

Martin Kaltschmitt | Wolfgang Streicher (Hrsg.)

Regenerative Energien in Österreich

Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte,
Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung

PRAXIS



VIEWEG+
TEUBNER

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Aufbau.....	1
1.1	Energiequellen und -ströme	1
1.1.1	Energiebegriffe	1
1.1.2	Energiequellen	4
	Sonne 4; Erdwärme 6; Planetengravitation und -bewegung 7	
1.1.3	Bilanz der Energieströme	7
1.1.4	Erneuerbare Energiequellen.....	10
1.2	Energiesystem Österreich.....	11
1.2.1	Primärenergieeinsatz.....	11
1.2.2	End- und Nutzenergieeinsatz.....	12
	Endenergieeinsatz 12; Nutzenergieeinsatz 13	
1.2.2.1	Elektrische Energie.....	14
1.2.2.2	Thermische Energie.....	15
	Raumwärme und Trinkwarmwasser 16; Prozesswärme 16	
1.2.3	Umwelteffekte	17
	Treibhausgasemissionen 18; Emissionen mit versauernder und eutrophierender Wirkung 19; Toxische Emissionen 20 (Schwefeldioxid 20, Stickstoffoxide 20)	
1.2.4	Stromerzeugungsmix	21
1.3	Aufbau und Vorgehen.....	23
1.3.1	Grundlagen des regenerativen Energieangebots.....	23
1.3.2	Systemtechnische Beschreibung.....	24
1.3.3	Ökologische und ökonomische Analyse.....	24
1.3.3.1	Referenzanlagen	24
	Wärmebereitstellung 25; Strombereitstellung 26; Kraftstoffherzeugung 27	
1.3.3.2	Ökologische Analyse.....	27
	Lebenszyklusanalyse 27; Weitere Umwelteffekte 30	
1.3.3.3	Ökonomische Analyse.....	31
1.3.4	Potenziale und Nutzung.....	33
1.4	Konventionelle Vergleichssysteme	37
1.4.1	Bereitstellung elektrischer Energie.....	38
1.4.1.1	Systemtechnische Beschreibung.....	38
	Dampfkraftwerk 38; Gas- und Dampfturbinenkraftwerk 39	

1.4.1.2	Ökologische und ökonomische Analyse.....	39
	Referenzanlagen 39; Ökologische Analyse 39 (Lebenszyklusanalyse 40, Weitere Umwelteffekte 40); Ökonomische Analyse 42 (Investitionen 42, Betriebskosten 42, Stromgestehungskosten 43)	
1.4.2	Bereitstellung thermischer Energie.....	43
1.4.2.1	Systemtechnische Beschreibung.....	44
	Heizkessel und Brenner 44 (Niedertemperaturkessel 44, Brennwertkessel 44, Gasbrenner ohne Gebläse 45, Gasbrenner mit Gebläse 45, Ölbrenner mit Gebläse 45); Brennstoffversorgung/-lagerung 45; Warmwasserbereitung 45	
1.4.2.2	Ökologische und ökonomische Analyse	46
	Referenzanlagen 46; Ökologische Analyse 47 (Lebenszyklusanalyse 47, Weitere Umwelteffekte 49); Ökonomische Analyse 50 (Investitionen 50, Betriebskosten 51, Wärmegestehungskosten 51)	
1.4.3	Bereitstellung von Kraftstoffen	53
1.4.3.1	Systemtechnische Beschreibung.....	54
	Ottokraftstoffe und Mineralöldiesel 54; Erdgas 54	
1.4.3.2	Ökologische und ökonomische Analyse.....	55
	Referenzanlagen 55, Ökologische Analyse 55 (Lebenszyklusanalyse 55, Weitere Umwelteffekte 56); Ökonomische Analyse 56	
2	Stromerzeugung aus Wasserkraft.....	59
2.1	Grundlagen des regenerativen Energieangebots	59
2.1.1	Grundlagen des Wasserangebots	59
	Niederschlag 60; Vom Niederschlag zum Abfluss 60	
2.1.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik.....	61
	Niederschlagsverteilung 61; Flusssysteme 62; Abflussverhalten 63	
2.2	Systemtechnische Beschreibung	64
2.2.1	Grundlagen der Energiewandlung	65
2.2.2	Systemelemente von Wasserkraftanlagen.....	65
	Staubauwerk 65; Speicher 66; Einlaufbauwerk 66; Triebwasser-/Druckrohrleitung 67; Turbine 67; Auslauf 70; Wellenkupplung und Getriebe 70; Generator 70; Regelung 70; Netzanbindung 71	
2.2.3	Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche.....	71
	Anlagenkonzepte 71; Anwendungsbereiche 72	
2.2.4	Energiewandlungskette, Verluste und Leistungskennlinie	72
	Energiewandlungskette und Verluste 72; Leistungskennlinie 74	
2.3	Ökologische und ökonomische Analyse	75
2.3.1	Referenzanlagen	75
2.3.2	Ökologische Analyse	79
	2.3.2.1 Lebenszyklusanalyse	79

2.3.2.2	Weitere Umwelteffekte.....	82
	Herstellung 83; Normalbetrieb 83; Störfall 86; Stilllegung 86	
2.3.3	Ökonomische Analyse.....	87
	Investitionen 87; Betriebskosten 88; Stromgestehungskosten 88	
2.4	Potenziale und Nutzung.....	90
2.4.1	Potenziale.....	90
	Theoretisches Potenzial 91; Technisches Angebotspotenzial 91; Technisches Nachfragepotenzial 92	
2.4.2	Nutzung.....	93
3	Passive Sonnenenergienutzung.....	95
3.1	Grundlagen des regenerativen Energieangebots.....	95
3.1.1	Grundlagen des solaren Strahlungsangebots.....	95
	Optische Fenster 95; Strahlungsschwächung 95; Strahlungsarten 96	
3.1.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik.....	97
	Räumliche Strahlungsverteilung 97; Zeitliche Abhängigkeit 97	
3.2	Systemtechnische Beschreibung.....	100
3.2.1	Grundlagen der Energiewandlung.....	101
3.2.2	Definitionen.....	102
	Begriffe 102; Kennzahlen 102 (Transmissionskoeffizient 102, Sekundäre Wärmeabgabe 102, Energiedurchlassgrad (g -Wert) 103, Diffuser Energiedurchlassgrad (diffuser g -Wert) 103, Wärmedurchgangskoeffizient (U -Wert) 103, Äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient (äquivalenter U -Wert) 103, Transmissions- und Lüftungsverluste 104)	
3.2.3	Systemelemente.....	104
	Transparente Abdeckungen 104; Verschattungseinrichtungen 107; Absorber und Speicher 109	
3.2.4	Funktionale Systeme.....	112
	Direktgewinnsysteme 112; Indirekte Gewinnsysteme 113; Abgekoppelte Systeme 114; Wintergärten 115	
3.3	Potenziale und Nutzung.....	117
3.3.1	Potenziale.....	118
3.3.2	Nutzung.....	118
4	Solarthermische Wärmenutzung.....	119
4.1	Grundlagen des regenerativen Energieangebots.....	119
4.2	Systemtechnische Beschreibung.....	119
4.2.1	Grundlagen der Energiewandlung.....	119

4.2.2	Systemelemente solarthermischer Anlagen	120
	Kollektoraufbau 120 (Absorber 120, Abdeckung 121, Gehäuse 121); Kollektorbauarten 122 (Schwimmbadabsorber 122, Flachkollektor 122, Vakuum-Röhrenkollektoren 123, Heat-pipe Kollektor 123, Luftkollektoren 123, Konzentrierende Kollektoren 123); Kollektorverschaltung 124; Montage 125; Speicher 125 (Wasserspeicher 125, Feststoffspeicher 126, Latentwärmespeicher 126, Speicherdauer 127); Wärmeträgermedium 127; Leitungen 127; Wärmeträger 128; Pumpen 128; Mess- und Regeleinrichtungen 128	
4.2.3	Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche.....	128
	Solare Freibadbeheizung 130; Trinkwarmwassererwärmung 130; Raumwärmeunterstützung 132; Nahwärmesysteme 134; Sonstige Anwendungen 135	
4.2.4	Energiewandlungskette, Verluste und Leistungskennlinie.....	135
	Energiewandlungskette und Verluste 135; Kennlinien 138	
4.3	Ökologische und ökonomische Analyse	139
4.3.1	Referenzanlagen	140
4.3.2	Ökologische Analyse	142
4.3.2.1	Lebenszyklusanalyse	143
	Bilanzen der solarthermischen Wärmenutzung 143; Bilanzen des Versorgungssystems 145	
4.3.2.2	Weitere Umwelteffekte	150
	Herstellung 150; Normalbetrieb 150; Störfall 151; Stilllegung 151	
4.3.3	Ökonomische Analyse.....	151
	Investitionen 152; Betriebskosten 154; Wärmegestehungskosten 154 (Solarthermische Wärmebereitstellung 155, Solarthermische/fossile Wärmebereitstellung 155)	
4.4	Potenziale und Nutzung	158
4.4.1	Potenziale.....	158
	Theoretisches Potenzial 158; Technisches Angebotspotenzial 158; Technisches Nachfragepotenzial 160 (Trinkwarmwasser 160, Raumwärme 161, Prozesswärme 161, Summe 162)	
4.4.2	Nutzung	162
5	Photovoltaische Stromerzeugung.....	163
5.1	Grundlagen des regenerativen Energieangebots	163
5.2	Systemtechnische Beschreibung	163
5.2.1	Grundlagen der Energiewandlung	163
	Bändermodell 164; Materialien 164; Eigenleitung 164; Störstellenleitung 165; Photoeffekt 165; p-n-Übergang 165; Photovoltaischer Effekt 166	
5.2.2	Systemelemente von Photovoltaikanlagen	166
	Aufbau einer Photovoltaikzelle 167; Kennlinie 167; Zellentypen 168; Solarmodul 170; Wechselrichter 171; Aufständigung 172; Sonstige Komponenten 172	

5.2.3	Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche.....	173
	Inselsysteme 173; Netzgekoppelte Anlagen 174	
5.2.4	Energiewandlungskette, Verluste und Leistungskennlinie	175
	Energiewandlungskette und Verluste 175; Leistungskennlinie 177	
5.3	Ökologische und ökonomische Analyse	177
5.3.1	Referenzanlagen	177
5.3.2	Ökologische Analyse	179
	5.3.2.1 Lebenszyklusanalyse	179
	5.3.2.2 Weitere Umwelteffekte.....	183
	Herstellung 183; Normalbetrieb 184; Störfall 185; Stilllegung 185	
5.3.3	Ökonomische Analyse.....	186
	Investitionen 186; Betriebskosten 186; Stromgestehungskosten 186	
5.4	Potenziale und Nutzung	188
5.4.1	Potenziale.....	188
	Theoretisches Potenzial 188; Technisches Angebotspotenzial 188; Technisches Nachfragepotenzial 191	
5.4.2	Nutzung	194
6	Stromerzeugung aus Windenergie.....	197
6.1	Grundlagen des regenerativen Energieangebots	197
6.1.1	Grundlagen der Windentstehung	197
	Mechanismen 197; Globale Luftzirkulationssysteme 198; Lokale Luftzirkulationssysteme 198; Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit 199	
6.1.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik.....	199
	Räumliche Windverteilung 199; Zeitliche Abhängigkeit 201; Häufigkeitsverteilung 202	
6.2	Systemtechnische Beschreibung	204
6.2.1	Grundlagen der Energiewandlung	204
6.2.2	Systemelemente von Horizontalachsenkonvertern	205
	Rotor 205 (Rotorblätter 206, Rotornabe 207, Blattverstellmechanismus 207); Getriebe 207; Generator 207; Windrichtungsnachführung 207; Gondel 207; Turm 207; Fundament 208; Netzanschluss 208	
6.2.3	Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche.....	209
	Anlagenkonzepte 209; Anwendungsbereiche 209	
6.2.4	Energiewandlungskette, Verluste und Leistungskennlinie	210
	Energiewandlungskette und Verluste 210; Leistungskennlinie 212	
6.2.5	Systemintegrationsaspekte.....	213
	Regionale Konzentration 214; Vorhersage der Windstromerzeugung 214; Integrationsmaßnahmen 214	
6.3	Ökologische und ökonomische Analyse	215
6.3.1	Referenzanlagen	215

6.3.2	Ökologische Analyse.....	217
6.3.2.1	Lebenszyklusanalyse.....	217
6.3.2.2	Weitere Umwelteffekte.....	219
	Herstellung 219; Normalbetrieb 220 (Hörschall 220, Infrarotschall 220, Schattenwurf 221, Reflexionen 221, Beleuchtung 221, Eiswurf 221, Landschaftsbild 222, Abiotische Naturgüter, Pflanzen und Biotope 222, Vogelwelt 223, Weitere Auswirkungen auf die Tierwelt 223); Störfall 223; Stilllegung 224	
6.3.3	Ökonomische Analyse.....	224
	Investitionen 224; Betriebskosten 225; Stromgestehungskosten 225	
6.4	Potenziale und Nutzung.....	227
6.4.1	Potenziale.....	227
	Theoretisches Potenzial 227; Technisches Angebotspotenzial 227; Technisches Nachfragepotenzial 229	
6.4.2	Nutzung.....	231
7	Nutzung von Umgebungswärme.....	233
7.1	Grundlagen des regenerativen Energieangebots.....	234
7.1.1	Entstehung.....	234
7.1.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik.....	234
	Räumliche Verteilung 234; Zeitliche Abhängigkeit 235	
7.2	Systemtechnische Beschreibung.....	238
7.2.1	Grundlagen der Energiewandlung.....	238
7.2.2	Systemelemente von Wärmepumpenanlagen.....	239
	Wärmepumpe 240 (Kompressionswärmepumpe 240, Absorptionswärmepumpe 241, Technische Umsetzung 242); Wärmequellenanlage für Erdreich 243 (Horizontal verlegte Erdreichwärmeübertrager 243, Vertikal verlegte Erdreichwärmeübertrager 244); Wärmequellenanlage für Grundwasser 247; Wärmequellenanlage für Oberflächenwasser 248; Wärmequellenanlage für Außenluft 249; Wärmespeicher 249; Regelung 249	
7.2.3	Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche.....	250
	Anlagenkonzepte 250; Anwendungsbereiche 251 (Raumwärme 251, Trinkwarmwasser 252, Raumwärme und Trinkwarmwasser 252, Weitere Nutzungsmöglichkeiten 253)	
7.2.4	Energiewandlungskette, Verluste und Leistungskennlinie.....	253
	Energiewandlungskette und Verluste 253; Kennlinien 254	
7.3	Ökonomische und ökologische Analyse.....	255
7.3.1	Referenzanlagen.....	255
	Erdkollektor mit Solekreislauf 256; Erdkollektor mit Direktverdampfung 256; Erdsonde mit Solekreislauf 257; Grundwassersonde 257; Außenluft Wasser ohne/mit Luftvorwärmung 257; Außenluft Luft mit Luftvorwärmung 257	

7.3.2	Ökologische Analyse	258
7.3.2.1	Lebenszyklusanalyse	258
	Monovalente Wärmepumpensysteme 258; Wärmepumpensysteme in Kombination mit solarthermischen Anlagen 263	
7.3.2.2	Weitere Umwelteffekte.....	265
	Herstellung 265; Normalbetrieb 266 (Umweltwirkungen von Wärmepumpen-Arbeitsmitteln 266, Thermische Auswirkungen auf Boden, Grundwasser und Atmosphäre 267, Hydraulische Veränderungen im Untergrund durch Grundwasserentnahme 268, Lärmwirkungen 268, Umwelteinflüsse durch Bohrungen 268, Gesundheitsgefährdung durch Legionellenbildung 268); Störfall 269; Stilllegung 269	
7.3.3	Ökonomische Analyse.....	270
	Investitionen 270; Betriebskosten 274; Wärmegestehungskosten 275	
7.4	Potenziale und Nutzung	276
7.4.1	Potenziale.....	276
	Theoretisches Potenzial 276; Technisches Angebotspotenzial 277; Technisches Nachfragepotenzial 277 (Trinkwarmwasser 278, Raumwärme 278, Prozesswärme 279, Summe 280)	
7.4.2	Nutzung	280
8	Nutzung der tiefen Erdwärme.....	283
8.1	Grundlagen des regenerativen Energieangebots	284
8.1.1	Grundlagen der Erdwärmeentstehung	284
	Erdaufbau 284; Temperaturgradient 284; Wärmehaushalt der Erde 285; Geothermische Systeme und Ressourcen 285	
8.1.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik.....	286
	Räumliche Verteilung 286; Zeitliche Abhängigkeit 287	
8.2	Systemtechnische Beschreibung	288
8.2.1	Grundlagen der Energiewandlung	288
8.2.2	Aufschluss des Untergrunds	289
	Bohrtechnischer Aufschluss und Komplettierung 289; Test und Modellierung 290; Stimulation 291; Gestaltung des Untertageteils 292; Förderung 293	
8.2.3	Übertägige Komponenten.....	293
	Komponenten von geothermischen Heizwerken 293 (Thermalwassertransport 294, Wärmeübertrager 294, Filter 295, Slop-system 295, Leckageüberwachung 296, Inertgasbeaufschlagungssystem 296); Zusätzliche Komponenten für KWK-Anlagen 296 (Rankine-Prozess mit organischen Arbeitsmitteln 296, Kalina-Prozess 297); Weitere Systemelemente 299 (Nah-/Fernwärmenetz 299, Spitzenlastbereitstellung 300, Blockheizkraftwerk (BHKW) 300, Wärmepumpe 301)	

8.2.4	Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche.....	302
	Anlagenkonzepte 302 (Wärmebereitstellungskonzepte 302, Strom- und Wärmebereitstellungskonzepte 303); Anwendungsbereiche 303	
8.2.5	Energiewandlungskette und Verluste	304
8.3	Ökologische und ökonomische Analyse	305
8.3.1	Wärme	305
8.3.1.1	Referenzanlagen	306
	Nahwärmesystem NW-II 307; Nahwärmesystem NW-III 307	
8.3.1.2	Ökologische Analyse.....	308
	Lebenszyklusanalyse "Geothermische Wärmenutzung" 308; Lebenszyklusanalyse "Versorgungssystem" 312; Weitere Umwelteffekte 315 (Herstellung 315, Normalbetrieb 317, Störfall 318, Stilllegung 319)	
8.3.1.3	Ökonomische Analyse.....	319
	Investitionen 319; Betriebskosten 321; Wärmegebungskosten 321	
8.3.2	Wärme und Strom.....	323
8.3.2.1	Referenzanlagen	323
8.3.2.2	Ökologische Analyse.....	324
	Lebenszyklusanalyse 324; Weitere Umwelteffekte 327 (Normalbetrieb 327, Störfall 328)	
8.3.2.3	Ökonomische Analyse.....	328
	Investitionen 328; Betriebskosten 329; Stromgebungskosten 330	
8.4	Potenziale und Nutzung	331
8.4.1	Potenziale.....	332
8.4.1.1	Wärmebereitstellung.....	332
	Theoretisches Potenzial 332; Technisches Angebotspotenzial 333; Technisches Nachfragepotenzial 333	
8.4.1.2	Strombereitstellung.....	334
	Theoretisches Potenzial 334; Technisches Angebotspotenzial 334; Technisches Nachfragepotenzial 335	
8.4.2	Nutzung	336
9	Energie aus Biomasse	339
9.1	Grundlagen des regenerativen Energieangebots	340
9.1.1	Biomasseentstehung	340
	Photosynthese 340; Pflanzenaufbau 341; Einflussgrößen auf die Pflanzenproduktion 341 (Strahlung 342, Wasser 342, Temperatur 342, Boden und Nährstoffe 343, Pflanzenbauliche Maßnahmen 343)	
9.1.2	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik.....	343
	Räumliche Angebotscharakteristik 343; Zeitliche Angebotscharakteristik 343	

9.2	Systemtechnische Beschreibung	345
9.2.1	Biomassebereitstellung	346
9.2.2	Thermo-chemische Umwandlung	348
9.2.2.1	Grundlagen der Energiewandlung	348
9.2.2.2	Biogene Festbrennstoffe	350
	Hackgut 352; Pellets 356; Scheite 357; Halmgutbal- len 357	
9.2.2.3	Verbrennung – Systemelemente	358
	Brennstofflager 358; Lagerein- und -austrag 359 (Hack- gut 359, Pellets 361, Halmgüter 361); Feuerungsanlagen 361 (Handbeschickte Feuerungsanlagen 362, Automa- tisch beschickte Feuerungsanlagen 367); Kessel 374; Stromerzeugung 375 (Dampfmotoren 376, Dampfturbin- en 376, ORC-Prozesse 377, Stirling-Motoren 377, Zu- fernung 378); Emissionsminderung 378 (Entstaubung 378, Entstickung 381, HCl-Reduzierung 381); Asche- verwertung 382; Weitere Systemelemente 382 (Warm- wasserbereitung 383, Wärmespeicher 383, Spitzenlast- abdeckung 383, Wärmerückgewinnung 384, Nahwärme- systeme 386)	
9.2.2.4	Verbrennung – Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche	387
	Kleinfeuerungsanlage 387; Biomasseheizwerk/Nahwär- mesystem 387; Industrielle Biomassefeuerung 389; Kraft-Wärme-Kopplung 390; Nutzung von Biomasse mit fossilen Energieträgern 391	
9.2.2.5	Verbrennung – Energiewandlungskette und Verluste	393
9.2.2.6	Vergasung – Systemelemente	394
	Bereitstellung 395; Vergasungstechnik 395 (Festbettver- fahren 396, Wirbelschichtverfahren 396, Sonderverfah- ren 398); Gasreinigungstechniken 398 (Kaltgasreinigung 399, Heißgasreinigung 399); Gasnutzungsmöglichkeiten 400 (Wärmebereitstellung 400, Stromerzeugung 400, Kraftstofferzeugung 401)	
9.2.2.7	Vergasung – Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche	403
	Nahwärmebereitstellung 403; Biomassevergasung zur Stromerzeugung 403; Bereitstellung flüssiger Kraftstof- fe 404; Bereitstellung gasförmiger Kraftstoffe 405	
9.2.2.8	Vergasung – Energiewandlungskette und Verluste	406
9.2.3	Physikalisch-chemische Umwandlung	407
9.2.3.1	Grundlagen der Energiewandlung	408
9.2.3.2	Ölsaaten	409
9.2.3.3	Systemelemente	409
	Ölgewinnung 410; Ölraffination 411; Umesterung 413; Nebenprodukte und Rückstände 413 (Stroh 414, Press- kuchen und Extraktionsschrot 414, Glycerin 415); Nut- zung als Kraftstoff 415 (Naturbelassenes Pflanzenöl	

	415, Mischkraftstoff 416, Pflanzenölkraftstoff aus Mineralölraffinerien 417, Pflanzenölmethylester 417); Nutzung als Brennstoff 417	
9.2.3.4	Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche.....	418
9.2.3.5	Energiewandlungskette und Verluste	418
9.2.4	Bio-chemische Umwandlung.....	420
9.2.4.1	Grundlagen der Energiewandlung	420
	Alkoholische Gärung 420; Anaerober Abbau 421	
9.2.4.2	Bioethanol – Ausgangsstoffe.....	424
9.2.4.3	Bioethanol – Systemelemente.....	425
	Substratvorbereitung 426; Fermentation 427; Destillation, Rektifikation und Absolutierung 427; Ethanol als Kraftstoff 429; Nebenprodukte und Rückstände 431 (Flüssiges Futtermittel 431, Festes Futtermittel 431, Düngemittel 432, Energiegewinnung 432)	
9.2.4.4	Bioethanol – Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche	432
	Ethanolproduktion im kleinen Maßstab 432; Großtechnische Ethanolproduktion aus stärkehaltigen Rohstoffen 432	
9.2.4.5	Bioethanol – Energiewandlungskette und Verluste.....	433
9.2.4.6	Biogas – Substrate	435
9.2.4.7	Biogas – Systemelemente	435
	Substrathandling 437; Biogasgewinnung im Fermenter 438; Gärrestlagerung, -aufbereitung und -ausbringung 440; Biogasspeicherung und -aufbereitung 440; Biogasverwertung 441	
9.2.4.8	Biogas – Anlagenkonzepte und Anwendungsbereiche	442
	Landwirtschaftliche Substrate 442; Kommunalabfälle 442; Organisch belastete Abwässer 443	
9.2.4.9	Biogas – Energiewandlungskette und Verluste	444
9.3	Ökologische und ökonomische Analyse	445
9.3.1	Wärme	446
9.3.1.1	Referenzanlagen	446
	Kleinanlagen 446; Nahwärmesysteme 448	
9.3.1.2	Ökologische Analyse.....	449
	Lebenszyklusanalyse 449 (Kleinanlagen 450, Nahwärmesysteme 453); Weitere Umwelteffekte 458 (Biomassebereitstellung 458, Herstellung 459, Normalbetrieb 459, Störfall 462, Stilllegung 463)	
9.3.1.3	Ökonomische Analyse	463
	Kleinanlagen 463 (Investitionen 463, Betriebskosten 465, Wärmegestehungskosten 465); Nahwärmesysteme 467 (Investitionen 467, Betriebskosten 467, Wärmegestehungskosten 468)	
9.3.2	Wärme und Strom.....	470

9.3.2.1	Referenzanlagen	471
	Heizkraftwerke 471; Biogasanlagen 472	
9.3.2.2	Ökologische Analyse.....	474
	Lebenszyklusanalyse 474 (Heizkraftwerke 474, Biogasanlagen 476); Weitere Umwelteffekte 478 (Herstellung 479, Normalbetrieb 479, Störfall 480, Stilllegung 480)	
9.3.2.3	Ökonomische Analyse.....	480
	Heizkraftwerke 480 (Investitionen 480, Betriebskosten 480, Stromgestehungskosten 481); Biogasanlagen 482 (Investitionen 482, Betriebskosten 483, Stromgestehungskosten 483)	
9.3.3	Kraftstoffe.....	484
9.3.3.1	Referenzanlagen	485
	Rapsölmethylester 485; Bioethanol 485; Fischer-Tropsch(FT)-Diesel 486; Biomethan aus thermo-chemischen Prozessen 486; Biomethan aus bio-chemischen Prozessen 487	
9.3.3.2	Ökologische Analyse.....	487
	Lebenszyklusanalyse 487 (Rapsölmethylester 487, Bioethanol 489, Fischer-Tropsch(FT)-Diesel 491, Biomethan aus thermo-chemischen Prozessen 492, Biomethan aus bio-chemischen Prozessen 494); Weitere Umwelteffekte 496 (Herstellung 496, Normalbetrieb 496, Störfall 497, Stilllegung 499)	
9.3.3.3	Ökonomische Analyse.....	499
	Rapsölmethylester 499 (Investitionen 499, Betriebskosten 500, Kraftstoffgestehungskosten 500, Kosten pro Fahrzeugkilometer 500); Bioethanol 500 (Investitionen 501, Betriebskosten 501, Kraftstoffgestehungskosten 501, Kosten pro Fahrzeugkilometer 502); Fischer-Tropsch(FT)-Diesel 502 (Investitionen 503, Betriebskosten 503, Kraftstoffgestehungskosten 503, Kosten pro Fahrzeugkilometer 503); Biomethan aus thermo-chemischen Prozessen 503 (Investitionen 504, Betriebskosten 504, Kraftstoffgestehungskosten 505, Kosten pro Fahrzeugkilometer 505); Biomethan aus bio-chemischen Prozessen 506 (Investitionen 506, Betriebskosten 506, Kraftstoffgestehungskosten 506, Kosten pro Fahrzeugkilometer 507)	
9.4	Potenziale und Nutzung	508
9.4.1	Potenziale.....	508
9.4.1.1	Theoretisches Potenzial	508
9.4.1.2	Technisches Angebotspotenzial.....	509
	Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle 511 (Forstwirtschaftliche Stoffströme 511, Landwirtschaftliche Stoffströme 513, Sonstige Stoffströme 516); Energiepflanzen 519 (Festbrennstoffe 520, Kraftstoffe 521, Biogas 522); Gesamtpotenzial 522	
9.4.1.3	Technisches Nachfragepotenzial	525
	Biogene Festbrennstoffe 525; Biokraftstoffe 525; Biogas 525; Zusammenfassung 526	

9.4.2	Nutzung	527
9.4.2.1	Festbrennstoffe	527
9.4.2.2	Kraftstoffe.....	530
9.4.2.3	Biogas	532
10	Zusammenfassender Vergleich und Ausblick.....	533
10.1	Räumliche und zeitliche Angebotscharakteristik	533
	Räumliche Angebotsvariationen 533 (Wasserkraft 533, Solarenergie 533, Windkraft 534, Umgebungswärme 534, Tiefe Erdwärme 534, Biomasse 535); Zeitliche Angebotsvariationen 535 (Wasserkraft 535, Solarenergie 536, Windkraft 536, Umgebungswärme 536, Tiefe Erdwärme 537, Biomasse 537)	
10.2	Technische Analyse	537
10.2.1	Bereitstellung elektrischer Energie	537
	Stromerzeugungscharakteristiken 537; Anlagenleistungen 539; Wirkungs- und Systemnutzungsgrade 541; Volllaststunden 542	
10.2.2	Bereitstellung thermischer Energie.....	543
	Wärmeerzeugungscharakteristik/Volllaststunden 543; Anlagenleistungen 543; Wirkungs- und Systemnutzungsgrade 544	
10.2.3	Bereitstellung von Kraftstoffen	545
10.3	Ökologische und ökonomische Analyse	545
10.3.1	Bereitstellung elektrischer Energie	546
10.3.1.1	Referenzanlagen	546
10.3.1.2	Ökologische Analyse.....	548
10.3.1.3	Ökonomische Analyse.....	551
10.3.1.4	Ökologische/ökonomische Analyse.....	556
10.3.2	Bereitstellung thermischer Energie.....	558
10.3.2.1	Referenzanlagen	558
10.3.2.2	Ökologische Analyse.....	560
10.3.2.3	Ökonomische Analyse.....	568
10.3.2.4	Ökologische/ökonomische Analyse.....	574
10.3.3	Bereitstellung von Kraftstoffen	576
10.3.3.1	Referenzanlagen	576
10.3.3.2	Ökologische Analyse.....	577
10.3.3.3	Ökonomische Analyse.....	580
10.3.3.4	Ökologische/ökonomische Analyse.....	581
10.4	Potenziale und Nutzung	582
10.4.1	Bereitstellung elektrischer Energie.....	582
10.4.1.1	Theoretisches Potenzial	583
10.4.1.2	Technisches Potenzial.....	584
	Technisches Angebotspotenzial 584; Technisches Nachfragepotenzial 585	
10.4.1.3	Nutzung	586
10.4.2	Bereitstellung thermischer Energie.....	587
10.4.2.1	Theoretisches Potenzial	587

10.4.2.2	Technisches Potenzial.....	588
	Technisches Angebotspotenzial 588; Technisches Nachfragepotenzial 589	
10.4.2.3	Nutzung	590
10.4.3	Bereitstellung von Kraftstoffen	591
10.4.3.1	Theoretisches Potenzial	591
10.4.3.2	Technisches Potenzial.....	592
	- Technisches Angebotspotenzial 592; Technisches Nachfragepotenzial 592	
10.4.3.3	Nutzung	592
10.4.4	Gesamthafte Potenzialbetrachtung	592
10.4.4.1	Technisches Angebotspotenzial.....	593
10.4.4.2	Technisches Nachfragepotenzial	595
10.5	Szenarienanalyse.....	596
10.5.1	Szenariendefinition.....	597
10.5.2	Bereitstellung elektrischer Energie.....	597
	Einzelbetrachtung 597 (Stromerzeugung aus Wasserkraft 597, Photovoltaische Stromerzeugung 599, Stromerzeugung aus Windenergie 600, Geothermische Stromerzeugung 600, Stromerzeugung aus Biomasse 601); Systembetrachtung 601;	
10.5.3	Bereitstellung thermischer Energie.....	603
	Einzelbetrachtung 603 (Solarthermische Warmegewinnung 603, Warmegewinnung mit Warmepumpen (Umgebungswärme) 604, Geothermische Warmegewinnung 605, Warmegewinnung aus Biomasse 606); Systembetrachtung 606	
10.5.4	Bereitstellung von Kraftstoffen	608
	Einzelbetrachtung 608; Systembetrachtung 610	
10.5.5	Gesamtes Energiesystem	611
Literatur		617
Sachwortverzeichnis		635