

Dr. Hans Kurt Köthe

Stromversorgung mit Solarzellen

Methoden und Anlagen
für die Energieaufbereitung

Mit 260 Abbildungen und 34 Tabellen
5., neubearbeitete Auflage

Franzis'

Inhalt

1	Einführung	15
2	Das Licht – Quelle der solarelektrischen Energie	20
2.1	Das Licht als Energieträger	20
2.2	Meßtechnische Erfassung des Lichtes	23
2.2.1	Definitionen und Einheiten	23
2.2.2	Grundlagen der Meßtechnik	25
2.2.3	Vermessung der Sonnenstrahlen	28
2.3	Verfolgung des Sonnenstandes im Jahresverlauf	31
2.4	Strahlungsmeßdaten der Wetterbeobachtungsstationen	32
2.5	Auswertung der Meßdaten für photovoltaische Zwecke	32
2.6	Einflüsse von Bewölkung und Nachführung	35
3	Solarzellen und Solargeneratoren	38
3.1	Aufbau von Solarzellen	38
3.2	Herstellung von Solarzellen	38
3.3	Etwas Solarzellentheorie	39
3.4	Kennlinien von Solarzellen	44
3.4.1	Dunkelkennlinie	44
3.4.2	Kennlinie der bestrahlten Solarzelle	44
3.4.3	Arbeitspunkt von Solarzellen	47
3.4.4	MPP-Tracking	48
3.4.5	Füllfaktor	48
3.4.6	Umwandlungswirkungsgrad	49
3.5	Solarzellenmodule	50
3.5.1	Modulaufbau	50
3.5.2	Prüfung von Solarzellenmodulen	52
3.6	Selbstbau von Solarzellenmodulen	53
3.6.1	Beschaffung der Solarzellen	53
3.6.2	Vermessung der Solarzellen	53
3.6.3	Verschalten und Einbetten von Solarzellen	55
3.6.3.1	Verschalten	55
3.6.3.2	Montage	56
3.6.3.3	Einbau von Schutzdioden	56
3.7	Montage von Solarzellenmodulen	60
3.7.1	Gestellmontage	60
3.7.2	Dachmontage	60
3.7.2.1	Gewächshausdach-Montage	61
3.7.2.2	Sparrendach-Montage	63
3.7.3	Fassadenmontage	65
3.7.4	Mastmontage und Seilnetzaufständigung	66

Inhalt

4	Photovoltaische Systeme: Aufbau und Auslegung	68
4.1	Systembegriff	68
4.2	Der Systemaufbau	69
4.3	Systeme im Inselbetrieb	71
4.3.1	Aufbau und Struktur der Verbraucher	71
4.3.1.1	Systeme ohne Hilfsenergiequelle	71
4.3.1.2	Systeme mit Hilfsenergiequelle	77
4.3.2	Auslegung von photovoltaischen Systemen für den Inselbetrieb	78
4.3.2.1	Systeme ohne Hilfsenergiequelle	78
4.3.2.2	Photovoltaische Systeme mit einer zweiten, dauernd aktiven Energiequelle	89
4.3.2.3	Systeme mit abrufbarer Hilfsenergiequelle	90
4.4	Systeme mit Netzankepfung	92
5	Energiespeicher für photovoltaische Systeme	96
5.1	Übersicht	96
5.2	Allgemeine Akkumulator-Terminologie	97
5.3	Akkumulator-Ausführungen	104
5.3.1	Allgemeines	104
5.3.2	Bauarten und Baureihen	105
5.3.3	Elektrochemisch wirksame Bestandteile der Zellen	108
5.3.4	Handelsübliche Batterieausführungen und deren Eigenschaften	110
5.4	Betriebsverhalten handelsüblicher Bleiakumulatoren	111
5.4.1	Elektrochemische Vorgänge	111
5.4.2	Lade-/Entlade-Verhalten handelsüblicher Bleiakumulatoren	112
5.4.2.1	Verschlossene Zellen	112
5.4.2.2	Geschlossene Zellen	115
5.4.3	Temperatureinfluß bei Bleiakumulatoren	120
5.5	Betriebsverhalten handelsüblicher Ni/Cd-Akkumulatoren	122
5.5.1	Elektrochemische Vorgänge	122
5.5.2	Lade-/Entlade-Verhalten handelsüblicher Ni/Cd-Akkumulatoren	123
5.5.2.1	Gasdichte Zellen	123
5.5.2.2	Geschlossene Zellen	129
5.5.3	Temperatureinfluß bei Ni/Cd-Akkumulatoren	130
5.6	Auswahl von Batterien für photovoltaische Anwendungen	132
5.7	Anwendung von nicht-gasdichten Blei- und Ni/Cd-Akkumulatoren	136
5.7.1	Der Weg zum vollständigen Laden	136
5.7.2	Beeinflussung des Ladevorgangs über die Speicherdimensionierung	141
5.7.2.1	Vorbemerkung	141
5.7.2.2	Systeme mit Bleiakumulatoren	141
5.7.2.3	Systeme mit Ni/Cd-Akkumulatoren	145
5.7.3	Laden und Spannungsbegrenzung bei Zwillingsbatterien	145
5.7.4	Laden mit Strompulsen, Zellenimpedanz	147
5.8	Batterieanlagen	149

5.8.1	Allgemeines	149
5.8.2	Fußböden und Wandanstriche	150
5.8.2.1	Bleiakkumulator-Räume	150
5.8.2.2	Ni/Cd-Akkumulator-Räume	151
5.8.3	Belüftung	151
5.8.4	Batterieaufstellung	152
6	Bauelemente und Grundsaltungen für die Systemelektronik	154
6.1	Allgemeine Gesichtspunkte	154
6.2	Passive Bauelemente	155
6.2.1	Widerstände	155
6.2.1.1	Leitungswiderstände, Querschnitt	155
6.2.1.2	Festwiderstände	156
6.2.1.3	Potentiometer	156
6.2.1.4	Lineare Temperatur-Meßwiderstände	156
6.2.1.5	Kalt- und Heißeiter	159
6.2.1.6	Spannungsabhängige Widerstände	160
6.2.1.7	Lichtempfindliche Widerstände	160
6.2.2	Kondensatoren	162
6.2.3	Induktivitäten	164
6.2.4	Dioden	164
6.2.4.1	Aufbau und Wirkungsweise	165
6.2.4.2	Gleichrichterdiode	165
6.2.4.3	Z-Dioden	166
6.2.4.4	Photodioden	168
6.2.4.5	Leuchtdioden	169
6.2.5	Relais und Schütze	169
6.2.5.1	Elektromagnetische Relais	169
6.2.5.2	Schütze	174
6.2.5.3	Elektrothermische Relais	175
6.2.5.4	Elektronische Relais	175
6.3	Transistoren	177
6.3.1	Bipolare Transistoren	177
6.3.1.1	Aufbau und Arbeitsweise	178
6.3.1.2	Grundsaltungen	179
6.3.2	Feldeffekt-Transistoren	185
6.3.2.1	Sperrschicht-FETs (JFETs)	186
6.3.3.2	MOSFETs	188
6.4	Integrierte Schaltungen	190
6.4.1	Referenzspannungen	190
6.4.2	Spannungsregler	192
6.4.3	Spannungsvervielfacher	192
6.4.4	Komparatoren	193

Inhalt

6.4.5	Operationsverstärker	196
6.4.6	Schaltregler-ICs	199
6.4.7	Integrierte Digitalschaltungen	199
6.5	Schaltungstechnik	201
6.5.1	Schwellwertkomparatoren	201
6.5.1.1	Aufgaben und Ausführung	201
6.5.1.2	Arbeitsweise von Differenzverstärkern	201
6.5.1.3	Anwendung des Differenzverstärkers als Komparator	203
6.5.1.4	Operationsverstärker als Komparator	204
6.5.2	Regelungsschaltungen	205
6.5.2.1	Schaltungen mit diskreten Transistoren	205
6.5.2.2	Grundprinzip der Stabilisierungsschaltungen	207
6.5.2.3	Einige Serienstabilisierungsschaltungen	210
6.5.3	Anwendung von Gatterschaltungen beim Aufbau von Multivibratoren	218
6.5.3.1	Monostabile Multivibratoren	218
6.5.3.2	Bistabile Multivibratoren	221
6.5.3.3	Astabile Multivibratoren	223
7	Methoden und Geräte für die Energieaufbereitung	225
7.1	Übersicht	225
7.2	Transformatoren	226
7.3	Gleichrichter	227
7.4	Gleichstromwandler (Konverter)	227
7.4.1	Drosselwandler	227
7.4.1.1	Übersicht	227
7.4.1.2	Drosselwandlerschaltungen	230
7.4.1.3	Regelschaltungen für Drosselwandler	232
7.4.2	Transformatorwandler	235
7.4.2.1	Allgemeines zur Gleichstromtransformation	235
7.4.2.2	Sperrwandler	239
7.4.2.3	Durchflußwandler	243
7.5	Wechselrichter (Inverter)	246
7.5.1	Übersicht	246
7.5.2	Rechteck-Wechselrichter	246
7.5.2.1	Ungeregelte Geräte ohne und mit Filtern	246
7.5.2.2	Geregelte Geräte ohne und mit Filtern	248
7.5.3	Treppenspannungs-Inverter	252
7.5.3.1	Geräte für die Versorgung aus einer einzigen Spannungsquelle	252
7.5.3.2	Geräte mit Versorgung aus mehreren abgestuften Spannungsquellen	252
7.5.4	Pulsbreiten-gesteuerte Wechselrichter	255
7.5.4.1	Geräte mit HF-Transformatoren	255
7.5.4.2	Geräte mit NF-Transformatoren	255
7.5.4.3	Geräte ohne Transformatoren	256
7.5.5	Digital gesteuerte Inverter	257

8	Überwachungs- und Steuereinrichtungen	259
8.1	Meßwerte	259
8.1.1	Ströme	259
8.1.2	Spannungen	261
8.1.3	Leistungen	263
8.1.4	Umgesetzte Energie	263
8.1.5	Sonstige Meßwerte	264
8.1.6	Meßwertaufzeichnung	264
8.1.6.1	Analogaufzeichnung	264
8.1.6.2	Digitalaufzeichnung	264
8.1.7	Fernübertragung von Meßwerten	265
8.1.8	Datenerfassung bei einer Photovoltaik-Demonstrationsanlage	265
8.2	Schwellwerterfassung und Verarbeitung	269
8.2.1	Analoge Verfahren	269
8.2.1.1	Komparatoren	270
8.2.1.2	Spannungsschwellwerte	271
8.2.1.3	Stromschwellwerte	274
8.2.1.4	Temperaturschwellwerte	274
8.3	Entwurf von Steuerschaltungen für Stromversorgungssysteme	276
8.3.1	Digitale Verfahren	279
9	Schaltungstechnik	282
9.1	Zielsetzungen und Konzepte	282
9.2	Systeme mit lastabhängigem Solar-Generator-Arbeitspunkt	282
9.2.1	Arbeitspunktvorgabe durch die Verbraucherkennlinie	282
9.2.2	Arbeitspunktvorgabe bei batteriegepufferten Systemen	284
9.2.2.1	Abgeschalteter Verbraucher	284
9.2.2.2	Eingeschalteter Verbraucher	286
9.2.3	Kennlinienbetrieb mit Ladestrom-Begrenzungswiderstand	287
9.2.4	Arbeitspunkteinstellung mit Parallelreglern	289
9.2.4.1	Methode der Parallel-Begrenzung	289
9.2.4.2	Ladespannungsbegrenzung mit Parallelreglern	289
9.2.4.3	Ladegrenzstrom als Führungsgröße	293
9.2.5	Arbeitspunkteinstellung mit Serienreglern	295
9.2.5.1	Methode der Serienbegrenzung	295
9.2.5.2	Ladespannungsbegrenzung mit Serienreglern	297
9.2.5.3	Ladestrombegrenzung mit Serienreglern	300
9.2.6	Schaltbegrenzer als Überwachungsschutz für die Batterie	301
9.2.6.1	Der Schaltbegrenzer — Sonderfall des Zweipunktreglers	301
9.2.6.2	Ladespannungsbegrenzung durch Parallel-Schaltregler	303
9.2.6.3	Ladespannungsbegrenzung durch Serien-Schaltregler	304
9.2.6.4	Überschußenergienutzung mit Hilfe von Schaltbegrenzern	306
9.3	Systeme mit leistungsoptimalem Solargenerator-Arbeitspunkt	309

Inhalt

9.3.1	Prinzip des „Maximum Power Point Tracking“ (MPPT)	309
9.3.2	Die Technik des MPPT	311
9.3.2.1	Anpassungswandler	311
9.3.2.2	Regelglieder	311
9.3.3	Anwendbarkeit des MPPT	313
9.3.3.1	Allgemeine Gesichtspunkte	313
9.3.3.2	MPPT beim Laden von Batterien	314
9.3.3.3	MPPT beim Versorgen von Wasserpumpen	315
9.3.3.4	MPPT bei Systemen mit Netzparallelbetrieb	320
9.4	Systeme mit weiteren Stromquellen im Parallelbetrieb mit dem Solargenerator	321
9.4.1	Grundformen von Parallelbetrieb-Systemen	321
9.4.2	Systeme im Inselbetrieb	322
9.4.2.1	Systeme ohne Speicher	322
9.4.2.2	Systeme mit Speichern	322
9.4.3	Netzgekoppelte Systeme	322
9.5	Schaltungen und Geräte für Systeme mit Energieaufbereitung	325
9.5.1	Die Ausgangssituation	325
9.5.2	Aufbereitung für Gleichstromverbraucher	325
9.5.2.1	Speicherfreie Systeme	326
9.5.2.2	Speichergestützte Systeme	326
9.5.3	Aufbereitung für Wechselstromverbraucher	329
9.5.3.1	Speicherfreie Systeme	329
9.5.3.2	Speichergestützte Systeme	329
10	Normen und Vorschriften bei der Planung photovoltaischer Anlagen	331
10.1	Übersicht	331
10.2	Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen	332
10.3	Berührungsschutz	334
10.3.1	Schutzmaßnahmen gegen direktes und indirektes Berühren	334
10.3.2	Schutzmaßnahmen im Kleinspannungsbereich	339
10.3.2.1	Schutz durch Schutzkleinspannung	339
10.3.2.2	Begrenzung der Entladungsenergie	342
10.3.2.3	Schutz durch Funktionskleinspannung	342
10.3.3	Schutzmaßnahmen im Niederspannungsbereich	343
10.4	Blitzschutz	343
11	Photovoltaische Anlagen im Kleinspannungsbereich	345
11.1	Beispiele für Anlagen im Kleinspannungsbereich	345
11.1.1	Einsatzmöglichkeiten	345
11.1.2	Einsetzbare Verbraucher	345
11.2	Planung und Ausführung der Anlagen	346
11.2.1	Das photovoltaische Rumpfsystem	346

11.2.1.1	Definition und Dimensionierung	346
11.2.1.2	Auswahl des Solargenerators	348
11.2.1.2	Auswahl der Speicherbatterie	349
11.2.3	Ausbaustufen des Rumpfsystems	349
11.2.3.1	Vor- und Nachteile der Rumpfsystemausführung	349
11.2.3.2	Ausbau mit Sperrdiode und Ladespannungsbegrenzer	349
11.2.3.3	Erweiterter Ausbau durch Unterspannungsschutz	350
11.2.4	Ausgestaltung des Ausgangs der Stromversorgung	350
11.2.4.1	Gleichspannungs-Ausgang	350
11.2.4.2	Wechselspannungs-Ausgang	351
11.2.5	Maßnahmen gegen Überspannungen	352
11.2.6	Überstromschutz	354
11.2.7	Schutz der Anlage gegen Umwelteinflüsse	355
11.2.7.1	Umweltbedingungen	355
11.2.7.2	Unterbringung des Solargenerators	355
11.2.7.3	Unterbringung der Systemelektronik und der Batterie	356
11.2.8	Anschluß der Verbraucher an die Stromversorgung	356
11.3	Lieferumfang bei Anlagen für entlegene Gebiete	356
11.3.1	Allgemeines	356
11.3.2	Hardware	357
11.3.3	Software	357
11.4	Wirkungsgrad der Anlage am Einsatzort	357
11.5	Beurteilungskriterien für photovoltaische Kleinanlagen	357
11.5.1	Allgemeines	357
11.5.2	Beurteilung der eingesetzten Verbraucher	358
11.5.3	Solargenerator	358
11.5.4	Speicher bzw. Pufferbatterie	359
11.5.5	Systemauslegung	359
11.5.6	Ausbaustufen bei Regelungssystemen	360
11.5.7	Schutzschaltungen gegen Tiefentladung der Batterie	360
11.5.8	Energieaufbereitung	361
11.5.8.1	Gleichspannungsausgang	361
11.5.8.2	Wechselspannungsausgang	361
11.5.9	Schutzmaßnahmen gegen Überspannungen	362
11.5.9.1	Schutz der Anlagenbenutzer	362
11.5.9.2	Blitzschutz	362
11.5.10	Schutzmaßnahmen gegen Überströme	363
11.5.11	Widerstandsfähigkeit des Systems gegen die zu erwartenden Umweltbedingungen	363
11.5.11.1	Allgemeines	363
11.5.11.2	Solargenerator	363
11.5.11.3	Durch Umhüllung geschützte Komponenten	364
11.5.12	Verbraucheranschluß	364
11.5.13	Wenn ein komplettes Paket eingekauft wird	364
11.5.13.1	Allgemeines	364

Inhalt

11.5.13.2	Kontroll-Liste für die Hardware	365
11.5.13.3	Kontroll-Liste für die Software	365
11.5.13.4	Unterlagen und Anweisungen für Fehlersuche und Reparatur	365
11.6	Ein ausbaufähiges System für den Schutzkleinspannungsbereich	366
12	Photovoltaische Anlagen im Niederspannungsbereich	367
12.1	Systemaufbau und Beispiele	367
12.2	Niederspannungsanlagen im Inselbetrieb	368
12.3	Niederspannungsanlagen mit Netzkopplung	368
12.3.1	Die Elektrizitätsversorgungsunternehmen als Partner	368
12.3.2	Das 1000-Dächer-Programm und das dabei angewendete Verfahren zur Beantragung von Zuschüssen bei dessen Einführung	369
12.3.3	Das 1000-Dächer-Programm aus der Sicht des EVU	371
12.3.3.1	Das Beispiel	371
12.3.3.2	Elektro-Installation von netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen	372
12.3.4	Blitzschutz	379
12.3.4.1	Übersicht	379
12.3.4.2	Äußerer Blitzschutz und Einkopplung von Überspannungen	380
12.3.4.3	Der Innere Blitzschutz	383
12.3.5	Technik der Wechselrichter für Netzkopplung	384
12.3.5.1	Besonderheiten bei Photovoltaik-Anlagen	384
12.3.5.2	Netzsynchronisierte Wechselrichter	386
12.3.5.3	Merkmale zur Beurteilung von Wechselrichtern	391
12.3.6	Installation von netzgekoppelten PV-Anlagen	392
12.3.7	Vorläufige Ergebnisse des Bund-Länder-100-Dächer Programmes	392
12.3.8	Die Zukunft netzgekoppelter PV-Anlagen	393
Sachverzeichnis		395

Wichtiger Hinweis

Die in diesem Buch wiedergegebenen Schaltungen und Verfahren werden ohne Rücksicht auf die Patentlage mitgeteilt. Sie sind ausschließlich für Amateur- und Lehrzwecke bestimmt und dürfen nicht gewerblich genutzt werden*).

Alle Schaltungen und technischen Angaben in diesem Buch wurden vom Autor mit größter Sorgfalt erarbeitet bzw. zusammengestellt und unter Einschaltung wirksamer Kontrollmaßnahmen reproduziert. Trotzdem sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Der Verlag sieht sich deshalb gezwungen, darauf hinzuweisen, daß er weder eine Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für Folgen, die auf fehlerhafte Angaben zurückgehen, übernehmen kann. Für die Mitteilung eventueller Fehler sind Autor und Verlag jederzeit dankbar.

*) Bei gewerblicher Nutzung ist vorher die Genehmigung des möglichen Lizenzinhabers einzuholen.