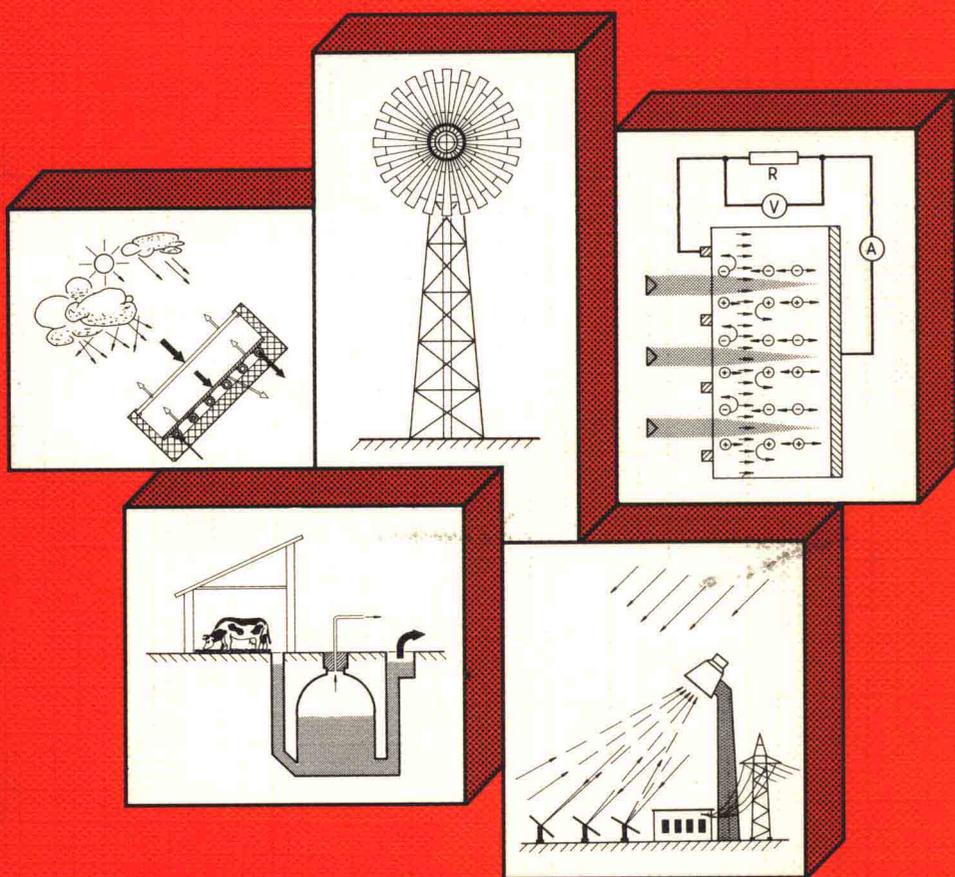


M. Kleemann · M. Meliß

# Regenerative Energiequellen

Zweite, völlig neubearbeitete Auflage

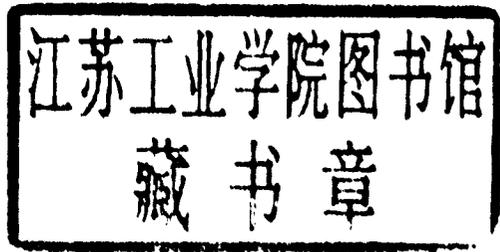


Springer-Verlag

Manfred Kleemann · Michael Meliß

# Regenerative Energiequellen

Zweite, völlig neubearbeitete Auflage  
mit 216 Abbildungen und 75 Tabellen



Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong Barcelona Budapest

**Dr.-Ing. Manfred Kleemann**

Programmgruppe Systemforschung und  
Technologische Entwicklung  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Postfach 1913  
D-52425 Jülich

**Professor Dr.-Ing. Michael Meliß**

Fachhochschule Aachen, Abt. Jülich  
Lehrgebiet Energietechnik  
Ginsterweg 1  
D-52425 Jülich

**ISBN 3-540-55085-2 2. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York**

**ISBN 3-540-18097-4 1. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York**

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Kleemann, Manfred:** Regenerative Energiequellen: mit 75 Tabellen / Manfred Kleemann; Michael Meliß. – 2., völlig neubearb. Aufl. – Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong; Barcelona; Budapest: Springer, 1993.  
ISBN 3-540-55085-2

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.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1988 und 1993  
Printed in Germany

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.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: K+V Fotosatz GmbH, Beerfelden; Druck: Saladruck, Berlin; Bindearbeiten: Lüderitz & Bauer, Berlin.  
60/3020-5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier



**Für unsere Ehefrauen  
Anneli und Trudy**

## Vorwort zur zweiten Auflage

Für die Energieversorgung stehen drei unterschiedliche Kategorien von Energieträgern und Energiequellen zur Verfügung. Viele Jahre lag das Augenmerk von Lehre, Forschung und Anwendung auf den fossilen Energieträgern Öl, Kohle und Gas und auf den nuklearen Energieträgern Uran und Thorium sowie den jeweils dafür zur Verfügung stehenden Umwandlungstechnologien. Der dritten Klasse, nämlich den nicht-nuklearen und nicht-fossilen Energiequellen oder – wie sie heute einheitlich genannt werden – den regenerativen Energiequellen, wurde weniger Beachtung geschenkt. Dies ändert sich, denn die Umweltprobleme durch die Nutzung fossiler Energieträger werden immer gravierender, und die Akzeptanz der Kernenergie nimmt ab.

Die natürliche Darbietung von Sonnenenergie, Windenergie und Biomasse in unserem Lande wird als ein Schwerpunkt in diesem Buch behandelt. Ein weiterer Schwerpunkt ist denjenigen Nutzungstechnologien gewidmet, die in der BRD schon jetzt entweder für den heimischen Energiemarkt oder für den Export von Bedeutung sind oder die in absehbaren Zeiträumen Einfluß gewinnen könnten. Dies sind vor allem thermische Solarkollektoren und die zugehörigen Nutzungssysteme, photovoltaische Solarzellen, Windkraftanlagen und Biokonversionstechniken.

In der vorliegenden zweiten Auflage werden der aktuelle Stand der Technik und die neuesten verfügbaren Kosten berücksichtigt. Außerdem wurde eine Vielzahl von Verbesserungen vorgenommen, die das Verständnis des Stoffes erleichtern und vertiefen helfen.

Das vorliegende Lehrbuch soll seinen Leserkreis nicht nur bei Studenten ingenieur- und naturwissenschaftlicher Fachrichtungen finden, sondern allen Interessierten als Einstiegs- und Nachschlagewerk dienen.

Die Autoren danken Herrn Prof. T. Bohn von der Universität Essen und Herrn Dr. H. J. Wagner von der Technischen Universität Berlin sowie Herrn J. F. Hake, dem kommissarischen Leiter der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung im Forschungszentrum Jülich, für Anregungen und Hilfestellungen. Besonderer Dank gilt Herrn Prof. H. Buck und Herrn E. Stute sowie allen anderen Kollegen der Autoren an der Fachhochschule und im Forschungszentrum Jülich, die mit zur Entstehung dieses Buches beigetragen haben.

Jülich, im Juni 1993

M. Kleemann, M. Meliß

# Verwendete Formelzeichen

## a) Lateinische Buchstaben

Symbol	Erläuterungen	Einheiten
$A$	Fläche	$m^2$
$A_A$	Absorberfläche	$m^2$
$AE$	Astronomische Einheit = mittl. Entfernung Erde–Sonne	$1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$
$\text{\AA}$	Angström, Längenmaß in der Spektroskopie	$10^{-10} \text{ m}$
$A_{EL}$	Fläche des elliptischen Sonnenbildes	$m^2$
$A_K$	Kollektorfläche	$m^2$
$A_{KF}$	Kollektorfeldfläche	$m^2$
$A_{KF,i}$	Fläche eines Heliostaten	$m^2$
$A_R$	Aperturfläche des Spiegels (Öffnungsfläche)	$m^2$
$A_{RA}$	Aperturfläche des Receivers	$m^2$
$A_S$	Oberfläche der Sonne	$m^2$
$A_{SK}$	freier Strömungsquerschnitt im Kollektor	$m^2$
$A_{Sp}$	Speicheroberfläche	$m^2$
$A_W$	Wasseroberfläche	$m^2$
$A_{eff}$	effektive Spiegelfläche	$m^2$
$A_i$	Wärmeübertragungsfläche auf der Absorberinnenseite	$m^2$
$A_n$	Annuität	1/a
$A_0$	Rotorkreisfläche	$m^2$
$a$	Azimutwinkel	Grad
$a_A$	Reibungskonstante am Anemometer	m/s
$a_{EL}$	große Ellipsenachse des Sonnenbildes	m
$a_W$	Absorberwandstärke	m
$a_1$	Rayleighscher Streukoeffizient	–
$B$	Verhältniszahl für die Belegung des Windrads	–
$b$	Breitengrad	Grad
$b_A$	Proportionalitätsfaktor (Anemometer)	–
$b_E$	Energiepreis	DM/J
$b_{EL}$	kleine Ellipsenachse des Sonnenbildes	m
$b_P$	Profilbreite	m
$C$	Konzentrationsverhältnis	–
$C_{OTM}$	Konzentration der organischen Trockenmasse	–
$C_{max}$	maximales Konzentrationsverhältnis	–
$c$	spezifische Wärme	J/kg K
$c_K$	spezifische Wärme des Kollektorkühlfluids	J/kg K
$c_L$	spezifische Wärme von Luft	J/kg K
$c_{Sp}$	spezifische Wärme des Speicherfluids	J/kg K
$c_a$	Auftriebsbeiwert	–

Symbol	Erläuterungen	Einheiten
$c_m$	Momentenbeiwert	—
$c_p$	Leistungsbeiwert	—
$c_{p,max}$	maximaler Widerstandsbeiwert	—
$c_{p,w}$	Widerstandsbeiwert des Widerstandsläufers	—
$c_{p,w,max}$	Maximalwert von $c_{p,w}$	—
$c_w$	Widerstandsbeiwert	—
$D$	Durchmesser	m
$D$	Dicke	m
$D_S$	Sonnendurchmesser	m
$D_S$	solare Deckungsrate	—
$d$	Absorberrohr-Durchmesser	m
$d_B$	Durchmesser des Sonnenbildes	m
$E$	Energie	J, eV
$E_{a,el}(n)$	Jahresenergie bei einer bestimmten Rotordrehzahl	J/a
$E_F$	Fermi-Energie	eV
$E_G$	Gleitzahl	—
$E_g$	Energielücke	J
eV	Elektronenvolt	$1,602 \cdot 10^{-7} \text{ J}$
$e_a$	spezifische Jahresenergie	$\text{J/m}^2$
$e_{a,el}$	spezifische elektr. Jahresenergie	$\text{J/m}^2 \text{ a}$
$F_{Abd}$	Minderungsfaktor für den Heizwärmebedarf bei Verwendung einer Beckenabdeckung	—
$FF$	Füllfaktor	—
$F_A$	Auftriebskraft	N
$F_{KS}$	Minderungsfaktor für Konvektions- und Abstrahlungsverluste	—
$F_R$	Wärmeabfuhrfaktor	—
$F_{R,S}$	resultierende Profilkraft	N
$F_S$	Schubkraft am Rotor	N
$F_T$	Tangentialkraft am Rotor	N
$F_{Vd}$	Minderungsfaktor für Verdunstungsverluste	—
$F_c$	Corioliskraft	N
$F_p$	Druckkraft	N
$F_w$	Widerstandskraft	N
$F'$	Absorberwirkungsgradfaktor	—
$F''$	Wärmekapazitätsfaktor	—
$F^*$	Flossenfaktor	—
$f$	Brennweite	m
$f$	Frequenz	1/s
$f^*$	Minderungsfaktor für den Feldwirkungsgrad bei Solar-Farmanlagen	—
$f_1, f_2$	Flächenverhältnisse	—
$\dot{G}$	Bestrahlungsstärke	$\text{W/m}^2$
$\dot{G}_D$	Direktstrahlung	$\text{W/m}^2$
$\dot{G}_{D,A}$	absorbierte Direktstrahlung	$\text{W/m}^2$
$\dot{G}_{D,R}$	reflektierte Direktstrahlung	$\text{W/m}^2$
$\dot{G}_{D,d}$	durchgelassene Direktstrahlung	$\text{W/m}^2$
$\dot{G}_{D,g}$	Direktstrahlung auf geneigte Flächen	$\text{W/m}^2$
$\dot{G}_{D,h}$	Direktstrahlung auf die Horizontale	$\text{W/m}^2$
$\dot{G}_G$	Globalstrahlung	$\text{W/m}^2$
$\dot{G}_{G,R}$	reflektierte Globalstrahlung	$\text{W/m}^2$

Symbol	Erläuterungen	Einheiten
$\dot{G}_{G,d}$	durchgelassene Globalstrahlung	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{G,g}$	Globalstrahlung auf die geneigte Fläche	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{G,g}$	Globalstrahlung auf die geneigte Fläche, gemittelt während der Badesaison	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{G,h}$	Globalstrahlung auf die Horizontale	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_H$	Himmelsstrahlung	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{H,A}$	absorbierte Himmelsstrahlung	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{H,R}$	reflektierte Himmelsstrahlung	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{H,d}$	durchgelassene Himmelsstrahlung	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{H,g}$	Himmelsstrahlung auf die geneigte Fläche	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{H,h}$	Himmelsstrahlung auf die Horizontale	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_R$	reflektierte Strahlung	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{Ra}$	Strahlung eines Streuvolumens	W/m <sup>3</sup>
$\dot{G}_{RS}$	Strahlungsanteil der Rayleigh-Streuung	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_S$	Abstrahlung der Sonne	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_0$	Solar konstante, auf die Erdatmosphäre auftreffende Strahlung	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{0,g}$	Strahlung außerhalb der Erdatmosphäre auf eine geneigte Fläche	W/m <sup>2</sup>
$\dot{G}_{0,h}$	Strahlung außerhalb der Erdatmosphäre auf eine horizontale Fläche	W/m <sup>2</sup>
$g$	Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
$g^*$	Exponent	–
$H$	Höhe	m
$H_S$	signifikante Wellenhöhe	m
$H_U$	spezifischer unterer Heizwert	MJ/kg
$H_{UTS}$	spezifischer Heizwert der Trockensubstanz	MJ/kg
$h$	Sonnenhöhenwinkel	Grad
$h$	Plancksches Wirkungsquantum	Js
$h$	Enthalpie	J/kg
$I$	Strom	A
$I_K$	Kurzschlußstrom	A
$I_L$	Photostrom	A
$I_S$	Sperrstrom	A
$I_{SO}$	Materialkenngröße bei Solarzellen	A
$I_{max}$	Strom der Zelle bei max. Leistung	A
$i_K$	spezifischer Kurzschlußstrom	mA/cm <sup>2</sup>
$J$	Tag des Jahres vom 1. Januar aus gezählt	–
$K$	Investitionskosten	DM
$k$	Boltzmann-Konstante	$1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
$k$	spezifische Anlagenkosten	DM/kW, DM/m <sup>2</sup> , DM/GVE
$k_a$	spezifische Jahreskosten	DM/kWa oder DM/m <sup>2</sup> a
$k_B$	jährliche Betriebskosten, Schwimmbad	DM/a m <sup>2</sup>
$k_E$	Energiekosten, Schwimmbad	DM/a m <sup>2</sup>
$k_F$	spezifische Anlagekosten	DM/m <sup>2</sup>
$k_G$	Gasgestehungskosten	DM/m <sup>3</sup>
$k_S$	Stromgestehungskosten	DM/kWh
$k_W$	Wärmegestehungskosten	DM/kWh
$L$	Länge	m

Symbol	Erläuterungen	Einheiten
$L$	Ladezustand des Speichers	–
$l_e$	liquid equivalent	g/cm <sup>2</sup>
$M_d$	Drehmoment	Nm
$m$	Masse	kg
$m$	optische Weglänge	m
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
$\tilde{m}$	Proportionalitätskonstante	–
$\dot{m}_W$	Wassermassenstrom	kg/s
$\dot{m}_s$	je Flächeneinheit der Wasseroberfläche verdunstender Massenstrom	kg/s m <sup>2</sup>
$\dot{m}_{su}$	Tägliche Substratzufuhr	kg/d
$\dot{m}_1, \dot{m}_2$	Massenströme vor und hinter dem Rotor	kg/s
$N$	Zahl der Moleküle	1/m <sup>3</sup>
$N$	Zahl der Abdeckscheiben	–
$n$	Neigungswinkel der Empfangsfläche	Grad
$n$	Rotordrehzahl	1/min
$n_A$	Drehzahl des Anemometers	1/s
$n_G$	Generatordrehzahl	1/min
$n_i$	Brechungsindex	–
$n_K$	Anzahl der Kollektoren eines Felds	–
$n_v$	Vollaststunden pro Jahr	h
$n^*$	Nutzungsdauer	a
$P$	Leistung	W
$P_{el}$	elektrische Leistung	W
$P_{Nenn}$	Nenn- oder Auslegungsleistung	W
$P_{max}$	max. Leistung	W
$Pr$	Prandtlzahl	–
$P_{th}$	thermische Leistung	W
$p$	Druck	N/m <sup>2</sup>
$p$	Leistungsdichte	W/m <sup>2</sup>
$p_A$	Auftriebsdruck	N/m <sup>2</sup>
$p_o$	Druck auf Profiloberseite	N/m <sup>2</sup>
$p_u$	Druck auf Profilunterseite	N/m <sup>2</sup>
$p_g$	Gesamtdruck	N/m <sup>2</sup>
$p_s$	statischer Druck	N/m <sup>2</sup>
$p_z$	Zinsfuß	%/a
$Q_{Hges}$	Gesamtheizwärmebedarf in der Badesaison	J/a
$\tilde{Q}_{Hges}$	gesamter Heizwärmebedarf bei Verwendung einer Beckenabdeckung	J/a
$Q_{N,S}$	aktueller Speicherinhalt	J
$Q_{N,S_d}$	Tagesnutzenergie des Speichers	J
$\dot{Q}$	Wärmeleistung	W
$\dot{Q}_{A,R}$	Reflexionsverlust des Absorbers	W
$\dot{Q}_H$	Heizleistung	W
$\dot{Q}_K$	Konvektionsverluste	W
$\dot{Q}_L$	Leistungsverluste	W
$\dot{Q}_N$	Nutzleistung	W
$\dot{Q}_{N,A}$	Nutzleistung des Absorbers	W
$\dot{Q}_{N,H}$	Einstrahlung der Heliostaten	W
$\dot{Q}_{N,F}$	Nutzleistung des Kollektorfelds	W

Symbol	Erläuterungen	Einheiten
$\dot{Q}_{N,K}$	Nutzleistung eines Kollektors	W
$\dot{Q}_{N,S}$	Speicherleistung	W
$\dot{Q}_R$	Reflexionsverluste	W
$\dot{Q}_S$	Abstrahlverluste	W
$\dot{Q}_{Ste}$	Wärmegeinn durch Einstrahlung in das Becken	W
$\dot{Q}_T$	Transmissionsverluste des Receivers	W
$\dot{Q}_{Tr}$	Transmissionsverluste ins Erdreich	W
$\dot{Q}_V$	Verlustwärmestrom	W
$\dot{Q}_{Vd}$	Verdunstungsverluste	W
$\dot{Q}_{Ve}$	Verdampferleistung	W
$\dot{Q}_{V,S}$	Speicherverluste	W
$q$	Elementarladung	As
$\dot{q}$	spezifischer Wärmestrom	W/m <sup>2</sup>
$\dot{q}_A$	Leistungsdichte auf der Receiverfläche	W/m <sup>2</sup>
$q_{Hges}$	gesamter spezifischer Heizwärmebedarf in der Badesaison	J/m <sup>2</sup> a
$\dot{q}_{Hges}$	gesamter spezifischer Heizwärmebedarf bei Verwendung einer Beckenabdeckung	J/m <sup>2</sup> a
$\dot{q}_N$	spezifische Nutzleistung	W/m <sup>2</sup>
$\dot{q}_{N,F}$	spezifische Kollektor-Nutzleistung	W/m <sup>2</sup>
$\dot{q}_{RA}$	Leistungsdichte in der Apertur	W/m <sup>2</sup>
$\dot{q}_s$	Leistungsdichte der langwelligen Abstrahlung	W/m <sup>2</sup>
$R$	Radius	m
$R$	Strahlungsverhältnis der geneigten zur horizontalen Fläche	—
$R_b$	Tägliche Raumbelastung	kg/d m <sup>3</sup>
$Re$	Reynoldszahl	—
$R_E$	äußerer Rotorradius	m
$R_N$	Nabenradius	m
$R_R$	Reihenwiderstand	$\Omega$
$R_S$	Radius der Sonne	m
$R_{Sh}$	Shunt-Widerstand	$\Omega$
$r$	Radius	m
$r$	Verdampfungswärme	J/kg
$r_A$	Radius des Anemometers	m
$Sh$	Summenhäufigkeit	—
$S_p$	jährliche Gasproduktion einer GVE	m <sup>3</sup> /GVE a
$s$	Weglänge	m
$T$	absolute Temperatur	K
$T_A$	Absoluttemperatur des Absorbers	K
$T_K$	Temperatur im Kollektor	K
$T_S$	Oberflächentemperatur der Sonne	K
$T_U$	Absoluttemperatur der Umgebung	K
$T_r$	Trübungsfaktor	—
$t$	Temperatur	°C
$t$	Zeit	s
$t_A$	Absorbentemperatur	°C
$\bar{t}_A$	gemittelte Absorbentemperatur	°C
$t_{BS}$	Dauer der Badesaison	s/a
$t_D$	Drahttemperatur	°C
$t_L$	Lufttemperatur	°C
$t_M$	mittlere Kollektorfluidtemperatur	°C

Symbol	Erläuterungen	Einheiten
$t_{Sp}$	mittlere Speichertemperatur	°C
$t_U$	Umgebungstemperatur	°C
$t_{Vw}$	Verweilzeit des Substrats in Tagen	d
$t_W$	Beckenwassertemperatur	°C
$t_e$	Eintrittstemperatur des Wärmeträgers	°C
$t_m$	mittlere Lufttemperatur	°C
$t_{max}$	maximale Speichertemperatur	°C
$t_{min}$	minimale Speichertemperatur	°C
$t_0$	Kollektoraustrittstemperatur	°C
$t^*$	Stundenwinkel	Grad
$t_{SA}^*$	Stundenwinkel bei Sonnenaufgang	Grad
$t_{SU}^*$	Stundenwinkel bei Sonnenuntergang	Grad
$U$	Spannung	V
$U_A$	Wärmeübergangskoeffizient des Absorbers	W/m <sup>2</sup> K
$U_L$	mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient	W/m <sup>2</sup> K
$U_{max}$	Spannung der Zelle bei max. Leistung	V
$U_0$	Leerlaufspannung	V
$u$	Umfangsgeschwindigkeit	m/s
$u$	Feuchtigkeitsgehalt	–
$u_E$	Umfangsgeschwindigkeit am Blattende	m/s
$u_N$	Umfangsgeschwindigkeit an der Nabe	m/s
$u_{Nenn}$	Nenn-Umfangsgeschwindigkeit	m/s
$V$	Volumen	m <sup>3</sup>
$V_R$	Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>
$V_{Sp}$	Speichervolumen	m <sup>3</sup>
$V_{Su}$	Substratvolumen	m <sup>3</sup>
$v$	Geschwindigkeit, Windgeschwindigkeit	m/s
$\bar{v}$	Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit	m/s
$\bar{v}_H$	Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit in der Höhe $H$	m/s
$v_{0,Nenn}$	Nenn- oder Auslegungsgeschwindigkeit	m/s
$v_{(Sh, H)}$	Windgeschwindigkeit bei der Summenhäufigkeit $Sh$ und der Höhe $H$	m/s
$v_{(Sh, 10)}$	Windgeschwindigkeit bei der Summenhäufigkeit $Sh$ in 10 m Höhe	m/s
$v_g$	geostrophische Windgeschwindigkeit	m/s
$\bar{v}_i$	Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit im Jahre $i$	m/s
$v_0$	Geschwindigkeit in der Rotorebene	m/s
$v_2$	Geschwindigkeit hinter dem Rotor	m/s
$W$	Rohrleitungsabstand	m
$w$	Anströmgeschwindigkeit	m/s
$w_E$	Anströmgeschwindigkeit am Rotorende	m/s
$w_N$	Anströmgeschwindigkeit an der Nabe	m/s
$w_{Nenn}$	Anströmgeschwindigkeit im Auslegungspunkt	m/s
$X$	Wasserdampfgehalt der Luft	kg/kg
$X''$	Wasserdampfgehalt gesättigter Luft	kg/kg
$X''_m$	Wasserdampfgehalt gesättigter Luft bei Umgebungstemperatur	kg/kg
$X''_W$	Wasserdampfgehalt gesättigter Luft bei Wassertemperatur	kg/kg
$X''_{WO}$	Wasserdampfgehalt gesättigter Luft bei der Temperatur der Wasseroberfläche	kg/kg
$x$	Extinktionskoeffizient (Absorptionskonstante)	1/m

Symbol	Erläuterungen	Einheiten
$x$	Koordinate	m
$x$	Feuchte (Wassergehalt)	–
$y$	Koordinate	m
$Z$	Zeit (in Zeitgleichung)	min
$z$	Koordinate	m
$z_B$	jährlicher Betriebskostensatz	%/a
$z_F$	Anzahl der Flügel	–
$z_H$	Hindernishöhe	m
$z_S$	Spiegelhöhe	m
$z_T$	Turmhöhe	m

### b) griechische Buchstaben

$\alpha$	Absorptionskoeffizient	–
$\alpha_A$	Anstellwinkel	Grad
$\alpha_{A, \text{Nenn}}$	Nenn-Anstellwinkel	Grad
$\alpha_D$	Divergenzwinkel der Sonnenstrahlen	Grad
$\alpha_I$	Absorptionskoeffizient im Infrarot- und längerem Wellenlängenbereich	–
$\alpha_K$	Wärmeübergangszahl der freien Konvektion	$\text{W/m}^2 \text{K}$
$\alpha_{K, S}$	Wärmeübergangszahl an der Schwimmbadoberfläche	$\text{W/m}^2 \text{K}$
$\alpha_R$	Wärmeübergangszahl im Rohr	$\text{W/m}^2 \text{K}$
$\alpha_s$	Absorptionskoeffizient im Spektrum der Sonnenstrahlung	–
$\alpha_i$	Wärmeübergangszahl auf der Innenseite	$\text{W/m}^2 \text{K}$
$\beta$	Volumenausdehnungskoeffizient	1/K
$\beta$	Winkel zwischen Profில்se und Rotorebene (Blatteinstellwinkel)	Grad
$\beta_N$	Blatteinstellwinkel an der Nabe	Grad
$\beta_E$	Blatteinstellwinkel am Rotorende	Grad
$\beta_{\text{Nenn}}$	Nenn-Blatteinstellwinkel	Grad
$\gamma$	Winkel zwischen Windgeschwindigkeit und Anströmgeschwindigkeit	Grad
$\delta$	Deklinationswinkel	Grad
$\delta_I$	Dicke der Isolation	m
$\Delta p$	Druckdifferenz	$\text{N/m}^2$
$\Delta t$	Abkühlung des Beckenwassers	$^\circ\text{C}$
$\Delta t_m$	mittlere Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Fluid	$^\circ\text{C}$
$\Delta t_{\text{Sp}}$	Temperaturspreizung des Speichers	$^\circ\text{C}$
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Längenelemente	m
$\Delta\beta$	Differenz des Blatteinstellwinkels	Grad
$\Delta\psi_o$	Orientierungsfehler	Grad
$\Delta\psi_w$	Winkelfehler	Grad
$\varepsilon$	Emissionskoeffizient	–
$\varepsilon_I$	Emissionskoeffizient im infraroten Bereich	–
$\varepsilon_S$	Emissionskoeffizient im Spektrum der Sonnenstrahlung	–
$\varepsilon(\lambda)$	drückt die Wellenlängenabhängigkeit des Emissionskoeffizienten aus	–
$\zeta$	Widerstandsbeiwert	–
$\eta$	Wirkungsgrad	–
$\bar{\eta}$	mittl. Kollektorstufenwirkungsgrad (Nutzungsgrad)	–

Symbol	Erläuterungen	Einheiten
$\eta_{\text{Aus}}$	Teilwirkungsgrad für Heliostat-Ausfälle	—
$\eta_{\text{B,A}}$	Teilwirkungsgrad für Blocken und Abschatten	—
$\eta_{\text{C}}$	Teilwirkungsgrad für Cosinus-Verluste	—
$\eta_{\text{G}}$	Generatorwirkungsgrad	—
$\eta_{\text{F}}$	Wirkungsgrad der Spiegel- und Nachführfehler	—
$\bar{\eta}_{\text{F}}$	mittl. Feldwirkungsgrad (Systemnutzungsgrad)	—
$\eta_{\text{FK}}$	Wirkungsgrad des Flachkollektors	—
$\eta_{\text{KF}}$	Wirkungsgrad des Kollektorfelds	—
$\eta_{\text{KK}}$	Wirkungsgrad des konzentrierenden Kollektors	—
$\eta_{\text{KL}}$	Wirkungsgrad des Kreislaufs	—
$\eta_{\text{OR}}$	Wirkungsgrad des offenen Receivers	—
$\eta_{\text{R}}$	unvollständige Reflexion	—
$\eta_{\text{SF}}$	Wirkungsgrad für Spiegelfelder	—
$\eta_{\text{SF,i}}$	Wirkungsgrad eines Spiegels	—
$\eta_{\text{SV}}$	Wirkungsgrad Speicher, Zwischenkreislauf und Verdampfer	—
$\eta_{\text{W,T}}$	Windbelastung und Turmbewegung	—
$\eta_{\text{d}}$	dynamische Zähigkeit	kg/m s
$\eta_{\text{m}}$	mechanischer Wirkungsgrad	—
$\eta_{\text{th}}$	thermischer Wirkungsgrad	—
$\eta_0$	Konversionsfaktor	—
$\eta_e$	Eigenverbrauch, ausgedrückt als Wirkungsgrad	—
$\varphi$	Winkel	Grad
$\Theta_1$	Einfallswinkel	Grad
$\Theta_2$	Brechungswinkel	Grad
$\Lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
$\lambda$	geographische Länge	Grad
$\lambda$	Wellenlänge	m
$\lambda$	Reibungszahl	—
$\lambda_{\text{S}}$	Schnellaufzahl	—
$\lambda_0$	Bezugsmeridian für die gesetzliche Zeit GZ	Grad
$\nu$	Frequenz des Lichts	1/s
$\nu_{\text{d}}$	Tagesnutzungsgrad	—
$\nu'$	kinematische Zähigkeit	m <sup>2</sup> /s
$\xi$	Anteil der vom Beckenwasser und vom Beckenboden absorbierten Globalstrahlung	—
$\varrho$	Reflexionsgrad	—
$\varrho_{\text{A}}$	Reflexionsgrad des Absorbers	—
$\varrho_{\text{B}}$	Reflexionsgrad des Bodens	—
$\varrho_{\text{I}}$	Reflexionsgrad im langwelligen Bereich	—
$\varrho_{\text{L}}$	Dichte der Luft (bei $t_{\text{u}} = 25^\circ\text{C}; 1,2$ )	kg/m <sup>3</sup>
$\varrho_{\text{OTM}}$	Dichte der organischen Trockenmasse	kg/m <sup>3</sup>
$\varrho_{\text{Sp}}$	Dichte des Speichermediums	kg/m <sup>3</sup>
$\varrho_{\text{Su}}$	Dichte des Substrats	kg/m <sup>3</sup>
$\varrho_{\text{W}}$	Wasserdichte	kg/m <sup>3</sup>
$\varrho_{\text{i}}$	Wasserdichte am Kollektoreintritt	kg/m <sup>3</sup>
$\varrho_{\text{o}}$	Wasserdichte am Kollektorausritt	kg/m <sup>3</sup>
$\varrho_{\text{s}}$	reflektierte Strahlänge vom Spiegel bis zum Brennpunkt	m
$\varrho_0$	Reflektivität von Glas in Luft bei senkrechter Einstrahlung	—
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante	5,67 · 10 <sup>-8</sup> Wm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>

Symbol	Erläuterungen	Einheiten
$\tau$	Transmissionskoeffizient	—
$\tau_A$	Transmissionskoeffizient bei alleiniger Berücksichtigung der Absorption	—
$\tau_{Ab}$	Transmissionskoeffizient der Gasabsorption in der Atmosphäre	—
$\tau_G$	Gesamttransmission	—
$\tau_{MS}$	Transmissionskoeffizient der Mie-Streuung	—
$\tau_{RS}$	Transmissionskoeffizient der Rayleigh-Streuung	—
$\tau_T$	Transmissionskoeffizient ohne Berücksichtigung Absorption	—
$\Phi$	Winkel	Grad
$\Phi_R$	Randwinkel	Grad
$\varphi$	relative Feuchte	—
$\psi$	Einfallswinkel der Strahlung	Grad
$\psi_z$	Zenitwinkel	Grad
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	1/s

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Formelzeichen</b> .....	XV
<b>1 Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energiequellen</b> .....	1
1.1 Einleitung .....	1
1.2 Geothermische Energie .....	5
1.3 Gezeitenenergie .....	9
1.4 Wasserkraft .....	11
1.5 Windenergie .....	12
1.6 Wellenenergie .....	12
1.7 Energie der Meeresströmung .....	14
1.8 Umweltwärme .....	15
1.9 Biologische und chemische Energiewandlung .....	17
1.10 Photoelektrische Energiewandlung .....	18
1.11 Solarthermische Energiewandlung .....	18
1.12 Diskussion des möglichen Beitrags zur Energieversorgung ...	19
1.12.1 Der Potentialbegriff .....	19
1.12.2 Der heutige Beitrag .....	19
1.12.3 Nachteile und Vorteile regenerativer Energiequellen .....	20
1.12.4 Der zukünftige Beitrag .....	22
<b>2 Darbietung solarer Strahlungsenergie</b> .....	25
2.1 Strahlung und Schwächungsmechanismen .....	25
2.1.1 Extraterrestrische Strahlung .....	25
2.1.2 Gang durch die Atmosphäre .....	27
2.1.3 Strahlung auf geneigte Flächen .....	28
2.2 Terrestrisch nutzbare Strahlung .....	32
2.2.1 Strahlungsbilanzen .....	32
2.2.2 Das allgemeine Transmissionsgesetz .....	35
2.2.3 Streuung in der Atmosphäre .....	36
2.2.4 Absorption der Sonnenstrahlung .....	39
2.2.5 Direkte Sonnenstrahlung .....	40
2.2.6 Himmelsstrahlung .....	41
2.2.7 Globalstrahlung .....	43
2.3 Messung solarer Strahlungsenergie .....	45
2.4 Zusammenhang zwischen der Globalstrahlung auf horizontale Flächen und derjenigen auf geneigte Flächen .....	47

<b>3</b>	<b>Niedertemperaturkollektoren</b> .....	50
3.1	Aufbau und Funktionsweise des Flachkollektors .....	50
3.2	Die optischen Eigenschaften des Absorbers und der Abdeckung .....	52
3.3	Bestimmung der Nutzleistung und des Wirkungsgrads .....	56
3.4	Transmissionsverluste der Kollektorabdeckung .....	58
3.4.1	Bestimmung des Reflexionskoeffizienten mit Hilfe der Brechungsindizes .....	58
3.4.2	Bestimmung des Transmissionskoeffizienten aus den Reflexionskoeffizienten ohne Absorption im Glas ...	60
3.4.3	Bestimmung der Transmissionskoeffizienten bei alleiniger Berücksichtigung der Absorption .....	62
3.4.4	Bestimmung des Gesamttransmissionskoeffizienten bei Reflexion und Absorption .....	62
3.5	Das HWB-Kollektormodell .....	64
3.6	Vergleich der drei Kollektorgleichungen .....	65
3.7	Test von Niedertemperaturkollektoren .....	67
3.8	Kollektorpreise .....	68
<b>4</b>	<b>Solare Niedertemperatursysteme</b> .....	70
4.1	Solarbeheizte Freischwimmbäder .....	70
4.1.1	Günstige Voraussetzungen für die Solarenergienutzung bei Freischwimmbädern .....	70
4.1.2	Berechnung des Wärmebedarfs ohne Beckenabdeckung .....	70
4.1.2.1	Bilanzierung der Wärmeströme eines Freibads .....	70
4.1.2.2	Berechnung der Strahlungs- und Konvektionsverluste .....	71
4.1.2.3	Berechnung der Verdunstungsverluste .....	71
4.1.2.4	Transmissionsverluste an das Erdreich .....	73
4.1.2.5	Berechnung des Wärmezugewinns durch Sonneneinstrahlung ins Becken .....	73
4.1.2.6	Berechnung des gesamten saisonalen Heizwärmebedarfs .....	74
4.1.3	Reduktion des Wärmebedarfs durch eine Beckenabdeckung ..	75
4.1.4	Berechnung der solaren Deckungsrate .....	76
4.1.5	Wirtschaftlichkeit der Beckenwassererwärmung .....	81
4.2	Brauchwassererwärmung und Raumheizung .....	84
4.2.1	Thermosiphonanlagen .....	84
4.2.1.1	Thermosiphonischer Massenstrom .....	85
4.2.1.2	Effektive Rohrleitungslänge .....	88
4.2.1.3	Dichte-Höhe-Diagramm und Auftriebsflächen .....	89
4.2.1.4	Gestaltung von Thermosiphonsystemen .....	89
4.2.2	Warmwassersysteme mit Zwangsumlauf .....	91
4.2.2.1	Einfluß von Kollektorfläche und Speichervolumen .....	92
4.2.2.2	Einfluß anderer Systemparameter .....	93
4.2.3	Auslegungshinweise .....	94
4.2.3.1	Energiebedarf .....	94