Inhalt

1 Einführung 19

1.1 Einleitung 19
1.1.1 Wozu Photovoltaik? 19
1.1.2 Für wen ist dieses Buch gedacht? 20
1.1.3 Aufbau des Buches 20
1.2 Was ist Energie? 21
1.2.1 Definition der Energie 21
1.2.2 Einheiten der Energie 23
1.2.3 Primär-, Sekundär- und Endenergie 23
1.2.4 Energieinhalte verschiedener Stoffe 24
1.3 Probleme der heutigen Energieversorgung 25
1.3.1 Wachsender Energiebedarf 25
1.3.2 Verknappung der Ressourcen 26
1.3.3 Klimawandel 27
1.3.4 Gefährdung und Entsorgung 29
1.4 Erneuerbare Energien 30
1.4.1 Die Familie der erneuerbaren Energien 30
1.4.2 Vor- und Nachteile von erneuerbaren Energien 31
1.4.3 Bisherige Entwicklung der erneuerbaren Energien 31
1.5 Photovoltaik – das Wichtigste in Kürze 32
1.5.1 Was bedeutet „Photovoltaik“? 32
1.5.2 Was sind Solarzellen und Solarmodule? 32
1.5.3 Wie ist eine typische Photovoltaikanlage aufgebaut? 33
1.5.4 Was „bringt“ eine Photovoltaikanlage? 34
1.6 Geschichte der Photovoltaik 35
1.6.1 Wie alles begann 35
1.6.2 Die ersten echten Solarzellen 36
1.6.3 From Space to Earth 38
1.6.4 Vom Spielzeug zur Energiequelle 39

2 Strahlungsangebot der Sonne ... 41
2.1 Eigenschaften der Solarstrahlung ... 41
2.1.1 Solarkonstante ... 41
2.1.2 Spektrum der Sonne ... 42
2.1.3 Air Mass ... 43
2.2 Globalstrahlung ... 44
2.2.1 Entstehung der Globalstrahlung ... 44
2.2.2 Beiträge von Diffus- und Direktstrahlung ... 45
2.2.3 Globalstrahlungskarten ... 47
2.3 Berechnung des Sonnenstandes ... 48
2.3.1 Sonnendeklination ... 48
2.3.2 Berechnung der Bahn der Sonne ... 51
2.4 Strahlung auf geneigte Flächen ... 53
2.4.1 Strahlungsberechnung mit dem Dreikomponentenmodell ... 53
2.4.1.1 Direktstrahlung ... 54
2.4.1.2 Diffusstrahlung ... 55
2.4.1.3 Reflektierte Strahlung ... 56
2.4.2 Strahlungsabschätzung mit Diagrammen und Tabellen ... 57
2.4.3 Ertragsgewinn durch Nachführung ... 59
2.5 Strahlungsangebot und Weltenergieverbrauch ... 60
2.5.1 Der Solarstrahlungs-Energiewürfel ... 60
2.5.2 Das Sahara-Wunder ... 61

3 Grundlagen der Halbleiterphysik ... 64
3.1 Aufbau von Halbleitern ... 64
3.1.1 Bohrsches Atommodell ... 64
3.1.2 Periodensystem der Elemente ... 66
3.1.3 Aufbau des Siliziumkristalls ... 67
3.1.4 Verbindungshalbleiter ... 67
3.2 Bändermodell des Halbleiters ... 68
3.2.1 Entstehung von Energiebändern ... 68
3.2.2 Unterscheidung in Isolatoren, Halbleiter und Leiter ... 69
3.2.3 Eigenleitungsdichte ... 70
3.3 Ladungstransport in Halbleitern ... 71
3.3.1 Feldströme ... 71
3.3.2 Diffusionsströme ... 73

3.4 Dotierung von Halbleitern 74
3.4.1 n-Dotierung 74
3.4.2 p-Dotierung 75
3.5 Der pn-Übergang 75
3.5.1 Prinzipielle Wirkungsweise 76
3.5.2 Bänderdiagramm des pn-Übergangs 77
3.5.3 Verhalten bei angelegter Spannung 79
3.5.4 Dioden-Kennlinie 80
3.6 Wechselwirkung von Licht mit Halbleitern 81
3.6.1 Phänomen der Lichtabsorption 81
3.6.1.1 Absorptionskoeffizient 82
3.6.1.2 Direkte und indirekte Halbleiter 83
3.6.2 Lichtreflexion an Oberflächen 85
3.6.2.1 Reflexionsfaktor 85
3.6.2.2 Antireflexbeschichtung 86

4 Aufbau und Wirkungsweise der Solarzelle 90

4.1 Betrachtung der Photodiode 90
4.1.1 Aufbau und Kennlinie 90
4.1.2 Ersatzschaltbild 91
4.2 Funktionsweise der Solarzelle 92
4.2.1 Prinzipieller Aufbau 92
4.2.2 Rekombination und Diffusionslänge 93
4.2.3 Was passiert in den einzelnen Zellbereichen? 94
4.2.4 Back-Surface-Field 96
4.3 Photostrom 96
4.3.1 Absorptionswirkungsgrad 97
4.3.2 Quantenwirkungsgrad 98
4.3.3 Spektrale Empfindlichkeit 98
4.4 Kennlinie und Kenngrößen 99
4.4.1 Kurzschlussstrom I_K 101
4.4.2 Leerlaufspannung U_L 101
4.4.3 Maximum Power Point (MPP) 101
4.4.4 Füllfaktor FF 102
4.4.5 Wirkungsgrad η 102
4.4.6 Temperaturabhängigkeit der Solarzelle 103

4.5 Elektrische Beschreibung realer Solarzellen 105
4.5.1 Vereinfachtes Modell 105
4.5.2 Standard-Modell (Ein-Dioden-Modell) 105
4.5.3 Zwei-Dioden-Modell 106
4.5.4 Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes 107
4.6 Betrachtungen zum Wirkungsgrad 110
4.6.1 Spektraler Wirkungsgrad 110
4.6.2 Theoretischer Wirkungsgrad 114
4.6.3 Verluste in der realen Solarzelle 115
4.6.3.1 Optische Verluste 115
4.6.3.2 Elektrische Verluste 118
4.7 Hocheffizienzzellen 119
4.7.1 Buried-Contact-Zelle 119
4.7.2 Punktkontakt-Zelle (IBC-Zelle) 120
4.7.3 PERL-, PERC- und TOPCon-Zelle 121

5 Zellentechnologien 124

5.1 Herstellung kristalliner Silizium-Zellen 124
5.1.1 Vom Sand zum Silizium 124
5.1.1.1 Herstellung von Polysilizium 124
5.1.1.2 Herstellung von monokristallinem Silizium 126
5.1.1.3 Herstellung von multikristallinem Silizium 127
5.1.1.4 Herstellung von quasimonokristallinem Silizum 128
5.1.2 Vom Silizium zum Wafer 128
5.1.2.1 Waferherstellung 128
5.1.2.2 Wafer aus Foliensilizium 129
5.1.3 Herstellung von Standard-Solarzellen 130
5.1.4 Herstellung von Solarmodulen 132
5.2 Zellen aus amorphem Silizium 134
5.2.1 Eigenschaften von amorphem Silizium 134
5.2.2 Herstellungsverfahren 135
5.2.3 Aufbau der pin-Zelle 136
5.2.4 Staebler-Wronski-Effekt 137
5.2.5 Stapelzellen 139
5.2.6 Kombizellen aus mikromorphem Material 140
5.2.7 Integrierte Serienverschaltung 141

5.3 Weitere Dünnschichtzellen ... 143
5.3.1 CIS-Zellen ... 143
5.3.2 Zellen aus Cadmium-Tellurid ... 146
5.4 Hybride Waferzellen ... 148
5.4.1 Kombination von c-Si und a-Si (HIT-Zelle) ... 149
5.4.2 Neue Zell- und Modulhersteller ... 150
5.4.2.1 Meyer Burger ... 150
5.4.2.2 Nexwafe ... 151
5.4.2.3 Heckert Solar ... 151
5.4.3 Stapelzellen aus III/V-Halbleitern ... 151
5.5 Sonstige Zellenkonzepte ... 153
5.5.1 Farbstoffsolarzelle ... 153
5.5.2 Organische Solarzelle ... 153
5.5.3 Perowskit-Solarzelle ... 153
5.6 Konzentratorsysteme ... 155
5.6.1 Prinzip der Strahlungsbündelung ... 155
5.6.2 Was bringt die Konzentration? ... 155
5.6.3 Beispiele von Konzentratorsystemen ... 156
5.6.4 Vor- und Nachteile von Konzentratorsystemen ... 157
5.7 Ökologische Fragestellungen zur Zellen- und Modulherstellung ... 158
5.7.1 Umweltauswirkungen bei Herstellung und Betrieb ... 158
5.7.1.1 Beispiel Cadmium-Tellurid ... 158
5.7.1.2 Beispiel Silizium ... 158
5.7.2 Verfügbarkeit der Materialien ... 161
5.7.2.1 Silizium ... 162
5.7.2.2 Cadmium-Tellurid ... 162
5.7.2.3 CIS ... 162
5.7.2.4 III/V-Halbleiter ... 163
5.7.3 Energierücklaufzeit und Erntefaktor ... 163
5.8 Zusammenfassung ... 166

6 Solarmodule und Solargeneratoren ... 169

6.1 Eigenschaften von Solarmodulen ... 169
6.1.1 Solarzellenkennlinie in allen vier Quadranten ... 169
6.1.2 Parallelschaltung von Zellen ... 170
6.1.3 Reihenschaltung von Zellen ... 171

6.1.4 Einsatz von Bypassdioden ... 172
6.1.4.1 Reduzierung von Verschattungsverlusten ... 172
6.1.4.2 Vermeidung von Hotspots ... 174
6.1.5 Typische Kennlinien von Solarmodulen ... 177
6.1.5.1 Variation der Bestrahlungsstärke ... 177
6.1.5.2 Temperaturverhalten ... 178
6.1.6 Halbzellenmodule ... 179
6.1.6.1 Betrachtung der Verlustleistung ... 180
6.1.6.2 Aufbau von Halbzellenmodulen ... 181
6.1.6.3 Verhalten bei Teilverschattungen ... 182
6.1.7 Sonderfall Dünnschichtmodule ... 184
6.1.8 Beispiele von Datenblattangaben ... 186
6.2 Verschaltung von Solarmodulen ... 186
6.2.1 Parallelschaltung von Strings ... 186
6.2.2 Was passiert bei Verkabelungsfehlern? ... 188
6.2.3 Verluste durch Mismatching ... 189
6.2.4 Schlaue Verschaltung bei Verschattung ... 189
6.3 Gleichstrom-Komponenten ... 192
6.3.1 Prinzipieller Anlagenaufbau ... 192
6.3.2 Gleichstromverkabelung ... 193
6.4 Anlagentypen ... 195
6.4.1 Freilandanlagen ... 195
6.4.2 Flachdachanlagen ... 197
6.4.3 Schrägdachanlagen ... 199
6.4.4 Fassadenanlagen ... 200
6.4.5 Schwimmende Anlagen ... 202
6.4.6 Agri-Photovoltaik ... 204
6.4.6.1 Kulturenschutzsysteme ... 204
6.4.6.2 Weitere Projekte und Technologien ... 206
6.4.6.3 Nutzung vertikaler bifacialer Agri-PV-Systeme ... 207
6.4.6.4 Installation einer Großanlage ... 209
6.4.6.5 Einsatz von bifacialen Solarzäunen ... 209
6.4.7 Photovoltaik-Kraftwerke außerhalb des Erneuerbare-Energien-Gesetzes ... 210
6.4.8 Vereinbarkeit von Ökonomie und Ökologie ... 210

7 Systemtechnik netzgekoppelter Anlagen 213

7.1 Solargenerator und Last 213
7.1.1 Widerstandslast 213
7.1.2 DC/DC-Wandler 214
7.1.2.1 Idee 214
7.1.2.2 Tiefsetzsteller 215
7.1.2.3 Hochsetzsteller 217
7.1.3 MPP-Tracker 219
7.2 Aufbau netzgekoppelter Anlagen 220
7.2.1 Einspeisevarianten 220
7.2.2 Anlagenkonzepte 221
7.3 Aufbau von Wechselrichtern 223
7.3.1 Aufgaben des Wechselrichters 223
7.3.2 Netzgeführte und selbstgeführte Wechselrichter 224
7.3.3 Trafoloser Wechselrichter 224
7.3.4 Wechselrichter mit Netztrafo 226
7.3.5 Wechselrichter mit HF-Trafo 227
7.3.6 Dreiphasige Einspeisung 228
7.3.7 Weitere schlaue Konzepte 229
7.4 Wirkungsgrad von Wechselrichtern 230
7.4.1 Umwandlungswirkungsgrad 231
7.4.2 Europäischer Wirkungsgrad 232
7.4.3 Gesamtwirkungsgrad 234
7.4.4 Schlaues MPP-Tracking 234
7.5 Dimensionierung von Wechselrichtern 235
7.5.1 Leistungsdimensionierung 235
7.5.2 Spannungsdimensionierung 236
7.5.3 Stromdimensionierung 237
7.6 Anforderungen der Netzbetreiber 237
7.6.1 Vermeidung von Inselbetrieb 238
7.6.2 Maximale Einspeiseleistung 239
7.6.3 Blindleistungsbereitstellung 240
7.7 Sicherheitsaspekte 243
7.7.1 Erdung des Generators und Blitzschutz 243
7.7.2 Brandschutz 244

8 Speicherung von Solarstrom ... 245
8.1 Prinzip der Solarstromspeicherung ... 245
8.2 Akkumulatoren ... 246
8.2.1 Blei-Säure-Batterie ... 247
8.2.1.1 Prinzip und Aufbau ... 247
8.2.1.2 Typen von Bleiakkus ... 249
8.2.1.3 Akkukapazität ... 251
8.2.1.4 Spannungsverlauf ... 252
8.2.1.5 Fazit ... 252
8.2.2 Laderegler ... 252
8.2.2.1 Serienregler ... 253
8.2.2.2 Shuntregler ... 253
8.2.2.3 MPP-Laderegler ... 254
8.2.2.4 Produktbeispiele ... 254
8.2.3 Lithium-Ionen-Batterie ... 255
8.2.3.1 Prinzip und Aufbau ... 256
8.2.3.2 Reaktionen beim Lade- und Entladevorgang ... 257
8.2.3.3 Materialkombinationen und Zellspannung ... 258
8.2.3.4 Sicherheitsaspekte ... 259
8.2.3.5 Ladeverfahren ... 259
8.2.3.6 Bauformen ... 260
8.2.3.7 Lebensdauer ... 261
8.2.3.8 Einsatzbereiche ... 262
8.2.3.9 Fazit ... 262
8.2.4 Natrium-Schwefel-Batterie ... 262
8.2.4.1 Prinzip und Aufbau ... 262
8.2.4.2 Besonderheiten der Hochtemperatur-Batterie ... 263
8.2.4.3 Natrium-Schwefel-Batterien in der Praxis ... 264
8.2.4.4 Fazit ... 265
8.2.5 Redox-Flow-Batterie ... 265
8.2.5.1 Prinzip und Aufbau ... 265
8.2.5.2 Verhalten im praktischen Einsatz ... 268
8.2.5.3 Fortschritte bei Redox-Flow-Batterien ... 269
8.2.5.4 Konkrete Anwendungen ... 269
8.2.5.5 Fazit ... 270
8.2.6 Vergleich der verschiedenen Batterietypen ... 270

8.3 Speichereinsatz zur Erhöhung des Eigenverbrauchs 270
8.3.1 Eigenverbrauch in Privathaushalten 271
8.3.1.1 Lösung ohne Speicher 272
8.3.1.2 Lösung mit Speicher 273
8.3.1.3 Beispiele von Speichersystemen 274
8.3.1.4 Was kostet die Speicherung einer Kilowattstunde? 274
8.3.1.5 Das Smart Home 277
8.3.2 Eigenverbrauch in Gewerbebetrieben 277
8.3.2.1 Beispiel Produktionsbetrieb 277
8.3.2.2 Beispiel Krankenhaus 278
8.4 Speichereinsatz aus Sicht des Netzes 280
8.4.1 Peak-Shaving durch Speicher 280
8.4.2 Marktanreizprogramm für Solarspeicher 280
8.5 Das Dream-Team Photovoltaik und Elektroauto 284
8.5.1 Vergleich der Wirkungsgrade 284
8.5.2 Aktuelle Situation 284
8.5.3 Die Tücken der Ladetechnik 285
8.5.4 Visualisierung des Ladezustands 286
8.5.5 Elektroauto als Stromspeicher? 287
8.6 Inselsysteme 287
8.6.1 Prinzipieller Aufbau 287
8.6.2 Beispiele von Inselsystemen 288
8.6.2.1 Solar Home Systems 288
8.6.2.2 Hybridsysteme 289
8.6.3 Dimensionierung von Inselanlagen 291
8.6.3.1 Erfassung des Stromverbrauchs 291
8.6.3.2 Dimensionierung des PV-Generators 292
8.6.3.3 Auswahl des Akkus 294

9 Photovoltaische Messtechnik 296

9.1 Messung solarer Strahlung 296
9.1.1 Globalstrahlungssensoren 296
9.1.1.1 Pyranometer 296
9.1.1.2 Strahlungssensoren aus Solarzellen 298
9.1.2 Messung von Direkt- und Diffusstrahlung 299

9.2 Leistungsmessung von Solarmodulen 300
9.2.1 Aufbau eines Solarmodul-Leistungsprüfstands 300
9.2.2 Güteklassen von Modulflashern 301
9.2.3 Bestimmung der Modulparameter 302
9.3 Peakleistungsmessung vor Ort 303
9.3.1 Prinzip der Peakleistungsmessung 303
9.3.2 Möglichkeiten und Grenzen des Messprinzips 304
9.4 Thermographie-Messtechnik 305
9.4.1 Prinzip der Infrarot-Temperaturmessung 305
9.4.2 Hell-Thermographie von Solarmodulen 306
9.4.3 Dunkel-Thermographie 308
9.5 Elektrolumineszenz-Messtechnik 309
9.5.1 Messprinzip 309
9.5.2 Beispiele von Aufnahmen 310
9.5.3 LowCost-Outdoor-Elektrolumineszenz-Untersuchungen 313
9.6 Untersuchungen zur spannungsinduzierten Degradation (PID) 315
9.6.1 Erklärung des PID-Effektes 316
9.6.2 Prüfung von Modulen auf PID 317
9.6.3 EL-Untersuchungen zu PID 319
9.7 String-Dunkelkennlinien-Technik 320
9.7.1 Motivation 320
9.7.2 Messmethode 321
9.7.3 Detektion von PID 321
9.7.4 Detektion von defekten Bypassdioden und Zellverbindern 322
9.7.5 Fazit 325

10 Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen 326
10.1 Planung und Dimensionierung 326
10.1.1 Standortwahl 326
10.1.2 Verschattungen 327
10.1.2.1 Verschattungsanalyse 327
10.1.2.2 Nahverschattungen 328
10.1.2.3 Eigenverschattungen 330
10.1.2.4 Optimierte Stringverschaltung 331
10.1.3 Anlagendimensionierung mit Simulationsprogrammen 331
10.1.3.1 Wechselrichter-Auslegungstools 331
10.1.3.2 Simulationsprogramme für Photovoltaikanlagen 331

10.2 Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen 334
10.2.1 Das Erneuerbare-Energien-Gesetz 334
10.2.2 Renditeberechnung 334
10.2.2.1 Eingangsgrößen 334
10.2.2.2 Amortisationszeit 335
10.2.2.3 Objektrendite 336
10.2.2.4 Renditeerhöhung durch Eigenverbrauch des Solarstroms 337
10.2.2.5 Weitere Einflussgrößen 338
10.3 Überwachung, Monitoring und Visualisierung 338
10.3.1 Methoden zur Anlagenüberwachung 339
10.3.2 Monitoring von PV-Anlagen 339
10.3.2.1 Spezifische Erträge 339
10.3.2.2 Verluste 340
10.3.2.3 Performance Ratio 341
10.3.2.4 Konkrete Maßnahmen zum Monitoring 341
10.3.3 Visualisierung 342
10.4 Betriebsergebnisse von konkreten Anlagen 343
10.4.1 Schrägdachanlage aus dem Jahre 1996 343
10.4.2 Schrägdachanlage aus dem Jahre 2002 345
10.4.3 Flachdachanlage aus dem Jahre 2008 346

11 Zukünftige Entwicklung 348
11.1 Potential der Photovoltaik 348
11.1.1 Theoretisches Potential 348
11.1.2 Technisch nutzbare Strahlungsenergie 348
11.1.3 Technisches Stromerzeugungspotential 350
11.1.4 Photovoltaik versus Biomasse 351
11.2 Effiziente Förderinstrumente 352
11.3 Preis- und Vergütungsentwicklung 354
11.3.1 Preisentwicklung von Solarmodulen 354
11.3.2 Entwicklung der Einspeisevergütung 355
11.4 Erneuerbare Energien im heutigen Stromversorgungssystem 356
11.4.1 Struktur der Stromerzeugung 357
11.4.2 Kraftwerksarten und Regelenergie 358
11.4.3 Zusammenspiel aus Sonne und Wind 359
11.4.4 Exemplarische Stromproduktionsverläufe 361

11.5 Überlegungen zur zukünftigen Energieversorgung 362
11.5.1 Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien 362
11.5.2 Optionen zur Speicherung von elektrischer Energie 367
11.5.2.1 Pumpspeicherwerke 367
11.5.2.2 Druckluftspeicher 368
11.5.2.3 Batteriespeicherung 368
11.5.2.4 Nutzung der Elektromobilität für das Stromnetz 369
11.5.2.5 Wasserstoff als Speicher 369
11.5.2.6 Power-to-Gas: Methanisierung 370
11.5.3 Alternativen zur Speicherung 371
11.5.3.1 Aktives Lastmanagement durch Smart Grids 371
11.5.3.2 Ausbau des Stromnetzes 372
11.5.3.3 Begrenzung der Einspeiseleistung 372
11.5.3.4 Einsatz flexibler Kraftwerke 372
11.6 Fazit 372

12 Übungsaufgaben 374

13 Anhang 385
13.1 Einfluss von Ausrichtung und Neigung auf die Jahresstrahlungssumme an verschiedenen Standorten 385
13.1.1 Standort Hamburg 386
13.1.2 Standort München 387
13.1.3 Standort Bern 388
13.1.4 Standort Marseille 389
13.1.5 Standort Kairo 390
13.2 Checkliste zu Planung, Installation und Betrieb einer Photovoltaikanlage 391
13.3 Im Buch verwendete Abkürzungen 393
13.4 Physikalische Konstanten/Materialparameter 394

Literatur 395

Index 405