

Inhaltsübersicht

Mitarbeiterverzeichnis XXI

Liste der Formelzeichen XXIII

1 Einführung und Aufbau 1

1.1 Energiesystem 2

1.2 Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energien 12

1.3 Aufbau und Vorgehen 15

1.4 Konventionelle Vergleichssysteme 29

Literatur 45

2 Grundlagen des regenerativen Energieangebots 47

2.1 Energiebilanz der Erde 47

2.2 Solare Strahlung 57

2.3 Windenergie 75

2.4 Lauf- und Speicherwasserangebot 95

2.5 Photosynthetisch fixierte Energie 111

2.6 Erdwärme 122

Literatur 136

3 Passive Sonnenenergienutzung 139

3.1 Physikalische Grundlagen 140

3.2 Systemtechnische Beschreibung 148

3.3 Potenziale und Nutzung 178

Literatur 179

4 Solarthermische Wärmenutzung 181

4.1 Physikalische Grundlagen 181

4.2 Systemtechnische Beschreibung 191

4.3 Ökonomische und ökologische Analyse 229

4.4 Potenziale und Nutzung 252

Literatur 261

5	Solarthermische Stromerzeugung	263
5.1	Physikalische Grundlagen	264
5.2	Systemtechnische Beschreibung	273
5.3	Ökonomische und ökologische Analyse	325
5.4	Potenziale und Nutzung	345
	Literatur	348
6	Photovoltaische Stromerzeugung	353
6.1	Physikalische Grundlagen	353
6.2	Systemtechnische Beschreibung	364
6.3	Ökonomische und ökologische Analyse	430
6.4	Potenziale und Nutzung	443
	Literatur	450
7	Stromerzeugung aus Windenergie	453
7.1	Physikalische Grundlagen	453
7.2	Systemtechnische Beschreibung	471
7.3	Ökonomische und ökologische Analyse	523
7.4	Potenziale und Nutzung	543
	Literatur	551
8	Stromerzeugung aus Wasserkraft	555
8.1	Physikalische Grundlagen	555
8.2	Systemtechnische Beschreibung	559
8.3	Ökonomische und ökologische Analyse	595
8.4	Potenziale und Nutzung	610
	Literatur	617
9	Nutzung von Umgebungsluft und oberflächennaher Erdwärme	621
9.1	Physikalische Grundlagen	623
9.2	Systemtechnische Beschreibung	636
9.3	Ökonomische und ökologische Analyse	672
9.4	Potenziale und Nutzung	691
	Literatur	697

10	Nutzung tiefer Geothermie	699
10.1	Physikalische Grundlagen	700
10.2	Systemtechnische Beschreibung	703
10.3	Ökonomische und ökologische Analyse	761
10.4	Potenziale und Nutzung	788
	Literatur	802
11	Zusammenfassender Vergleich	805
11.1	Bereitstellung elektrischer Energie	805
11.2	Bereitstellung thermischer Energie	844
Anhang A	Nutzung der Energien des Meeres	873
A.1	Wellennutzung	873
A.2	Gezeitenutzung	882
A.3	Weitere Nutzungsmöglichkeiten	886
	Literatur	891
Anhang B	Energetische Nutzung von Biomasse	893
B.1	Aufbau typischer Bereitstellungsketten	894
B.2	Wandlungsmöglichkeiten in End- bzw. Nutzenergie	895
	Literatur	898
Anhang C	Energieeinheiten	899
C.1	Vorsätze und Vorsatzzeichen	899
C.2	Umrechnungsfaktoren	899
	Sachverzeichnis	901

Inhaltsverzeichnis

Mitarbeiterverzeichnis	XXI
Liste der Formelzeichen	XXIII
1 Einführung und Aufbau	1
1.1 Energiesystem	2
Martin Kaltschmitt	
1.1.1 Energiebegriffe	2
1.1.2 Weltweiter Energieverbrauch	5
1.1.3 Energieverbrauch in Deutschland	9
1.2 Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energien	12
Martin Kaltschmitt	
1.2.1 Erneuerbare Energien	12
1.2.2 Untersuchte Möglichkeiten	14
1.3 Aufbau und Vorgehen	15
Martin Kaltschmitt	
1.3.1 Physikalische Grundlagen	15
1.3.2 Systemtechnische Beschreibung	15
1.3.3 Ökonomische und ökologische Analyse	15
1.3.4 Potenziale und Nutzung	25
1.4 Konventionelle Vergleichssysteme	29
Jana Weinberg, Marina Stegelmeier, Martin Kaltschmitt und Wolfgang Streicher	
1.4.1 Randbedingungen	30
1.4.2 Techniken zur Strombereitstellung	32
1.4.2.1 Systemtechnische Beschreibung	32
1.4.2.2 Ökonomische und ökologische Analyse	33
1.4.3 Techniken zur Wärmebereitstellung	37
1.4.3.1 Systemtechnische Beschreibung	37
1.4.3.2 Ökonomische und ökologische Analyse	38
Literatur	45

2	Grundlagen des regenerativen Energieangebots	47
2.1	Energiebilanz der Erde	47
	Martin Kaltschmitt und Andreas Wiese	
2.1.1	Erneuerbare Energiequellen	47
2.1.2	Atmosphäre	52
2.1.3	Bilanz der Energieströme	54
2.2	Solare Strahlung	57
	Martin Kaltschmitt und Wolfgang Streicher	
2.2.1	Grundlagen des solaren Strahlungsangebots	57
2.2.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik	64
2.3	Windenergie	75
	Martin Kaltschmitt und Andreas Wiese	
2.3.1	Grundlagen der Windentstehung	75
2.3.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik	83
2.4	Lauf- und Speicherwasserangebot	95
	Martin Kaltschmitt und Klaus Jorde	
2.4.1	Grundlagen des Wasserangebots	95
2.4.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik	101
2.5	Photosynthetisch fixierte Energie	111
	Iris Lewandowski	
2.5.1	Produktion organischer Masse durch Photosynthese	112
2.5.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik	119
2.6	Erdwärme	122
	Ernst Huenges und Martin Kaltschmitt	
2.6.1	Grundlagen	123
2.6.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik	131
	Literatur	136
3	Passive Sonnenenergienutzung	139
3.1	Physikalische Grundlagen	140
	Wolfgang Streicher und Marina Stegelmeier	
3.1.1	Energiebilanz eines der Solarstrahlung ausgesetzten Körpers	140
3.1.2	Passive Solarenergienutzung in Gebäuden	144
3.2	Systemtechnische Beschreibung	148
	Marina Stegelmeier, Wolfgang Streicher und Martin Kaltschmitt	
3.2.1	Definitionen	148
3.2.2	Systemkomponenten	151
3.2.3	Funktionale Systeme	171

3.3	Potenziale und Nutzung	178
	Wolfgang Streicher und Martin Kaltschmitt	
3.3.1	Potenziale	178
3.3.2	Nutzung	179
	Literatur	179
4	Solarthermische Wärmenutzung	181
4.1	Physikalische Grundlagen	181
	Wolfgang Streicher	
4.1.1	Absorption, Reflexion und Transmission	181
4.1.2	Emission	182
4.1.3	Optische Eigenschaften von Absorbern	183
4.1.4	Optische Eigenschaften von Abdeckungen	185
4.1.5	Energiebilanz	186
4.1.6	Wirkungsgrad und solarer Deckungsgrad	189
4.2	Systemtechnische Beschreibung	191
	Wolfgang Streicher, Marina Stegelmeier und Martin Kaltschmitt	
4.2.1	Kollektoren	191
4.2.2	Weitere Systemelemente	203
4.2.3	Energiewandlungskette und Verluste	215
4.2.4	Anlagenkonzepte	217
4.2.5	Anwendungen solarthermischer Anlagen	220
4.3	Ökonomische und ökologische Analyse	229
	Marina Stegelmeier, Wolfgang Streicher und Martin Kaltschmitt	
4.3.1	Referenzanlagen	229
4.3.2	Ökonomische Analyse	235
4.3.3	Ökologische Analyse	245
	4.3.3.1 Lebenszyklusanalyse	245
	4.3.3.2 Weitere Umwelteffekte	250
4.4	Potenziale und Nutzung	252
	Marina Stegelmeier und Martin Kaltschmitt	
4.4.1	Potenziale	252
4.4.2	Nutzung	258
	4.4.2.1 Welt	259
	4.4.2.2 Deutschland	260
	Literatur	261
5	Solarthermische Stromerzeugung	263
5.1	Physikalische Grundlagen	264
	Gerhard Weinrebe	
5.1.1	Strahlungsabsorption	264
5.1.2	Strahlungskonzentration	265

5.1.3	Kreisprozesse	270
5.2	Systemtechnische Beschreibung	273
Gerhard Weinrebe		
5.2.1	Parabolrinnen-Kraftwerke	273
5.2.1.1	Systemkomponenten	273
5.2.1.2	Anlagenkonzepte	284
5.2.2	Linear-Fresnel-Kraftwerke	289
5.2.2.1	Systemkomponenten	289
5.2.2.2	Anlagenkonzepte	292
5.2.3	Solarturm-Kraftwerke	293
5.2.3.1	Systemkomponenten	294
5.2.3.2	Anlagenkonzepte	303
5.2.4	Dish/Stirling-Systeme	308
5.2.4.1	Systemkomponenten	309
5.2.4.2	Anlagenkonzepte	313
5.2.5	Aufwindkraftwerke	315
5.2.5.1	Systemkomponenten	316
5.2.5.2	Anlagenkonzepte	318
5.2.6	Solarteiche	321
5.2.6.1	Systemkomponenten	321
5.2.6.2	Anlagenkonzepte	324
5.3	Ökonomische und ökologische Analyse	325
Christina Wulf, Gerhard Weinrebe und Martin Kaltschmitt		
5.3.1	Parabolrinnen-Kraftwerke	325
5.3.1.1	Referenzanlagen	325
5.3.1.2	Ökonomische Analyse	326
5.3.1.3	Ökologische Analyse	329
5.3.2	Fresnel-Kraftwerke	335
5.3.2.1	Referenzanlagen	335
5.3.2.2	Ökonomische Analyse	336
5.3.2.3	Ökologische Analyse	339
5.3.3	Solarturm-Kraftwerke	340
5.3.3.1	Referenzanlagen	340
5.3.3.2	Ökonomische Analyse	341
5.3.3.3	Ökologische Analyse	343
5.4	Potenziale und Nutzung	345
Gerhard Weinrebe, Martin Kaltschmitt und Christina Wulf		
5.4.1	Potenziale	345
5.4.2	Nutzung	347
Literatur	348

6	Photovoltaische Stromerzeugung	353
6.1	Physikalische Grundlagen	353
	Jörg Müller und Martin Kaltschmitt	
6.1.1	Bändermodell	353
6.1.2	Leiter, Nichtleiter und Halbleiter	354
6.1.3	Leitungsmechanismen in Halbleitern	356
6.1.4	Photoeffekt	360
6.1.5	p-n-Übergang	361
6.1.6	Photovoltaischer Effekt	362
6.2	Systemtechnische Beschreibung	364
6.2.1	Photovoltaikzelle und -modul	365
	Jörg Müller und Martin Kaltschmitt	
6.2.2	Weitere Systemkomponenten	392
	Stefan Reichert, Simon Schwunk und Detlef Schulz	
6.2.3	Netzunabhängige Systeme	417
	Stefan Reichert und Simon Schwunk	
6.2.4	Netzgekoppelte Systeme	423
	Stefan Reichert und Simon Schwunk	
6.2.5	Energiewandlungskette, Verluste und Leistungskennlinie	427
	Martin Kaltschmitt	
6.3	Ökonomische und ökologische Analyse	430
	Kornelia Lippitsch und Martin Kaltschmitt	
6.3.1	Referenzanlagen	430
6.3.2	Ökonomische Analyse	432
6.3.3	Ökologische Analyse	436
	6.3.3.1 Lebenszyklusanalyse	436
	6.3.3.2 Weitere Umwelteffekte	439
6.4	Potenziale und Nutzung	443
	Kornelia Lippitsch und Martin Kaltschmitt	
6.4.1	Potenziale	443
6.4.2	Nutzung	447
	6.4.2.1 Welt	447
	6.4.2.2 Deutschland	449
	Literatur	450
7	Stromerzeugung aus Windenergie	453
7.1	Physikalische Grundlagen	453
	Michael Schlüter und Martin Kaltschmitt	
7.1.1	Idealisierte Windenergiekonverter	454
7.1.2	Reale Windenergiekonverter	460
7.1.3	Regelung von Windenergiekonvertern	468
7.2	Systemtechnische Beschreibung	471

Burcu Özdirik, Martin Kaltschmitt, Martin Skiba und Detlef Schulz	
7.2.1 Bauformen	471
7.2.2 Systemelemente einer Windkraftanlage	473
7.2.2.1 Rotorsystem	474
7.2.2.2 Triebstrang	485
7.2.2.3 Gondel, Turm und Verankerung im Untergrund	495
7.2.2.4 Netzanbindung	502
7.2.3 Energiewandlungskette, Verluste und Leistungskennlinie	505
7.2.4 Gesamtsystemaspekte	512
7.3 Ökonomische und ökologische Analyse	523
Burcu Özdirik und Martin Kaltschmitt	
7.3.1 Referenzanlagen	523
7.3.2 Ökonomische Analyse	526
7.3.3 Ökologische Analyse	531
7.3.3.1 Lebenszyklusanalyse	531
7.3.3.2 Weitere Umwelteffekte	534
7.4 Potenziale und Nutzung	543
Burcu Özdirik und Martin Kaltschmitt	
7.4.1 Potenziale	544
7.4.2 Nutzung	548
7.4.2.1 Welt	548
7.4.2.2 Deutschland	549
Literatur	551
8 Stromerzeugung aus Wasserkraft	555
8.1 Physikalische Grundlagen	555
Klaus Jorde und Martin Kaltschmitt	
8.2 Systemtechnische Beschreibung	559
8.2.1 Schematischer Aufbau	559
Martin Kaltschmitt	
8.2.2 Systematisierung	560
Markus Aufleger	
8.2.3 Bauformen	562
Markus Aufleger	
8.2.4 Energietechnische Komponenten	573
Klaus Jorde, Franz Joos und Martin Kaltschmitt	
8.2.5 Energiewandlungskette, Verluste und Leistungsplan	590
Klaus Jorde und Martin Kaltschmitt	
8.3 Ökonomische und ökologische Analyse	595
Kornelia Lippitsch und Martin Kaltschmitt	
8.3.1 Referenzanlagen	595
8.3.2 Ökonomische Analyse	597

8.3.3	Ökologische Analyse	600
8.3.3.1	Lebenszyklusanalyse	600
8.3.3.2	Weitere Umwelteffekte	603
8.4	Potenziale und Nutzung	610
Kornelia Lippitsch und Martin Kaltschmitt		
8.4.1	Potenziale	610
8.4.2	Nutzung	614
8.4.2.1	Welt	614
8.4.2.2	Deutschland	615
Literatur		617
9	Nutzung von Umgebungsluft und oberflächennaher Erdwärme	621
9.1	Physikalische Grundlagen	623
Wolfgang Streicher, Felix Ziegler und Martin Kaltschmitt		
9.1.1	Wärmepumpenprinzip	624
9.1.2	Kennzahlen	631
9.2	Systemtechnische Beschreibung	636
Wolfgang Streicher, Martin Kaltschmitt, Felix Ziegler und Burkhard Sanner		
9.2.1	Wärmequellenanlage zur Nutzung der Umgebungsluft	636
9.2.2	Wärmequellenanlage zur Nutzung der oberflächennahen Erdwärme	640
9.2.3	Wärmepumpe	652
9.2.4	Energiewandlungskette und Verluste	661
9.2.5	Gesamtsysteme	663
9.3	Ökonomische und ökologische Analyse	672
Marina Stegelmeier, Wolfgang Streicher und Martin Kaltschmitt		
9.3.1	Referenzanlagen	672
9.3.2	Ökonomische Analyse	674
9.3.3	Ökologische Analyse	681
9.3.3.1	Lebenszyklusanalyse	682
9.3.3.2	Weitere Umwelteffekte	685
9.4	Potenziale und Nutzung	691
Martin Kaltschmitt und Wolfgang Streicher		
9.4.1	Potenziale	691
9.4.2	Nutzung	695
9.4.2.1	Welt	696
9.4.2.2	Deutschland	696
Literatur		697

10 Nutzung tiefer Geothermie	699
10.1 Physikalische Grundlagen	700
Nils Kock, Sebastian Janczik und Martin Kaltschmitt	
10.2 Systemtechnische Beschreibung	703
10.2.1 Untertagekomponenten	706
Nils Kock, Martin Kaltschmitt und Peter Seibt	
10.2.1.1 Exploration	706
10.2.1.2 Tiefbohranlage	707
10.2.1.3 Bohrtechnik	712
10.2.1.4 Verrohrung und Komplettierung	719
10.2.1.5 Test und Modellierung	720
10.2.1.6 Stimulation	722
10.2.2 Übertagekomponenten	724
Sebastian Janczik, Martin Kaltschmitt und Frank Kabus	
10.2.2.1 Geothermische Heizwerke	724
10.2.2.2 Zusätzliche Komponenten für Kraft- bzw. Heizkraftwerke	736
10.2.3 Anlagenkonzepte	745
Sebastian Janczik, Nils Kock und Martin Kaltschmitt	
10.2.3.1 Wärmebereitstellungskonzepte	745
10.2.3.2 Strom- bzw. KWK-Konzepte	750
10.2.3.3 Energiewandlungskette und Verluste	758
10.3 Ökonomische und ökologische Analyse	761
Sebastian Janczik, Nils Kock und Martin Kaltschmitt	
10.3.1 Referenzanlagen	761
10.3.1.1 Ausschließliche Wärmebereitstellung	761
10.3.1.2 Bereitstellung von Wärme und Strom	763
10.3.2 Ökonomische Analyse	766
10.3.2.1 Ausschließliche Wärmebereitstellung	766
10.3.2.2 Bereitstellung von Wärme und Strom	769
10.3.3 Ökologische Analyse	773
10.3.3.1 Ausschließliche Wärmebereitstellung	774
10.3.3.2 Bereitstellung von Wärme und Strom	784
10.4 Potenziale und Nutzung	788
Nils Kock, Sebastian Janczik und Martin Kaltschmitt	
10.4.1 Potenziale	788
10.4.1.1 Hydrothermale Wärmebereitstellung	788
10.4.1.2 Wärmebereitstellung mittels tiefer Sonden	791
10.4.1.3 Stromerzeugung	793
10.4.2 Nutzung	797
10.4.2.1 Welt	797
10.4.2.2 Deutschland	798
Literatur	802

11 Zusammenfassender Vergleich	805
11.1 Bereitstellung elektrischer Energie	805
11.1.1 Energieangebot	806
11.1.2 Systemtechnische Beschreibung	810
11.1.3 Ökonomische und ökologische Analyse	824
11.1.4 Potenziale und Nutzung	837
11.2 Bereitstellung thermischer Energie	844
11.2.1 Energieangebot	845
11.2.2 Systemtechnische Beschreibung	849
11.2.3 Ökonomische und ökologische Analyse	854
11.2.4 Potenziale und Nutzung	867
Anhang A – Nutzung der Energien des Meeres	873
Kai-Uwe Graw und Martin Kaltschmitt	
A.1 Wellennutzung	873
A.1.1 Welleninduzierte Fallhöhe	875
A.1.2 Oszillierende Wassersäule	877
A.1.3 Hydrodynamische Bewegung	880
A.2 Gezeitenutzung	882
A.2.1 Gezeitenkraftwerke	882
A.2.2 Nutzung von Ebb- und Flutstrom	884
A.3 Weitere Nutzungsmöglichkeiten	886
A.3.1 Unterschiedliche Wassertemperaturen	886
A.3.2 Meeresströmungen	888
A.3.3 Salzgehaltsunterschiede	890
A.3.4 Wasserverdunstung	890
A.3.5 Meeresbiomasse	891
Literatur	891
Anhang B – Energetische Nutzung von Biomasse	893
Martin Kaltschmitt	
B.1 Aufbau typischer Bereitstellungsketten	894
B.2 Wandlungsmöglichkeiten in End- bzw. Nutzenergie	895
B.2.1 Thermo-chemische Umwandlung	896
B.2.2 Physikalisch-chemische Umwandlung	897
B.2.3 Bio-chemische Umwandlung	898
Literatur	898
Anhang C – Energieeinheiten	899
C.1 Vorsätze und Vorsatzzeichen	899
C.2 Umrechnungsfaktoren	899
Sachverzeichnis	901

