolitisch, aber auch volkswirtschaftlich attraktive Elemente einer zukünftigen Energiepolitik. Der verringerte Einsatz von Rohstoffen und deren sorgfältige, nach allen Regeln der Kunst optimierte Umwandlung erlauben es, Betriebskosten zu senken, die Emissionen von Treibhausgasen zu mindern und die Energie-Versorgungssicherheit zu erhöhen.

Die Notwendigkeit der Energieeffizienz schlägt sich auch in entsprechenden politischen Zielen nieder. Die Europäische Kommission verabschiedete im Jahr 2006 den Aktionsplan Energieeffizienz mit dem Ziel einer Energieeinsparung von 20% gegenüber einer Trendentwicklung. Auch Deutschland strebt eine Verdoppelung der Energieeffizienz bis zum Jahr 2020 gegenüber 1990 an. Bemessen wird diese Energieeffizienz mit dem Indikator „Energieproduktivität“.

Dieses Lehrbuch spannt einen breiten Bogen und versucht, das notwendige Orientierungs- und Handlungswissen für alle Bereiche der Energieeffizienz bereitzustellen. Dies betrifft die gesamte Wertschöpfungskette der Energiebereitstellung, alle Sektoren und gesellschaftlichen Bedürfnisfelder. Es ist somit zwangsweise ein interdisziplinäres Lehrbuch, dessen Vordergrund ein ingenieurtechnisches Verständnis der involvierten Technologien bildet, das aber zugleich auch ökonomische, sozialwissenschaftliche, umweltrechtliche und ökologische Grundlagen vermitteln möchte.

Ganz bewusst wird ein wichtiger energiepolitischer Baustein nicht vollständig, aber weitgehend ausgeblendet: die erneuerbaren Energien. Zwar sind sie von größter energiepolitischer Bedeutung. Daher hat sich Deutschland ambitionierte Ziele

gesetzt: mindestens 18% unserer Energieversorgung im Jahr 2020 und sogar mindestens 30% unserer Strombereitstellung soll aus erneuerbaren Energieressourcen stammen.

Aber erneuerbare Energien werden in den letzten Jahren mit größerer Aufmerksamkeit bedacht als Energieeffizienz und -einsparung. Das hat auch mit einer stark auf die *Energieversorgung* ausgerichteten gesellschaftlichen Diskussion zu tun. Entsprechend vielfältig ist das verfügbare Informationsmaterial über erneuerbare Energien, sowohl für ein allgemeines Publikum (z. B. Pehnt et al. 2009), aber auch als Lehrbuch (z. B. Quaschnig 2006, Kaltschmitt und Wiese 2006).

Dieses Buch folgt einer sektoralen Gliederung. Strom (Kap. 3, 4, und 5), Wärme (Kap. 6, 7, 8, und 9) und Verkehr (Kap. 10) strukturieren es in drei größere Blöcke. Behandelt wird jeweils die effiziente Bereitstellung der erforderlichen Energieform, also die Effizienz der *Energieumwandlung* in

- Kraftwerken (Kap. 3 und 4),
- Gebäuden (Kap. 6 und 7) und
- Antrieben (Abschn. 10.3),

aber auch die effiziente *Nutzung der Energie*

- in stromverbrauchenden Geräten (Kap. 5),
- Gebäuden (Kap. 6 und 8) und
- Mobilitätssystemen (Abschn. 10.2).

Flankiert werden diese Kapitel durch eine Einführung in Grundbegriffe (Kap. 1) und eine Systematik der energiepolitischen Effizienzmaßnahmen (Kap. 2).

Dieses Lehrbuch ist ein Gemeinschaftswerk, das ohne die tatkräftige Mitwirkung der Kapitelautoren nicht möglich gewesen wäre. Der Herausgeber dankt auch den Kolleginnen und Kollegen am IFEU-Institut, die die Herstellung unterstützt und durch konstruktive Kommentare bereichert haben. Genannt seien hier insbesondere Marc Bauer, Michaela Gigli und Sophie Müller-Godeffroy für intensive Mitarbeit bei Recherche, Layout und Grafiken.

Bei der Erstauflage dieses Lehrbuchs wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen. Gleichwohl lässt es sich nicht gänzlich vermeiden, dass sich Fehler oder Unklarheiten einschleichen. Konstruktive Kritik, weitere Ideen, Hinweise oder Ergänzungen für zukünftige Auflagen sind daher willkommen und können an:

lehrbuchenergieeffizienz@ifeu.de
gerichtet werden.

Heidelberg
April 2010

Martin Pehnt

Inhaltsverzeichnis

1	Energieeffizienz – Definitionen, Indikatoren, Wirkungen	1
	Martin Pehnt	
2	Markttransformation und politische Instrumente	35
	Wolfgang Irrek und Stefan Thomas	
3	Effizienzsteigerung in konventionellen Kraftwerken	87
	Jörg Schneider und Martin Pehnt	
4	Kraft-Wärme-Kopplung	117
	Martin Pehnt und Jörg Schneider	
5	Rationelle Energienutzung in elektrischen Anwendungen	147
	Lars-Arvid Brischke	
6	Energieeffizienz in Gebäuden	197
	Patrick Jochum und Martin Pehnt	
7	Energieeffizienz in der Gebäudetechnik	227
	Roland Koenigsdorff, Martin Becker, Alexander Floß und Michael Haibel	
8	Passivhäuser	259
	Wolfgang Feist	
9	Industrielle Abwärme	291
	Martin Pehnt	
10	Energieeffizienz im Verkehr	309
	Hinrich Helms, Udo Lambrecht, und Jan Hanusch	
11	Anhang	331
	Sachverzeichnis	353

Mitwirkende

Martin Becker Biberach

Lars-Arvid Brischke Berlin

Wolfgang Feist Innsbruck, Darmstadt

Alexander Floß Biberach

Michael Haibel Biberach

Jan Hanusch Heidelberg

Hinrich Helms Heidelberg

Wolfgang Irrek Mülheim an der Ruhr

Patrick Jochum Berlin

Roland Koenigsdorff Biberach

Udo Lambrecht Heidelberg

Martin Pehnt Heidelberg

Jörg Schneider Dessau

Stefan Thomas Wuppertal

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
A	Fläche
a.a.O.	an anderem Ort
A/V-Verhältnis	Verhältnis von Oberfläche zu Volumen
ABB	Asea Brown Boveri
ABS	Antiblockiersystem
AID-EE	Active Implementation of the proposed Directive on Energy Efficiency
AkkP	Arbeitskreis kostengünstiger Passivhäuser
APU	Auxiliary Power Unit
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BEP	Best Efficiency Point
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technik
Boa+	Braunkohlenoptimierte Anlagentechnik mit Kohlevortrocknung
Bq	Bequerel
C	Kohlenstoff
CADC	Common Artemis Driving Cycle
cal	Kalorie
CCFL	Cold Cathode Fluorescent Lamp
<i>cc_{CO2}</i>	spez. Emissionsfaktor von CO ₂
<i>C_{CO2}</i>	Emissionsfaktor von CO ₂
CCS	Carbon Capture and Storage
CDM	Clean Development Mechanism
CEE	Consortium for Energy Efficiency
CEMEP	Comité Européen de Constructeurs de Machines
CEPHEUS	Cost Efficient Passive Houses as European Standards
CERT	Carbon Emissions Reduction Target
CFL-I	Energiesparlampe

CFL-Ni	Kompakt-Leuchtstoff-Lampe
CH ₄	Methan
CHF	Schweizer Franken
cm	Zentimeter
CNG	Compressed Natural Gas; Erdgas
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CoC	Code of Conduct
COP	Coefficient of Performance
$c_{p, Luft}$	Spezifische Wärmekapazität von Luft
CRT	Cathode ray tube
ct	Cent
d	Tag
d	Dicke, Dämmstärke
DCiE	Data Center Infrastructure Efficiency
DG	Dachgeschoss
DIN	Deutsches Institut für Normung
DR	Draft Risk
DSM	Demand Side Management
E	Energie
EAP	Energy Audit Programme
EBPG	Energie betriebene Produkte-Gesetz
$E_{Br, KWK}$	Brennstoffbedarf eines KWK-Systems
ECBM	Enhanced coal bed methane
EcoTransIT	The Ecological Transport Information Tool
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EE	Erneuerbare Energien
EEC	Energy Efficiency Commitment
EEFL	External Electrode Fluorescent Lamp
EEG	Erneuerbares-Energien-Gesetz
EER	Energy Efficiency Ratio
EEWärmeG	Erneuerbares-Energien-Wärme-Gesetz
EG	Europäische Gemeinschaft
EG	Erdgeschoss
EL	extra leicht (bei Heizöl)
E _{LT}	Energiebedarf für den Lufttransport
EnEfG	Energieeffizienzgesetz
EnEG	Energieeinspargesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EOR	Enhanced Oil Recovery
EPBD	Directive on Energy Performance of Buildings
EPS	expandiertes Polystyrol
ESD	Energy Service Directive
ESEER	European Seasonal Energy Efficiency Ratio
ESP	Elektronisches Stabilitäts-Programm

EU	Europäische Union
E_{Vg}	gemessener Energieverbrauch
EVG	elektronisches Vorschaltgerät
E_{VgH}	außentemperaturabhängiger Anteil am Energieverbrauch
E_{VH}	bereinigter Energieverbrauchs
E_{VP}	außentemperaturunabhängiger Anteil am Energieverbrauch
F&E	Forschung und Entwicklung
FC	Fuel Cell
FEMP	Federal Energy Management Program
$F_{i,j,k}$	Temperatur-Korrekturfaktor
f_P	Primärenergiefaktor
Fzg.	Fahrzeug
g	Gramm
Gbit	Gigabit
GED	Gemeinschaft Energielabel Deutschland
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GJ	Gigajoule
Glg.	Gleichung
G_t	Gradtag
Gt	Gigatonne
GuD	Gas und Dampf
g-Wert	Gesamtenergiedurchlasswert
GWh	Gigawattstunde
H ₂	Wasserstoff
ha	Hektar
HCHO	Formaldehyd
HH	Haushalt
H _i	Heizwert
HID	High Intensity Discharge
HKW	Heizkraftwerk
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
H _s	Brennwert
H_T'	auf die wärmeübertragende Hüllfläche bezogener Transmissionswärmeverlust
HW	Heizwerk
H _{WB}	Wärmebrückenzuschlag
i.d.R.	in der Regel
IC	Intercity
ICE	Intercity Express
IE 1-4	Effizienzklassen von Motoren
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IEKP	Integriertes Energie- und Klimaprogramm
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor

IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IKT	Information und Kommunikation
inkl.	inklusive
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IT	Informationstechnologie
J	Joule
K	Kelvin
Kap.	Kapitel
kcal	Kilokalorie
<i>Kd</i>	Kelvintag
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
Kfz	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
k_{kWK}	spez. Stromgestehungskosten KWK
K_{KWK}	Kosten der KWK-Anlage
km	Kilometer
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
kPa	Kilopascal
ktoe	Kilotonne Öläquivalent
KVG	konventionelles Vorschaltgerät
kW	Kilowatt
KW	Kraftwerk
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
<i>L</i>	Leuchtdichte
l	Liter
l_j	Länge der Wärmebrücke
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode; Leuchtdiode
lm	Lumen
ln	Logarithmus naturalis
<i>LOR</i>	Light Output Ratio
LPG	Liquified Petroleum Gas; Flüssiggas
LTA	Long Term Agreement
m	Meter
m	Masse
m^2	Quadratmeter
m^3	Kubikmeter
MAID	Massive Array of Idle Disks
MAP	Marktanreizprogramm zur Förderung erneuerbarer Energien
\dot{m}_{Br}	Massenstrom des Brennstoffs
Mbit	Megabit
MEA	Monoethanolamin
min	Minute

Mio	Million
MJ	Megajoule
mK	Millikelvin
Mrd.	Milliarde
Mt	Millionen Tonnen
MURE	mesures d'utilisation rationnelle de l'énergie
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
N	Stickstoff
n	Luftwechselrate
n/a	not available
N ₂	Stickstoff
NEEAP	Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan
NEEG	Negawatt-Einspeise-Gesetz
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
Nfz.	Nutzfahrzeug
NO _x	Stickoxide
NRW	Nordrhein-Westfalen
O ₂	Sauerstoff
OE	Öläquivalent
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OFGEM	Office of the Gas and Electricity Markets
OG	Obergeschoss
OLED	Organic Light Emitting Diode; organische Leuchtdiode
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ORC	Organic-Rankine-Cycle
OSB	Oriented strand board
<i>P</i>	Leistung
<i>P</i>	Druck
Pa	Pascal
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cells
PC	Personal computer
PC-Material	Phase Change Material
<i>p_D</i>	Differenzdruck-Messung
<i>P_{EB}</i>	Eigenbedarfsleistung
PEE	Primärenergieeinsparung
PEFC	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
<i>P_{el, brutto}</i>	Elektrische Bruttoleistung
<i>P_{el, netto}</i>	elektrische Nettoleistung
PHPP	Passivhaus-Projektierungspaket
<i>P_{HY}</i>	hydraulische Förderleistung
PJ	Petajoule
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
<i>P_n</i>	Nennleistung

PN-Übergang	Halbleiter-Übergang zwischen p- und n-dotierter Schicht
ppm	parts per million
PR	Public Relations
PUR	Polyurethan
Q	Wärme
$Q_{Abwärme}$	Abwärme
Q_b	Brennstoff-Leistung
$Q_{Brennstoff}$	Energieinhalt des zugeführten Brennstoffs
Q_{Innere}	innere Gewinne
$Q_{Kühlung}$	Kühlbedarf
\dot{Q}_N	Nennleistung
Q_P	Primärenergiebedarf
Q_{Solar}	solare Gewinne
Q_T	Transmissionswärmeverluste
Q_{TW}	Energiebedarf für die Erwärmung von Trinkwasser
Q_V	Konvektions- oder Lüftungswärmeverluste
\dot{Q}_V	Lüftungswärmestrom in W
RAVEL	rationelle Verwendung von Elektrizität
R_e	Wärmeübergangswiderstand außen
RE	Regionalexpress
R_{ges}	Wärmeleitwiderstand
R_i	Wärmeübergangswiderstand innen
RLT-Anlage	raumluftechnische Anlage
Rn	Radon
RÖE	Rohöleinheit
RP	Rear Projection
R_λ	Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils
s	Sekunde
S	Schwefel
s	spezifische Entropie
SCR	Selective Catalytic Reduction
S_D	Dämmstoffdicke
SED	Surface Conduction Electron Emitter Display
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
SFP	Specific fan power
SIA	Schweizer Ingenieur- und Architektenverein
SKE	Steinkohleeinheit
SMART	Spezifisch, Messbar, Ambitioniert, Realistisch, Terminliche Begrenzung
SO ₂	Schwefeldioxid
t	Tonne
t	Zeit
T	Temperatur
T_0	Verdampfungstemperatur

T_A	Temperatur des Arbeitsmediums
T_a	Temperatur Außenluft
$T_{aN.}$	Ausnutzungsdauer
T_C	Kondensationstemperatur
TEER	Total Energy Efficiency Ratio
$T_{Frischluft}$	Temperatur der nachströmenden Luft in K
T_i	Temperatur Innenluft
tkm	Tonnenkilometer
$t_{m,n}$	Tagesmittel der Außentemperatur eines Heiztages
T_Q	Wärmequelle
$T_{Raumluft}$	Temperatur der abströmenden Luft in K
Tsd.	Tausend
TSPF	Total Seasonal Performance Factor
T_U	Temperatur der Umgebung
TÜV	Technischer Überwachungsdienst
TWD	transparente Wärmedämmung
TWh	Terawattstunde
U	Umdrehung
U	Wärmedurchgangskoeffizient
u. U.	unter Umständen
u.v.m.	und viele mehr
UE	Unterhaltungselektronik
UK	United Kingdom
UN	United Nations
UNEP	United Nations Environmental Programme
U_{opak}	Wärmedurchgangskoeffizienten opaker Außenbauteile
USDOE	US-Department of Energy
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
V2G	Vehicle to grid
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
VDI	Verein deutscher Ingenieure
VKM	Verbrennungskraftmaschine
v_{Luft}	Luftgeschwindigkeit
\dot{V}_{Luft}	Luftvolumenstrom in m^3/s
VOC	Volatile organic compounds; flüchtige organische Verbindungen
VVG	verlustarmes Vorschaltgerät
VVS-System	Variables Volumenstrom-System
W	Arbeit
W	Watt
waf	wasser- und aschefrei
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
W_{el}	elektrische Arbeit

WSchV	Wärmeschutzverordnung
WSVO	Wärmeschutzverordnung
XPS	extrudiertes Polystyrol
α	Wärmeausbeute
β	Jahresarbeitszahl, Stromverlustkennziffer
χ_k	Wärmebrückenverlustkoeffizient für punktförmige Wärmebrücken
ε	Allokationsfaktor
ε_C	Leistungszahl
η	Wirkungsgrad
η_{Carnot}	Carnot-Wirkungsgrad
η_{DE}	Wirkungsgrad des Dampferzeugers
η_{el}	elektrischer Wirkungsgrad
$\eta_{Generator}$	Wirkungsgrad des Generators
η_{th}	thermischer Wirkungsgrad
$\eta_{Turbine}$	Wirkungsgrad der Turbine
κ	Isentroper Exponent
ρ_{Luft}	Dichte der Luft = 1,2 kg/m ³
ρ	Stromkennzahl
ζ	Exergieanteil
ω	Brennstoffausnutzungsgrad
Φ	Lichtstrom
β	Stromausbeute; Stromverlustkennziffer
η_F	Nutzungsgrad der Wärmegewinne
η_{ges}	Gesamtwirkungsgrad
Ψ_j	längenbezogener Wärmebrückenverlustkoeffizient
°C	Grad Celsius