

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
	M. Kaltschmitt	
1.1	Prinzipielle Vorgehensweise .....	2
1.2	Definition der wesentlichen Grundbegriffe .....	4
1.3	Darstellung des Untersuchungsgebietes .....	8
1.4	Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen .....	11
1.4.1	Struktur des Energieverbrauchs .....	12
1.4.2	Gegenwärtiges Energieträgerpreinsniveaus .....	15
<b>2</b>	<b>Solarthermische und photovoltaische Nutzung der Sonnenenergie</b> .....	<b>19</b>
	A. Wiese, M. Kaltschmitt	
2.1	Solares Strahlungsangebot .....	19
2.1.1	Theoretische Grundlagen .....	20
2.1.2	Räumliche und zeitliche Variationsbreite .....	21
2.2	Technische Flächenpotentiale .....	24
2.2.1	Potentialbestimmung auf Gebäuden .....	25
	Verfügbare Dachflächen (25); Restriktionen einer solartechnischen Nutzung (29); Solartechnisch nutzbare Dachflächenpotentiale (30)	
2.2.2	Bestimmung der solartechnischen Freiflächenpotentiale .....	32
	Potentiell verfügbare Flächen (32); Restriktionen einer solartechnischen Nutzung (33); Solartechnisch nutzbare Freiflächenpotentiale (34)	
2.3	Solare Energieerzeugung .....	35
2.3.1	Thermische Niedertemperaturwärmegewinnung .....	36
	Theoretische Grundlagen (36); Restriktionen einer solarthermischen Nutzung (38); Technische Endenergiepotentiale (40); Derzeitige Nutzung (51)	
2.3.2	Photovoltaische Stromerzeugung .....	52
	Theoretische Grundlagen (52); Technische Erzeugungspotentiale (54); Technische Endenergiepotentiale (57); Derzeitige Nutzung (62)	
2.4	Kosten einer solaren Energieerzeugung .....	64
2.4.1	Solarthermische Wärmegewinnung .....	64
	Systemkosten (64); Spezifische Energiebereitstellungskosten (66)	

2.4.2 Photovoltaische Stromerzeugung ..... 68  
 Systemkosten (68); Spezifische Stromgestehungskosten (70)

**Nutzung der Windenergie ..... 73**  
 M. Kaltschmitt, A. Wiese

3.1 Windtechnisches Energieangebot ..... 73  
 3.1.1 Charakteristische Eigenschaften des Windangebots ..... 74  
 3.1.2 Windgeschwindigkeitsverteilung innerhalb Deutschlands ..... 78  
 3.2 Windtechnisch nutzbare Flächenpotentiale ..... 80  
 3.2.1 Vorgehensweise zur Flächenbestimmung ..... 80  
 3.2.2 Flächenpotentiale gleicher mittlerer Windgeschwindigkeit ..... 81  
 3.2.3 Potentialmindernde Kriterien und restriktive Parameter ..... 82  
 3.2.4 Technisch nutzbare Flächenpotentiale ..... 86  
 3.3 Stromerzeugung aus Windenergie ..... 87  
 3.3.1 Theoretische und technische Grundlagen ..... 88  
 3.3.2 Nutzungstechniken und korrespondierender Flächenbedarf ..... 92  
 3.3.3 Technische Stromerzeugungspotentiale ..... 94  
 3.3.4 Technische Endenergiepotentiale ..... 97  
 Ansatz I (98); Ansatz II (99); Ansatz III (99); Ansatz IV (99); Vergleich der Ansätze (100)  
 3.3.5 Derzeitige Nutzung ..... 101  
 3.4 Kosten der Windstromerzeugung ..... 102  
 3.4.1 Systemkosten ..... 102  
 3.4.2 Spezifische Stromgestehungskosten ..... 104

**Stromerzeugung aus Wasserkraft ..... 107**  
 H.-B. Horlacher, A. Thewalt

4.1 Allgemeine Grundlagen ..... 108  
 4.1.1 Energieangebot des Wassers ..... 108  
 4.1.2 Technische Grundlagen ..... 111  
 Laufwasserkraftwerke (111); Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke (114);  
 Nieder-, Mittel- und Hochdruckanlagen (114); Turbinentypen (115)  
 4.2 Potentiale einer Stromerzeugung ..... 117  
 4.2.1 Grundlegende Definitionen ..... 117  
 Leistung und Arbeitsvermögen (117); Potentialbegriffe (118)  
 4.2.2 Technische Erzeugungspotentiale ..... 119  
 Technisches Erzeugungspotential in den alten Bundesländern (119); Technisches Erzeugungspotential in den neuen Bundesländern (121); Technische Endenergiepotentiale (122)

4.2.3	Derzeitige Nutzung . . . . .	122
	Regionale Nutzungsunterschiede (122); Zukünftiger Ausbau der Wasserkraft (123)	
4.3	Kosten einer Stromerzeugung aus Wasserkraft . . . . .	124
4.3.1	Systemkosten . . . . .	124
	Investitionen (124); Betriebs- und Unterhaltskosten (127)	
4.3.2	Spezifische Stromgestehungskosten . . . . .	127
<b>5</b>	<b>Energieträgerproduktion auf pflanzlicher Basis . . . . .</b>	<b>129</b>
	M. Kaltschmitt	
5.1	Allgemeine Grundlagen . . . . .	129
5.1.1	Begriffsdefinitionen und prinzipielle Möglichkeiten . . . . .	130
	Biomasse als Festbrennstoff (130); Flüssige Energieträger aus pflanzlichen Rohstoffen (131)	
5.1.2	Flächenpotentiale für einen Energiepflanzenanbau . . . . .	132
5.2	Gewinnbares Energieträgeraufkommen . . . . .	133
5.2.1	Feste Energieträger . . . . .	134
	Getreideanbau zur Ganzpflanzennutzung (134); Anbau von Schilf- und Graspflanzen (136); Anbau schnellwachsender Baumarten (141); Vergleich des Biomasseaufkommens (142)	
5.2.2	Flüssige Energieträger . . . . .	143
	Ölfruchtanbau zur Pflanzenölgewinnung (143); Getreide- und Zuckerrübenanbau zur Alkoholerzeugung (145); Vergleich des Energieträger- und Biomasseaufkommens (148)	
5.3	Technische Energiepotentiale . . . . .	149
5.3.1	Feste Energieträger . . . . .	149
	Getreideanbau zur Ganzpflanzennutzung (149); Anbau von Schilf- und Graspflanzen (151); Anbau schnellwachsender Baumarten (153); Vergleich der Energiepotentiale (154); Derzeitige Nutzung (155)	
5.3.2	Flüssige Energieträger . . . . .	156
	Ölfruchtanbau zur Pflanzenölgewinnung (156); Getreide- und Zuckerrübenanbau zur Alkoholerzeugung (157); Vergleich der Energiepotentiale (160); Derzeitige Nutzung (161)	
5.4	Kosten einer energetischen Nutzung von Energiepflanzen . . . . .	162
5.4.1	Energieträgerkosten fester Energieträger . . . . .	162
	Getreideanbau zur Ganzpflanzennutzung (162); Anbau von Schilf- und Graspflanzen (164); Anbau schnellwachsender Baumarten (165); Vergleich der Energieträgerkosten (167);	
5.4.2	Nutzenergiebereitstellungskosten fester Energieträger . . . . .	167
	Getreideanbau zur Ganzpflanzennutzung (167); Anbau von Schilf- und Graspflanzen (169); Anbau schnellwachsender Baumarten (170); Vergleich der Nutzenergiebereitstellungskosten (170); Ölfruchtanbau zur Pflanzenölgewinnung (171)	

## Inhaltsverzeichnis

5.4.3	Kosten flüssiger Energieträger	171
	Getreide- und Zuckerrübenanbau zur Alkoholgewinnung (173); Vergleich der Energieträgerkosten (174)	

## **Energetische Nutzung forstwirtschaftlicher Reststoffe** ..... 177

A. Wiese, M. Kaltschmitt

6.1	Allgemeine Grundlagen	177
6.1.1	Anfall von organischen Reststoffen	178
6.1.2	Energetische Eigenschaften	179
6.1.3	Räumliche und zeitliche Variationsbreite	181
6.2	Technisch nutzbares Reststoffaufkommen	183
6.2.1	Prinzipielle Vorgehensweise	183
	Periodisch anfallende Reststoffe (184); Durchforstungsrückstände (185); Erntetechnisch bedingte Reststoffe (185)	
6.2.2	Abschätzung des gesamten Potentials	186
6.2.3	Restriktionen einer technischen Nutzung	187
6.2.4	Energetisch nutzbares Restholzaufkommen	190
6.3	Bestimmung der Energiepotentiale	190
6.3.1	Methodische Vorgehensweise	190
6.3.2	Technische Energiepotentiale	191
6.3.3	Derzeitige Nutzung	193
6.4	Kosten einer energetischen Nutzung	193
6.4.1	Energieträgerkosten	194
	Ansatz I (194); Ansatz II (196); Ansatz III (197)	
6.4.2	Nutzenergiebereitstellungskosten	197

## **Ernterückstände der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion** ..... 201

M. Kaltschmitt

7.1	Allgemeine Grundlagen	201
7.1.1	Eingrenzung des energetisch nutzbaren Reststoffaufkommens	202
7.1.2	Energetische Eigenschaften	203
7.1.3	Räumliche und zeitliche Variationsbreite	204
7.2	Technisch nutzbares Strohaufkommen	207
7.2.1	Prinzipielle Vorgehensweise	207
7.2.2	Darstellung des gesamten Strohaufkommens	209
7.2.3	Restriktionen einer energetischen Nutzung	210
7.2.4	Energetisch nutzbares Strohaufkommen	212
7.3	Bestimmung der Energiepotentiale	213
7.3.1	Methodische Vorgehensweise	214
7.3.2	Technische Energiepotentiale	214
7.3.3	Derzeitige Nutzung	216

7.4	Kosten einer energetischen Nutzung .....	217
7.4.1	Energieträgerkosten .....	217
	Ansatz I (217); Ansatz II (219); Ansatz III (221)	
7.4.2	Nutzenergiebereitstellungskosten .....	222
<b>8</b>	<b>Energetische Nutzung von Reststoffen der Tierhaltung .....</b>	<b>225</b>
	M. Kaltschmitt, A. Wiese	
8.1	Allgemeine Grundlagen .....	225
8.1.1	Zusammensetzung und Eigenschaften von Biogas .....	226
8.1.2	Biochemische Umsetzung der Biomasse .....	227
8.1.3	Einflußfaktoren auf das Gasaufkommen .....	229
8.1.4	Ausgangsstoffe für die Biogaserzeugung .....	230
8.1.5	Nutztierbestand in Deutschland .....	231
8.2	Substrataufkommen und korrespondierender Energieinhalt, .....	234
8.2.1	Vorgehensweise zur Bestimmung des Substrataufkommens .....	234
8.2.2	Aufkommen an organischer Masse .....	235
8.2.3	Vorgehensweise zur Bestimmung des theoretischen Gaspotentials .....	236
8.2.4	Theoretisches Biogasaufkommen .....	237
8.3	Technische Energiepotentiale .....	238
8.3.1	Verfahrenstechnische Umsetzung des Substrats .....	239
8.3.2	Restriktionen einer technischen Nutzung .....	241
8.3.3	Technische Energiepotentiale .....	244
8.3.4	Derzeitige Nutzung .....	248
8.4	Kosten einer Biogaserzeugung .....	249
8.4.1	Biogastehungskosten .....	250
	Kleinanlagen (250); Kleinanlagen (251); Mittlere Anlagen (252); Groß-	
	anlagen (253); Vergleich der Biogastehungskosten (255)	
8.4.2	Nutzenergiebereitstellungskosten .....	256
	Wärmebereitstellungskosten (257); Stromgestehungskosten (258); Kraft-	
	Wärme-Kopplung (259)	
<b>9</b>	<b>Organische Reststoffe aus Haushalten, Industrie, Gewerbe und kommunalen Ein-</b>	
	<b>richtungen .....</b>	<b>263</b>
	A. Wiese, A. Sihler	
9.1	Allgemeine Grundlagen .....	263
9.1.1	Systematik und Abgrenzung .....	263
9.1.2	Energetische Eigenschaften .....	265
9.1.3	Räumliche und zeitliche Variationsbreite .....	266

## Inhaltsverzeichnis

9.2	Technisch nutzbares Aufkommen	269
9.2.1	Vorgehensweise zur Potentialbestimmung Feststoffaufkommen (270); Abwasseraufkommen (272)	269
9.2.2	Restriktionen einer energetischen Nutzung	273
9.2.3	Energetisch nutzbares Reststoffaufkommen	274
9.3	Bestimmung der Energiepotentiale	276
9.3.1	Technische Nutzungsmöglichkeiten Deponiegas (277); Anaerober Abbau organischer Stoffe (279); Klärgas (280)	276
9.3.2	Methodische Vorgehensweise Gas- und Brennstoffenergiepotentiale (281); Deponiegasenergiepotentiale (282)	281
9.3.3	Technische Energiepotentiale	284
9.3.4	Derzeitige Nutzung	286
9.4	Kosten einer energetischen Nutzung	287
9.4.1	Energieträgerkosten Deponiegas (287); Klärgas (288); Sonstiges Biogas (288); Festbrennstoffe (288); Vergleich (288)	287
9.4.2	Strom- und Wärmegestehungskosten	289
<b>Nutzung der Erdwärme</b>		<b>293</b>
R. Schulz, M. Kaltschmitt		
10.1	Allgemeine Grundlagen	294
10.1.1	Die Wärmequellen	294
10.1.2	Klassifikation der geothermischen Energiesysteme Untiefe geothermische Nutzung (295); Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie (295); Hydrothermale Systeme mit hoher Enthalpie (296); Hot-Dry-Rock-Systeme (296); Gegenüberstellung (296)	295
10.1.3	Klassifikation der Nutzungsarten	297
10.2	Geothermische Energiepotentiale	298
10.2.1	Gesamte Vorratsbasis	299
10.2.2	Nutzungstechniken Energie des flachen Untergrunds (300); Energie der warmwasserführenden Aquifere (301); Energie des heißen Gesteins (303)	300
10.2.3	Ressourcen und Reserven Energie der warmwasserführenden Aquifere (305); Energie des flachen Untergrunds (310); Energie des heißen Gesteins (311)	304
10.2.4	Derzeitige Nutzung	312
10.3	Kosten einer geothermischen Energienutzung	314
10.3.1	Stromgestehungskosten	314
10.3.2	Wärmegestehungskosten	315
10.3.3	Beispiele	317

<b>11 Zusammenfassender Vergleich</b> .....	<b>319</b>
M. Kaltschmitt, A. Wiese, J. Frisch	
11.1 Potentiale und Energiebedarf .....	319
11.1.1 Energieangebot der Atmosphäre .....	319
Photovoltaische Stromerzeugung (320); Windtechnische Stromerzeugung (320); Stromerzeugung aus Wasserkraft (321); Vergleich der Stromerzeugungspotentiale (321); Stromerzeugungspotentiale und Stromaufkommen (323); Endenergiepotentiale und Endenergieverbrauch (325)	
11.1.2 Pflanzliche Energieträger .....	328
Erzeugung fester Energieträger (328); Erzeugung flüssiger Energieträger (329); Vergleich der Energiepotentiale (330); Energiepotentiale und Endenergieverbrauch (330)	
11.1.3 Regeneratives Reststoffangebot .....	330
Forstwirtschaftliche Reststoffe (331); Ernterückstände der Pflanzenproduktion (331); Reststoffe der Tierhaltung (331); Sonstige organische Reststoffe (332); Vergleich der Energiepotentiale (332); Energiepotentiale und Endenergieverbrauch (333)	
11.1.4 Sonstige Optionen .....	334
Solare Niedertemperaturwärmegewinnung (334); Nutzung der Erdwärme (335); Energiepotentiale und Endenergieverbrauch (335)	
11.1.5 Gesamtpotentialvergleich .....	336
Variante I (337); Variante II (337); Variante III (338); Vergleich der Varianten (339)	
11.2 Regenerative Energiekosten und Energiepreisniveau .....	339
11.2.1 Energieangebot der Atmosphäre .....	340
11.2.2 Pflanzliche Energieträger .....	341
11.2.3 Regeneratives Reststoffangebot .....	342
11.2.4 Sonstige Optionen .....	342
11.3 Schlußfolgerungen .....	343
 <b>Literatur</b> .....	 <b>349</b>
 <b>Energieeinheiten</b> .....	 <b>361</b>
 <b>Stichwortverzeichnis</b> .....	 <b>363</b>