

IFE Schriftenreihe · Heft 1



Ulrich Wagner

Nutzung regenerativer Energien

Vorlesungsskript

Bearbeitet von:
Christian Heilek

1	EINFÜHRUNG	1
1.1	Grundsätzliche Vorbemerkungen zur Nutzung regenerativer Energie.....	1
1.2	Einteilung der Nutzungssysteme regenerativer Energie	2
1.3	Rahmendaten zum Energiebedarf und seiner Deckung	3
1.3.1	Energiebilanz der Erde	3
1.3.2	Weltweiter Energiebedarf.....	10
1.3.3	Energieverbrauch in Deutschland	13
1.4	Potenziale regenerativer Energien in Deutschland	18
1.4.1	Potenzialbegriffe regenerativer Energien	19
1.4.2	Potenziale verschiedener Energieträger	20
1.4.2.1	Wasserkraft	20
1.4.2.2	Windkraft.....	21
1.4.2.3	Photovoltaik	22
1.4.2.4	Niedertemperaturwärmegewinnung aus Solarstrahlung.....	23
1.4.2.5	Erdwärme	23
1.4.2.6	Holznutzung	25
1.4.2.7	Reststrohnutzung	26
1.4.2.8	Biogaserzeugung	27
1.4.2.9	Energiegewinnung durch Energiepflanzen	28
1.4.2.10	Energetische Müllverwertung	29
1.4.2.11	Gesamte Potenziale.....	29
2	THERMISCHE NUTZUNG DER SOLARENERGIE UND UMWELTWÄRME	31
2.1	Begriffsbestimmungen und Energieangebot	31
2.2	Passive thermische Nutzung der Solarenergie für die Raumheizung	37
2.2.1	Systematische Einteilung der Solarenergiesysteme	37
2.2.2	Energiebilanz von Gebäuden.....	38
2.2.3	Mittel zur passiven Nutzung der Solarenergie	40
2.2.3.1	Fenster als Sonnenkollektoren	40
2.2.3.2	Wirkungsmechanismus transparenter Dämmschichten	42
2.2.3.3	Glasvorbauten	43
2.2.4	Ermittlung des Jahresheizwärmebedarfs.....	45
2.3	Absorber- und Kollektorsysteme	50
2.3.1	Physikalische Grundlagen	50
2.3.2	Systeme der solarthermischen Wärmenutzung	53
2.3.3	Nichtkonzentrierende Systeme	54
2.3.3.1	Absorber.....	54
2.3.3.2	Flachkollektoren.....	56
2.3.3.3	Weitere Bauformen von Solarkollektoren.....	62
2.3.3.4	Kollektorkennlinien	66
2.3.3.5	System für solare Raumheizung und Warmwasserbereitung	68
2.3.4	Konzentrierende Kollektoren	71
2.3.4.1	Parabolrinnenanlagen	73
2.3.4.2	Solarturmanlagen	75
2.3.4.3	Parabolspiegelsysteme (Dish-Systeme)	76
2.3.4.4	Einsatz von thermischen Speichern in solarthermischen Kraftwerken	78
2.4	Wärmepumpen	78
2.4.1	Wärmequellen zur Nutzung der Umgebungswärme.....	78
2.4.2	Funktionsprinzip und Begriffsbestimmungen	84
2.4.3	Betriebsweise.....	89
2.4.4	Primärenergie- und CO ₂ -Bilanz von Wärmepumpen.....	94
2.4.5	Neue Entwicklungen.....	95
2.4.6	System einer solaren Raumheizung mit Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpe	96

3	PHOTOVOLTAIK	99
3.1	Physikalische Grundlagen	99
3.1.1	Bändermodell und innerer photoelektrischer Effekt in undotierten Halbleitern	99
3.1.2	Solarzellen mit p/n-Übergang	101
3.1.2.1	Störstellenleitung	101
3.1.2.2	Verhalten des p/n-Übergangs bei Bestrahlung	102
3.1.2.3	Dunkelkennlinie der Solarzelle	102
3.1.2.4	Ersatzschaltbild und Kennlinie der bestrahlten Solarzelle	104
3.1.2.5	Einfluss von Einstrahlleistung und Temperatur	106
3.1.2.6	Füllfaktor und Wirkungsgrad	108
3.2	Technologie der Solarzellen und -module	111
3.2.1	Solarzellentypen und ihre Eigenschaften	111
3.2.1.1	Prinzipieller Aufbau von Solarzellen	111
3.2.1.2	Übersicht über Solarzellentypen	111
3.2.1.3	Monokristalline Silizium-Solarzellen	112
3.2.1.4	Polykristalline Solarzellen	113
3.2.1.5	Amorphe Siliziumzellen	115
3.2.1.6	CIS-Dünnschichtzellen	116
3.2.1.7	Cadmium-Tellurid-Zelle	117
3.2.1.8	Gallium-Arsenid-Zelle	117
3.2.1.9	Siliziumnitrid-Inversionsschicht-Solarzellen	118
3.2.1.10	Weitere Solarzellentypen	119
3.2.2	Solarmodule	120
3.2.3	Temperaturverhalten und Wirkungsgrad in der Praxis	122
3.3	Komponenten photovoltaischer Systeme	125
3.3.1	Wechselrichter	125
3.3.2	MPP-Regelung	131
3.3.3	Energiespeicher	133
3.3.4	Laderegler	138
3.4	Auslegungskriterien für photovoltaische Kleinsysteme	139
3.4.1	Prinzipieller Aufbau von autarken photovoltaischen Kleinsystemen	139
3.4.2	Nachführungssysteme	143
3.4.3	Kenngrößen zur Beurteilung einer Photovoltaikanlage	146
3.4.4	Nennleistung und Batteriegröße	147
3.5	Beispiele für photovoltaische Anlagen	148
3.5.1	Projekt Sonne in der Schule	149
3.5.2	Soldach München-Riem	151
3.5.3	Gebäudeintegrierte PV-Anlage an der Fortbildungsakademie in Herne	152
3.5.4	Solarpark Pocking	153
3.6	Vergleich verschiedener Solarstromtechnologien	154
4	GRUNDLAGEN ELEKTRISCHER MASCHINEN	157
4.1	Drehstrom-Synchrongeneratoren	157
4.1.1	Allgemeines	157
4.1.2	Zeigerdiagramm und Betriebszustände der Vollpolsynchronmaschine	158
4.2	Asynchrongeneratoren	159
5	WASSERKRAFT	163
5.1	Begriffsbestimmung und Energieangebot	163
5.2	Turbinen für Wasserkraftwerke	163
5.2.1	Kaplanturbine	165
5.2.2	Francisturbine	167
5.2.3	Pelton-turbine	167
5.2.4	Durchströmturbine	169
5.3	Schutz der Turbine	170

5.4	Nutzung der potenziellen und kinetischen Energie der Binnengewässer.....	171
5.4.1	Bestimmung der nutzbaren Leistung	171
5.4.2	Laufwasserkraftwerke	174
5.4.3	Speicherkraftwerke.....	178
5.4.4	Pumpspeicherkraftwerke.....	180
5.4.5	Kraftwerksketten	181
5.5	Stand der Wasserkraftnutzung.....	182
5.6	Nutzung der Meeresenergie	185
5.6.1	Gezeitenkraftwerke.....	185
5.6.1.1	Entstehung der Gezeiten	185
5.6.1.2	Geeignete Regionen zur Nutzung der Gezeitenenergie	186
5.6.1.3	Betriebsweisen von Gezeitenkraftwerken	187
5.6.1.4	Beispiele für Gezeitenkraftwerke.....	189
5.6.2	Meeresströmungskonverter	190
5.6.2.1	Nutzung von Meeresströmungen	190
5.6.2.2	Beispiele für Meeresströmungskonverter	192
5.6.3	Wellenkraftwerke.....	193
5.6.3.1	Energie und Leistung von Meereswellen	194
5.6.3.2	Übersicht über die Arten von Wellenenergiekonvertern	196
5.6.3.3	Wellenenergiekonverter PELAMIS.....	197
5.6.3.4	Wellenenergiekonverter Archimedes	199
5.6.3.5	Wellenkraftwerke nach dem OWC-Prinzip	200
5.6.3.6	Wellenkraftwerk nach dem TAPCHAN-Prinzip.....	203
5.6.3.7	Vorteile und Nachteile der Wellenenergienutzung	204
5.6.4	Osiosekraftwerke	205
6	WINDENERGIE	207
6.1	Begriffsbestimmungen und Energieangebot	207
6.2	Bauformen von Windenergieanlagen.....	212
6.3	Grundlagen der Windenergienutzung für stationäre Windkraftanlagen.....	213
6.3.1	Randbedingungen für die Nutzungsmöglichkeiten der Windenergie	213
6.3.2	Windleistung	214
6.3.2.1	Berechnung der Windleistung	214
6.3.2.2	Theoretische Grenze der nutzbaren Leistung	215
6.3.2.3	Widerstandsprinzip für Windkraftanlagen	219
6.3.2.4	Auftriebsprinzip für Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse	222
6.3.2.5	Auftriebsprinzip für Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	226
6.3.3	Technische Einschränkungen der Windenergienutzung	227
6.3.4	Kennlinien von Windenergieanlagen.....	230
6.3.4.1	Drehmoment	230
6.3.4.2	Leistungsbeiwert.....	231
6.3.4.3	Leistungskennlinien	232
6.3.5	Sonderformen der Windenergienutzung	233
6.4	Komponenten von Windenergieanlagen	234
6.4.1	Rotor	234
6.4.1.1	Rotorblätter	234
6.4.1.2	Nabe mit Rotorblattverstellung	236
6.4.2	Maschinengondel.....	238
6.4.3	Turm	238
6.4.4	Fundament und Gründung.....	239
6.4.5	Regelungs-, Mess- und Sicherheitseinrichtungen	240
6.5	Energiewandlung und Netzeinbindung.....	241
6.6	Leistungsschwankungen beim Betrieb von Windkraftanlagen.....	244
6.7	Anwendungsbeispiele von Windkraftanlagen	246
6.7.1	Langsamläufer	246

6.7.2	Schnellläufer	246
6.8	Einspeisevergütung.....	248
6.9	Entwicklung der Windenergienutzung in Deutschland und Europa.....	249
6.9.1	Historische Entwicklung der Windenergienutzung.....	249
6.9.2	Entwicklungstendenzen der Windkraftnutzung.....	251
7	GEOTHERMIE.....	253
7.1	Definition und Beschreibung der Geothermie.....	253
7.1.1	Definition.....	253
7.1.2	Entstehung und Beschreibung der Geothermie.....	254
7.1.3	Geothermie als regenerative Energiequelle.....	255
7.2	Geologische Formationen in Deutschland.....	256
7.3	Klassifizierung der Geothermie.....	258
7.4	Erschließung des Untergrunds.....	259
7.4.1	Prinzipielle Erschließungsmöglichkeiten.....	259
7.4.2	Stimulation und Aufschlussverfahren.....	260
7.4.2.1	Hydrothermale Geothermie.....	260
7.4.2.2	HDR-Verfahren.....	260
7.4.3	Bohrtechnik und Fündigkeitsrisiko.....	261
7.5	Technische Nutzung der Geothermie.....	265
7.5.1	Nutzung der Geothermie zur Wärmeversorgung.....	265
7.5.2	Nutzung der Geothermie zur Stromerzeugung.....	266
7.5.2.1	Geothermische Kraftwerke mit direkter Nutzung des Thermalfluides.....	267
7.5.2.2	Geothermische Kraftwerke mit Sekundärkreislauf.....	270
7.6	Aktuelle Nutzung der Geothermie.....	274
7.6.1	Anlagen zur Nutzung der Geothermie in Deutschland.....	274
7.6.2	Geothermische Anlagen zur direkten Wärmenutzung weltweit.....	276
7.6.3	Geothermische Anlagen zur elektrischen Energieerzeugung weltweit.....	276
7.6.4	Beispiele geothermischer Anlagen.....	278
7.6.4.1	Hydrothermale Geothermie zur Wärmeversorgung in Unterschleißheim.....	278
7.6.4.2	HDR-Pilotkraftwerk in Soultz-sous-Forêts, Frankreich.....	278
7.7	Vor- und Nachteile der Geothermie.....	279
8	BIOMASSE.....	281
8.1	Einführung.....	281
8.1.1	Überblick über Nutzungspfade.....	281
8.1.2	Bedeutung der Bioenergie für die Energieversorgung in Deutschland.....	282
8.2	Bereitstellung der Biomasse.....	283
8.2.1	Primäre Biomasse.....	283
8.2.2	Sekundäre Biomasse.....	284
8.3	Festbrennstoffe.....	285
8.3.1	Aufbereitung zu festen Brennstoffen.....	285
8.3.2	Nutzung biogener Festbrennstoffe.....	289
8.3.3	Energie- und Ökobilanz.....	292
8.3.4	Herausforderungen an die zukünftige Entwicklung.....	294
8.4	Flüssige Kraftstoffe.....	295
8.4.1	Verfahren zur Kraftstoffherstellung.....	295
8.4.1.1	Ethanolkraftstoffe aus Zucker, Getreide und Cellulose.....	296
8.4.1.2	Pflanzenöl und Biodiesel.....	303
8.4.1.3	FT-Kraftstoffe (Synfuel).....	306
8.4.2	Nutzung flüssiger Kraftstoffe.....	311
8.4.3	Energie- und Ökobilanz.....	312
8.4.4	Entwicklung der Biokraftstoffproduktion.....	313
8.4.5	Fazit.....	314
8.5	Gasförmige Brennstoffe.....	314

8.5.1	Einsatzstoffe zur Biogasproduktion	315
8.5.2	Biogaserzeugung	317
8.5.2.1	Nassfermentation	317
8.5.2.2	Trockenfermentation	319
8.5.2.3	Gaszusammensetzung	320
8.5.2.4	Synthesegas	321
8.5.3	Einsatz von Biogas	321
8.5.3.1	Gastherme	321
8.5.3.2	Verbrennungsmotorische Stromerzeugung ohne und mit Wärmenutzung	322
8.5.3.3	Einspeisung ins Erdgasnetz	323
8.5.4	Emissionen	323
8.5.5	Erzeugung und Potenzial	324
8.5.6	Vor- und Nachteile der Biogasnutzung	325
8.5.7	Herausforderungen und zukünftige Entwicklung	326
8.5.8	Anlagenbeispiele	326
8.6	Zusammenfassung und Ausblick	328
9	EINBINDUNG REGENERATIVER ENERGIEQUELLEN IN DIE ENERGIEVERSORUNG	329
9.1	Problematik der Einbindung	329
9.2	Energiespeicherung	331
9.2.1	Schwungradspeicher	332
9.2.2	Supraleitender Magnetfeldspeicher	333
9.2.3	Druckluftspeicher	334
9.2.4	Elektrochemische Speicher	335
9.2.5	Wasserstoffsysteme	337
9.2.5.1	Einführung	337
9.2.5.2	Komponenten eines Wasserstoffsystems	338
9.2.5.3	Vor- und Nachteile einer Wasserstoffwirtschaft	346
10	VERGLEICHENDE WERTUNG	347
10.1	Verfügbarkeit, Ausnutzungsdauer und Wirkungsgrade	347
10.2	Flächenbedarf	349
10.3	Materialbedarf	349
10.4	Kumulierter Energieaufwand	350
10.5	Vergleichende energetische Kennzahlen	351
10.6	Vergleichende Wertung am Beispiel von Wasserstoffbereitstellungspfaden	353
10.7	Kosten der CO ₂ -Vermeidung durch Offshore-Windenergieanlagen	359
10.7.1	Berechnung der Vermeidungskosten	359
10.7.2	Rahmenbedingungen für die Beispielrechnung	360
10.7.3	Ergebnisse für Offshore-Windenergieanlagen	361
10.7.4	Kostenvergleich verschiedener Methoden der CO ₂ -Vermeidung	365
10.8	Vergleich von Stromerzeugungssystemen	369
10.8.1	Primärenergieaufwand für die Stromerzeugung in Deutschland	369
10.8.2	Kostenvergleich von Kraftwerken zur Stromerzeugung	369
11	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	373