

---

# Inhalt

<b>1 Energiebedarf</b> .....	1
1.1 Weltweite Entwicklung des Energiebedarfs, Energieressourcen .....	1
1.2 Auswirkungen des Energiebedarfs .....	3
1.3 Energieformen, -träger und -umwandlungsprozesse, Exergie-Anergie .....	7
1.4 Bedarfsdiagramme Deutschland- wirtschaftliche Überlegungen .....	11
1.5 Energiepreise, Erneuerbare Energiengesetz (EEG), Kyoto-Protokoll, Emissionshandel .....	17
1.6 Erneuerbare Energien (EE) in Deutschland .....	20
Literatur .....	21
<b>2 Sonne</b> .....	23
2.1 Einleitung Sonne .....	24
2.2 Fusionsreaktion in der Sonne – Sonne als Energiequelle .....	24
2.3 Aufbau der Sonne .....	26
2.3.1 Blickwinkel der Sonne, Leuchtdichtenverteilung über der Sonnenscheibe .....	27
2.3.2 Solarkonstante, Globalstrahlung, direkte und diffuse Einstrahlung .....	28
2.3.3 Spektrum der extraterrestrischen Strahlung .....	30
2.3.4 Schwächungsmechanismen in der Atmosphäre .....	34
2.3.5 Technische Berechnung der Schwächung in der Atmosphäre .....	41
2.3.6 Räumliche und zeitliche Variation der Solarstrahlung .....	44
2.3.7 Direktstrahlung auf horizontale oder geneigte Flächen .....	51
2.3.8 Tages-, Jahressummen der extraterrestrischen Einstrahlung auf unterschiedlich ausgerichtete Flächen .....	53
2.3.9 Einstrahlungsrichtung auf nachgeführte Flächen .....	58
2.3.10 Einstrahlungsrichtung der diffusen Strahlung .....	61
2.3.11 Typische Werte der Globalstrahlung .....	71
2.3.12 Einstrahlung bei Bewölkung – Statistische Verfahren .....	72
2.4 Terrestrisch nutzbare Solarstrahlung, Strahlungsbilanz der Erde .....	78
Literatur .....	81

<b>3 Einfluss der Konzentration auf solarthermische Systeme</b> .....	83
3.1 Abgrenzung zwischen aktiver und passiver Solarthermie .....	83
3.2 Kollektoren .....	85
3.2.1 Kollektorarten und typische Einsatztemperaturen .....	85
3.3 Prinzipieller Aufbau eines Kollektors .....	89
3.4 Wirkungsgrad nichtkonzentrierender Solarkollektoren .....	91
3.5 Konzentrierende Systeme .....	100
3.5.1 Kollektorwirkungsgrad konzentrierender Systeme .....	102
3.5.2 Bedeutung und Grenzen des Konzentrationsverhältnisses .....	105
3.5.3 Maximale Absorbtemperatur .....	107
3.5.4 Geometrische Nachführungsaspekte .....	110
3.5.5 Nicht-abbildende Konzentratoren .....	112
3.5.6 Linear-abbildende Konzentratoren – Parabolrinnen .....	118
3.5.7 Reflektorbedingte Grenzen des Konzentrationsverhältnisses .....	119
3.5.8 Konzentrationsbedingte technische Nutzungsfelder .....	122
Literatur .....	124
<b>4 Passive Mechanismen in der Solarenergie</b> .....	125
4.1 Passive Transportvorgänge und Anwendung in der Solarthermie .....	126
4.2 Arten der Wärmeübertragung .....	128
4.3 Wärmeleitung in Fluiden und Festkörpern .....	131
4.3.1 Stationäre Wärmeleitung in Fluiden und Festkörpern .....	132
4.3.2 Instationäre Wärmeleitung in einem Kontinuum .....	141
4.3.3 Anwendung der Wärmeleitung in der Gebäudetechnik .....	153
4.3.4 Molekulare Wärmeleitung .....	157
4.4 Strahlungswärmetransport .....	168
4.4.1 Emission, Absorption und Reflexion .....	169
4.4.2 Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz .....	172
4.4.3 Strahlungsaustausch zwischen Körpern .....	175
4.4.4 Strahlungsaustausch zwischen grauen, diffus strahlenden unendlichen Flächen .....	182
4.4.5 Strahlungsaustausch zwischen schwarz strahlenden, endlich großen Flächen .....	184
4.4.6 Strahlungsaustausch zwischen grau strahlenden, endlich großen Flächen .....	189
4.4.7 Strahlung in Anwesenheit der Sonne .....	194
4.5 Strahlungstransport in transparenten Medien .....	195
4.5.1 Reflexion, Snelliussches-Brechungsgesetz und Totalreflektion ....	195
4.5.2 Polarisation, Fresnel'sche Formeln und Brewster Winkel .....	200
4.5.3 Transmission und Reflexion in transparenten Medien .....	210
4.5.4 Ursachen der Absorption und Reflexion in transparenten Medien .....	217
4.5.5 Technische Manipulation des Strahlungstransports in transparenten Körpern .....	223

4.5.6	Verfahren zur Erzeugung dünner, selektiver Schichten .....	230
4.5.7	Fenster .....	238
4.5.8	Transparente Wärmedämmung .....	245
4.6	Selektive Absorber .....	252
4.6.1	Anforderungen an einen selektiven Absorber .....	252
4.6.2	Aufbau selektiver Absorber .....	253
4.6.3	Absorberschichten für die Anwendung im Vakuum .....	258
4.6.4	Nieder- u. Mitteltemperaturabsorberschichten in Luft/Vakuum .....	259
4.6.5	Absorberschichten für Hochtemperaturanwendungen .....	263
4.6.6	Degradationsmechanismen selektiver Absorberschichten .....	267
	Literatur .....	269
<b>5</b>	<b>Impuls- und Energietransport in solarthermischen Systemen .....</b>	<b>273</b>
5.1	Kollektorstillstand .....	274
5.2	Einphasiger konvektiver Impuls- und Wärmetransport .....	278
5.2.1	Erhaltungsgleichungen .....	281
5.2.2	Ähnlichkeitsgesetze der Strömungsmechanik .....	286
5.2.3	Laminarer Impulsaustausch .....	289
5.2.4	Grenzschichtgleichungen .....	292
5.2.5	Laminarer Energieaustausch .....	295
5.2.6	Strömungs- und Wärmeübergangsparameter .....	298
5.2.7	Thermische Randbedingungen .....	300
5.2.8	Laminare Wärmeübertragung in Rohren .....	301
5.2.9	Turbulenter Impulsaustausch .....	309
5.2.10	Turbulenter Energieaustausch .....	318
5.2.11	Analogie zwischen Wärme- und Impulstransportparametern ....	319
5.2.12	Verfahren und Modellierungsansätze zur numerischen Berechnung .....	320
5.2.13	Anwendung lokaler fluiddynamischer Berechnungen im Kollektor .....	323
5.2.14	Entscheidung Zwang-, Misch- oder auftriebsbehaftete Konvektion .....	326
5.2.15	Ingenieurtechnisch oft verwendete einphasige Wärmeübergangsbeziehungen .....	332
5.3	Mehrphasiger Impuls- und Energieaustausch .....	337
5.3.1	Wärmeübergang beim Sieden .....	337
5.3.2	Behältersieden .....	346
5.3.3	Erscheinungsformen des Rohrsiedens .....	349
5.3.4	Kenngrößen der Zweiphasenströmung .....	353
5.3.5	Homogenes Modell der Zweiphasenströmung .....	357
5.3.6	Schlupfmodell .....	358
5.3.7	Druckverlustberechnung in Ein- u. Mehrphasenströmungen ....	359

5.3.8	Strömungsformenkarten .....	367
5.3.9	Wärmeübergang beim Phasenwechsel .....	370
5.3.10	Instabilitäten der Zweiphasenströmung .....	372
5.3.11	Kondensation in Rohrleitungen .....	375
	Literatur .....	383
<b>6</b>	<b>Solarthermische Niedertemperatursysteme .....</b>	<b>387</b>
6.1	Berechnung solarthermischer Niedertemperatursysteme .....	388
6.2	Niedertemperaturkollektorvarianten .....	391
6.2.1	Röhrenabsorber .....	392
6.2.2	Flachkollektor .....	393
6.2.3	Vakuumkollektor .....	397
6.2.4	Weitere Kollektorvarianten .....	402
6.3	Systemsimulation solarthermischer Systeme .....	407
6.3.1	Energiefluss bei Plug-flow-Modellierung .....	408
6.3.2	Fehleranalyse in Systemsimulationen .....	410
6.3.3	Solkollektormodellierung .....	413
6.4	Aufbau solarthermischer Niedertemperatursysteme .....	417
6.4.1	Thermosiphonanlagen .....	418
6.4.2	Zwangsumlaufsysteme, Komponenten des Solarkreises .....	421
6.4.3	Planung, Dimensionierung und Konzeption von Niedertemperatursolarsystemen .....	443
6.4.4	Verringerung und Vermeidung von Stillstandssituationen .....	455
6.4.5	Systemkonzepte solarthermischer Niedertemperaturanlagen .....	471
	Literatur .....	483
<b>7</b>	<b>Solarthermische Hochtemperatursysteme .....</b>	<b>487</b>
7.1	Klassifizierung von Solarkraftwerken .....	488
7.2	Solarturmanlagen .....	490
7.3	Parabolrinnenkraftwerke .....	496
7.4	Fresnelkraftwerke .....	503
7.5	Spiegel und Spiegelfeldauslegung .....	506
7.5.1	Strahlungsdichteverteilung der Sonne-Zirkumsolarstrahlung ....	508
7.5.2	Geometrische Verluste am Einzelspiegel .....	510
7.5.3	Geometrischer Verluste am Spiegelverband .....	512
7.5.4	Optische, materialspezifische und Absorptionsverluste .....	515
7.5.5	Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des Receiverertrags .....	517
7.6	Aufwindkraftwerke .....	525
7.6.1	Funktionsprinzip eines Aufwindkraftwerks .....	525
7.6.2	Leistung und Wirkungsgrad eines Aufwindkraftwerks .....	527
7.6.3	Komponenten des Aufwindkraftwerks .....	529
7.7	Solarpond .....	541
7.7.1	Physikalische Wirkungsweise des Solarponds .....	541

7.7.2	Mathematische Beschreibung des Solarteichs und der Randbedingungen .....	542
7.7.3	Stabilitätsüberlegungen und vertikale Grenzflächenbewegung in Solarteichen .....	548
7.7.4	Verfahren zur thermischen Ausspeicherung der Wärme .....	549
7.7.5	Operative und technische Maßnahmen zum Betrieb eines Solarponds .....	552
7.8	Energiewandlungsprozesse .....	554
7.8.1	Energiewandelnde Kreisprozesse .....	555
7.8.2	Carnot-Prozess, Auswirkung irreversibler Vorgänge .....	557
7.8.3	Joule-Brayton-Prozess (Gasturbinenprozess) .....	562
7.8.4	Clausius-Rankine-Prozess (Dampfprozess) .....	567
7.8.5	Kombinierte Prozesse-GuD .....	573
7.8.6	Alternative Kreisprozesse, Organic Rankine Cycle (ORC), KALINA Prozess .....	575
7.8.7	Kopplung Spiegelfeld- Energiekonversion, fossil-solare Hybridkraftwerke .....	584
7.8.8	Kostenstrukturen und Optionen solarthermischer Kraftwerke ....	588
	Literatur .....	591
<b>8</b>	<b>Energiespeicher</b> .....	<b>595</b>
8.1	Energieinhalt und Anforderungen an Speicher .....	595
8.2	Auslegungsverhältnis solarthermischer Kraftwerke .....	598
8.3	Direkte thermische Speicher .....	599
8.3.1	Flüssige Speichermedien .....	599
8.3.2	Speicherkapazität .....	601
8.3.3	Arten flüssiger thermischer Energiespeichersysteme .....	603
8.3.4	Thermische Speicher mit festem Speichermedium .....	607
8.4	Latentwärmespeicher .....	609
8.5	Reaktionsspeicher .....	611
8.5.1	Katalytische Reaktionen .....	611
8.5.2	Thermische Dissoziationsreaktionen .....	612
8.5.3	Adsorptionsvorgänge .....	613
8.6	Niedertemperaturspeicher .....	619
8.6.1	Niedertemperaturspeicherarten .....	621
8.6.2	Thermische Anforderungen an Wärmespeicher .....	627
8.6.3	Temperaturschichtung innerhalb des Speichers .....	629
	Literatur .....	634
<b>9</b>	<b>Solare Klimatisierung</b> .....	<b>637</b>
9.1	Kühlung und Klimatisierung .....	637
9.2	Bewertungsgrößen von Kälte- und Klimaprozessen .....	640
9.3	Raumklima, Behaglichkeit und Kühllast .....	642

---

9.4	Bestimmung der Kühlleistung .....	645
9.5	Solare Kühlverfahren .....	645
9.6	Kälte- und Klimatisierungsprozessführung .....	647
9.6.1	Ideale Kompressionskältemaschine, Carnot'scher Vergleichsprozess .....	647
9.6.2	Reale Kompressionskältemaschine und Kältemittelwahl .....	650
9.6.3	Thermisch getriebene Kältemaschinen (Sorptionskältemaschinen) .....	652
9.7	Bewertung der Klimatisierung .....	668
	Literatur .....	672
<b>Anhang A</b>	<b>Berechnung von Wärmeübertragern .....</b>	<b>675</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>.....</b>	<b>695</b>