

FRANZIS HANDBUCH

Dr. Hans Kurt Köthe

Stromversorgung mit Solarzellen

Methoden und Anlagen
für die Energieaufbereitung

Mit 260 Abbildungen und 34 Tabellen

2., verbesserte und erweiterte Auflage

Technische Hochschule
Institut für Stromrichtertechnik
und Antriebsregelung
Institutsbibliothek
inventar-Nr. XMB



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	66

4	Photovoltaische Systeme: Aufbau und Auslegung	67
4.1	Systembegriff	67
4.2	Der Systemaufbau	68
4.3	Systeme im Inselbetrieb	70
4.3.1	Aufbau und Struktur der Verbraucher	70
4.3.1.1	Systeme ohne Hilfsenergiequelle	70
4.3.1.2	Systeme mit Hilfsenergiequelle	76
4.3.2	Auslegung von photovoltaischen Systemen für den Inselbetrieb	77
4.3.2.1	Systeme ohne Hilfsenergiequelle	77
4.3.2.2	Photovoltaische Systeme mit einer zweiten, dauernd aktiven Energiequelle	88
4.3.2.3	Systeme mit abrufbarer Hilfsenergiequelle	89
4.4	Systeme mit Netzankopplung	91
5	Energiespeicher für photovoltaische Systeme	94
5.1	Übersicht	94
5.2	Allgemeine Akkumulator-Terminologie	95
5.3	Akkumulator-Ausführungen	102
5.3.1	Allgemeines	102
5.3.2	Bauarten und Baureihen	103
5.3.3	Elektrochemisch wirksame Bestandteile der Zellen	106
5.3.4	Handelsübliche Batterieausführungen und deren Eigenschaften	108
5.4	Betriebsverhalten handelsüblicher Bleiakkulatoren	109
5.4.1	Elektrochemische Vorgänge	109
5.4.2	Lade-/Entlade-Verhalten handelsüblicher Bleiakkulatoren	110
5.4.2.1	Verschlossene Zellen	110
5.4.2.2	Geschlossene Zellen	113
5.4.3	Temperatureinfluß bei Bleiakkulatoren	118
5.5	Betriebsverhalten handelsüblicher Ni/Cd-Akkulatoren	120
5.5.1	Elektrochemische Vorgänge	120
5.5.2	Lade-/Entlade-Verhalten handelsüblicher Ni/Cd-Akkulatoren	121
5.5.2.1	Gasdichte Zellen	121
5.5.2.2	Geschlossene Zellen	127
5.5.3	Temperatureinfluß bei Ni/Cd-Akkulatoren	128
5.6	Auswahl von Batterien für photovoltaische Anwendungen	130
5.7	Anwendung von nicht-gasdichten Blei- und Ni/Cd-Akkulatoren	134
5.7.1	Der Weg zum vollständigen Laden	134
5.7.2	Beeinflussung des Ladevorgangs über die Speicherdimensionierung	139
5.7.2.1	Vorbemerkung	139
5.7.2.2	Systeme mit Bleiakkulatoren	139
5.7.2.3	Systeme mit Ni/Cd-Akkulatoren	143
5.7.3	Laden und Spannungsbegrenzung bei Zwillingsbatterien	143
5.7.4	Laden mit Strompulsen, Zellenimpedanz	145
5.8	Batterieanlagen	147

5.8.1	Allgemeines	147
5.8.2	Fußböden und Wandanstriche	148
5.8.2.1	Bleiakkumulator-Räume	148
5.8.2.2	Ni/Cd-Akkumulator-Räume	149
5.8.3	Belüftung	149
5.8.4	Batterieaufstellung	151
6	Bauelemente und Grundschaltungen für die Systemelektronik	152
6.1	Allgemeine Gesichtspunkte	152
6.2	Passive Bauelemente	153
6.2.1	Widerstände	153
6.2.1.1	Leitungswiderstände, Querschnitt	153
6.2.1.2	Festwiderstände	154
6.2.1.3	Potentiometer	154
6.2.1.4	Lineare Temperatur-Meßwiderstände	154
6.2.1.5	Kalt- und Heißleiter	157
6.2.1.6	Spannungsabhängige Widerstände	158
6.2.1.7	Lichtempfindliche Widerstände	158
6.2.2	Kondensatoren	160
6.2.3	Induktivitäten	162
6.2.4	Dioden	162
6.2.4.1	Aufbau und Wirkungsweise	163
6.2.4.2	Gleichrichterdioden	163
6.2.4.3	Z-Dioden	164
6.2.4.4	Photodioden	166
6.2.4.5	Leuchtdioden	167
6.2.5	Relais und Schütze	167
6.2.5.1	Elektromagnetische Relais	167
6.2.5.2	Schütze	172
6.2.5.3	Elektrothermische Relais	173
6.2.5.4	Elektronische Relais	173
6.3	Transistoren	175
6.3.1	Bipolare Transistoren	175
6.3.1.1	Aufbau und Arbeitsweise	176
6.3.1.2	Grundschaltungen	177
6.3.2	Feldeffekt-Transistoren	183
6.3.2.1	Sperrschicht-FETs (JFETs)	184
6.3.3.2	MOSFETs	186
6.4	Integrierte Schaltungen	188
6.4.1	Referenzspannungen	188
6.4.2	Spannungsregler	190
6.4.3	Spannungsvervielfacher	190
6.4.4	Komparatoren	191

6.4.5	Operationsverstärker	194
6.4.6	Schaltregler-ICs	197
6.4.7	Integrierte Digitalschaltungen	197
6.5	Schaltungstechnik	199
6.5.1	Schwellwertkomparatoren	199
6.5.1.1	Aufgaben und Ausführung	199
6.5.1.2	Arbeitsweise von Differenzverstärkern	199
6.5.1.3	Anwendung des Differenzverstärkers als Komparator	201
6.5.1.4	Operationsverstärker als Komparator	202
6.5.2	Regelungsschaltungen	203
6.5.2.1	Schaltungen mit diskreten Transistoren	203
6.5.2.2	Grundprinzip der Stabilisierungsschaltungen	205
6.5.2.3	Einige Serienstabilisierungsschaltungen	208
6.5.3	Anwendung von Gatterschaltungen beim Aufbau von Multivibratoren	216
6.5.3.1	Monostabile Multivibratoren	216
6.5.3.2	Bistabile Multivibratoren	219
6.5.3.3	Astabile Multivibratoren	221
7	Methoden und Geräte für die Energieaufbereitung	223
7.1	Übersicht	223
7.2	Transformatoren	224
7.3	Gleichrichter	225
7.4	Gleichstromwandler (Konverter)	225
7.4.1	Drosselwandler	225
7.4.1.1	Übersicht	225
7.4.1.2	Drosselwandlerschaltungen	228
7.4.1.3	Regelschaltungen für Drosselwandler	230
7.4.2	Transformatorwandler	233
7.4.2.1	Allgemeines zur Gleichstromtransformation	233
7.4.2.2	Sperrwandler	237
7.4.2.3	Durchflußwandler	241
7.5	Wechselrichter (Inverte)	244
7.5.1	Übersicht	244
7.5.2	Rechteck-Wechselrichter	244
7.5.2.1	Unregelte Geräte ohne und mit Filtern	244
7.5.2.2	Geregelte Geräte ohne und mit Filtern	246
7.5.3	Treppenspannungs-Inverter	250
7.5.3.1	Geräte für die Versorgung aus einer einzigen Spannungsquelle	250
7.5.3.2	Geräte mit Versorgung aus mehreren abgestuften Spannungsquellen	250
7.5.4	Pulsbreiten-gesteuerte Wechselrichter	253
7.5.4.1	Geräte mit HF-Transformatoren	253
7.5.4.2	Geräte mit NF-Transformatoren	253
7.5.4.3	Geräte ohne Transformatoren	254
7.5.5	Digital gesteuerte Inverter	255

8	Überwachungs- und Steuereinrichtungen	257
8.1	Meßwerte	257
8.1.1	Ströme	257
8.1.2	Spannungen	259
8.1.3	Leistungen	261
8.1.4	Umgesetzte Energie	261
8.1.5	Sonstige Meßwerte	262
8.1.6	Meßwertaufzeichnung	262
8.1.6.1	Analogaufzeichnung	262
8.1.6.2	Digitalaufzeichnung	262
8.1.7	Fernübertragung von Meßwerten	263
8.1.8	Datenerfassung bei einer Photovoltaik-Demonstrationsanlage	263
8.2	Schwellwerterfassung und Verarbeitung	267
8.2.1	Analoge Verfahren	267
8.2.1.1	Komparatoren	268
8.2.1.2	Spannungsschwellwerte	269
8.2.1.3	Stromschwellwerte	272
8.2.1.4	Temperaturschwellwerte	272
8.2.2	Digitale Verfahren	277
8.3	Entwurf von Steuerschaltungen für Stromversorgungssysteme	274
9	Schaltungstechnik	280
9.1	Zielsetzungen und Konzepte	280
9.2	Systeme mit lastabhängigem Solar-Generator-Arbeitspunkt	280
9.2.1	Arbeitspunktvorgabe durch die Verbraucherkennlinie	280
9.2.2	Arbeitspunktvorgabe bei batteriegepufferten Systemen	282
9.2.2.1	Abgeschalteter Verbraucher	282
9.2.2.2	Eingeschalteter Verbraucher	284
9.2.3	Kennlinienbetrieb mit Ladestrom-Begrenzungswiderstand	285
9.2.4	Arbeitspunkteinstellung mit Parallelreglern	287
9.2.4.1	Methode der Parallel-Begrenzung	287
9.2.4.2	Ladespannungsbegrenzung mit Parallelreglern	287
9.2.4.3	Ladegrenzstrom als Führungsgröße	291
9.2.5	Arbeitspunkteinstellung mit Serienreglern	293
9.2.5.1	Methode der Serienbegrenzung	293
9.2.5.2	Ladespannungsbegrenzung mit Serienreglern	295
9.2.5.3	Ladestrombegrenzung mit Serienreglern	298
9.2.6	Schaltbegrenzer als Überwachungsschutz für die Batterie	299
9.2.6.1	Der Schaltbegrenzer – Sonderfall des Zweipunktreglers	299
9.2.6.2	Ladespannungsbegrenzung durch Parallel-Schaltregler	301
9.2.6.3	Ladespannungsbegrenzung durch Serien-Schaltregler	302
9.2.6.4	Überschußenergienutzung mit Hilfe von Schaltbegrenzern	304
9.3	Systeme mit leistungsoptimalem Solargenerator-Arbeitspunkt	307

9.3.1	Prinzip des „Maximum Power Point Tracking“ (MPPT)	307
9.3.2	Die Technik des MPPT	309
9.3.2.1	Anpassungswandler	309
9.3.2.2	Regelglieder	309
9.3.3	Anwendbarkeit des MPPT	311
9.3.3.1	Allgemeine Gesichtspunkte	311
9.3.3.2	MPPT beim Laden von Batterien	312
9.3.3.3	MPPT beim Versorgen von Wasserpumpen	313
9.3.3.4	MPPT bei Systemen mit Netzparallelbetrieb	318
9.4	Systeme mit weiteren Stromquellen im Parallelbetrieb mit dem Solargenerator	319
9.4.1	Grundformen von Parallelbetrieb-Systemen	319
9.4.2	Systeme im Inselbetrieb	320
9.4.2.1	Systeme ohne Speicher	320
9.4.2.2	Systeme mit Speichern	320
9.4.3	Netzgekoppelte Systeme	320
9.5	Schaltungen und Geräte für Systeme mit Energieaufbereitung	323
9.5.1	Die Ausgangssituation	323
9.5.2	Aufbereitung für Gleichstromverbraucher	323
9.5.2.1	Speicherfreie Systeme	324
9.5.2.2	Speichergestützte Systeme	324
9.5.3	Aufbereitung für Wechselstromverbraucher	327
9.5.3.1	Speicherfreie Systeme	327
9.5.3.2	Speichergestützte Systeme	327
10	Normen und Vorschriften bei der Planung photovoltaischer Anlagen	329
10.1	Übersicht	329
10.2	Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen	330
10.3	Berührungsschutz	332
10.3.1	Schutzmaßnahmen gegen direktes und indirektes Berühren	332
10.3.2	Schutzmaßnahmen im Kleinspannungsbereich	337
10.3.2.1	Schutz durch Schutzkleinspannung	337
10.3.2.2	Begrenzung der Entladungsenergie	340
10.3.2.3	Schutz durch Funktionskleinspannung	340
10.3.3	Schutzmaßnahmen im Niederspannungsbereich	341
10.4	Blitzschutz	341
11	Photovoltaische Anlagen im Kleinspannungsbereich	343
11.1	Beispiele für Anlagen im Kleinspannungsbereich	343
11.1.1	Einsatzmöglichkeiten	343
11.1.2	Einsetzbare Verbraucher	343
11.2	Planung und Ausführung der Anlagen	344
11.2.1	Das photovoltaische Rumpfsystem	344

11.2.1.1	Definition und Dimensionierung	344
11.2.1.2	Auswahl des Solargenerators	346
11.2.1.3	Auswahl der Speicherbatterie	347
11.2.3	Ausbaustufen des Rumpfsystems	347
11.2.3.1	Vor- und Nachteile der Rumpfsystemausführung	347
11.2.3.2	Ausbau mit Sperrdiode und Ladespannungsbegrenzer	347
11.2.3.3	Erweiterter Ausbau durch Unterspannungsschutz	348
11.2.4	Ausgestaltung des Ausgangs der Stromversorgung	348
11.2.4.1	Gleichspannungs-Ausgang	348
11.2.4.2	Wechselspannungs-Ausgang	349
11.2.5	Maßnahmen gegen Überspannungen	350
11.2.6	Überstromschutz	352
11.2.7	Schutz der Anlage gegen Umwelteinflüsse	353
11.2.7.1	Umweltbedingungen	353
11.2.7.2	Unterbringung des Solargenerators	353
11.2.7.3	Unterbringung der Systemelektronik und der Batterie	354
11.2.8	Anschluß der Verbraucher an die Stromversorgung	354
11.3	Lieferumfang bei Anlagen für entlegene Gebiete	354
11.3.1	Allgemeines	354
11.3.2	Hardware	355
11.3.3	Software	355
11.4	Wirkungsgrad der Anlage am Einsatzort	355
11.5	Beurteilungskriterien für photovoltaische Kleinanlagen	355
11.5.1	Allgemeines	355
11.5.2	Beurteilung der eingesetzten Verbraucher	356
11.5.3	Solargenerator	356
11.5.4	Speicher bzw. Pufferbatterie	357
11.5.5	Systemauslegung	357
11.5.6	Ausbaustufen bei Regelungssystemen	358
11.5.7	Schutzschaltungen gegen Tiefentladung der Batterie	358
11.5.8	Energieaufbereitung	359
11.5.8.1	Gleichspannungsausgang	359
11.5.8.2	Wechselspannungsausgang	359
11.5.9	Schutzmaßnahmen gegen Überspannungen	360
11.5.9.1	Schutz der Anlagenbenutzer	360
11.5.9.2	Blitzschutz	360
11.5.10	Schutzmaßnahmen gegen Überströme	361
11.5.11	Widerstandsfähigkeit des Systems gegen die zu erwartenden Umweltbedingungen	361
11.5.11.1	Allgemeines	361
11.5.11.2	Solargenerator	361
11.5.11.3	Durch Umhüllung geschützte Komponenten	362
11.5.12	Verbraucheranschluß	362
11.5.13	Wenn ein komplettes Paket eingekauft wird	362
11.5.13.1	Allgemeines	362

11.5.13.2	Kontroll-Liste für die Hardware	363
11.5.13.3	Kontroll-Liste für die Software	363
11.5.13.4	Unterlagen und Anweisungen für Fehlersuche und Reparatur	363
12	Photovoltaische Anlagen im Niederspannungsbereich	365
12.1	Systemaufbau und Beispiele	365
12.2	Niederspannungsanlagen im Inselbetrieb	366
12.3	Niederspannungsanlagen mit Netzkopplung	366
12.3.1	Die Elektrizitätsversorgungsunternehmen als Partner	366
12.3.2	Das Bund-Länder-1000-Dächer-Programm und das Verfahren zur Beantragung von Zuschüssen	367
12.3.3	Das 1000-Dächer-Programm aus der Sicht des EVU	369
12.3.3.1	Das Beispiel	369
12.3.3.2	Elektro-Installation von netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen	370
12.3.4	Blitzschutz	377
12.3.4.1	Übersicht	377
12.3.4.2	Äußerer Blitzschutz und Einkopplung von Überspannungen	378
12.3.4.3	Der Innere Blitzschutz	381
12.3.5	Technik der Wechselrichter für Netzkopplung	382
12.3.4.1	Besonderheiten bei Photovoltaik-Anlagen	382
12.3.5.2	Netzsynchronisierte Wechselrichter	384
12.3.5.3	Merkmale zur Beurteilung von Wechselrichtern	388
	Sachverzeichnis	391