

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>19</b>
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 .....	32
1.5	Photovoltaik – das Wichtigste in Kürze .....	32
1.5.1	Was bedeutet „Photovoltaik“? .....	32
1.5.2	Was sind Solarzellen und Solarmodule? .....	33
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 .....	38

<b>2</b>	<b>Strahlungsangebot der Sonne</b>	<b>41</b>
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	50
2.3.1	Sonnendeklination	50
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
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Halbleiterphysik</b>	<b>64</b>
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 .....	81
3.6.1.2	Direkte und indirekte Halbleiter .....	82
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 .....** 88

4.1	Betrachtung der Photodiode .....	88
4.1.1	Aufbau und Kennlinie .....	88
4.1.2	Ersatzschaltbild .....	89
4.2	Funktionsweise der Solarzelle .....	90
4.2.1	Prinzipieller Aufbau .....	90
4.2.2	Rekombination und Diffusionslänge .....	91
4.2.3	Was passiert in den einzelnen Zellbereichen? .....	92
4.2.4	Back-Surface-Field .....	94
4.3	Photostrom .....	94
4.3.1	Absorptionswirkungsgrad .....	95
4.3.2	Quantenwirkungsgrad .....	96
4.3.3	Spektrale Empfindlichkeit .....	96
4.4	Kennlinie und Kenngrößen .....	97
4.4.1	Kurzschlussstrom $I_K$ .....	98
4.4.2	Leerlaufspannung $U_L$ .....	99
4.4.3	Maximum Power Point (MPP) .....	99
4.4.4	Füllfaktor $FF$ .....	100
4.4.5	Wirkungsgrad $\eta$ .....	100
4.4.6	Temperaturabhängigkeit der Solarzelle .....	100
4.5	Elektrische Beschreibung realer Solarzellen .....	103
4.5.1	Vereinfachtes Modell .....	103
4.5.2	Standard-Modell (Ein-Dioden-Modell) .....	103
4.5.3	Zwei-Dioden-Modell .....	104

4.5.4	Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes .....	105
4.6	Betrachtungen zum Wirkungsgrad .....	108
4.6.1	Spektraler Wirkungsgrad .....	108
4.6.2	Theoretischer Wirkungsgrad .....	112
4.6.3	Verluste in der realen Solarzelle .....	113
4.6.3.1	Optische Verluste .....	113
4.6.3.2	Elektrische Verluste .....	116
4.7	Hocheffizienzzellen .....	117
4.7.1	Buried-Contact-Zelle .....	117
4.7.2	Punktkontakt-Zelle (IBC-Zelle) .....	118
4.7.3	PERL-Zelle .....	119

## **5 Zellentechnologien .....121**

5.1	Herstellung kristalliner Silizium-Zellen .....	121
5.1.1	Vom Sand zum Silizium .....	121
5.1.1.1	Herstellung von Polysilizium .....	121
5.1.1.2	Herstellung von monokristallinem Silizium .....	123
5.1.1.3	Herstellung von multikristallinem Silizium .....	124
5.1.1.4	Herstellung von quasimonokristallinem Silizium .....	125
5.1.2	Vom Silizium zum Wafer .....	125
5.1.2.1	Waferherstellung .....	125
5.1.2.2	Wafer aus Foliensilizium .....	126
5.1.3	Herstellung von Standard-Solarzellen .....	127
5.1.4	Herstellung von Solarmodulen .....	129
5.2	Zellen aus amorphem Silizium .....	131
5.2.1	Eigenschaften von amorphem Silizium .....	131
5.2.2	Herstellungsverfahren .....	132
5.2.3	Aufbau der pin-Zelle .....	132
5.2.4	Staebler-Wronski-Effekt .....	134
5.2.5	Stapelzellen .....	135
5.2.6	Kombizellen aus mikromorphem Material .....	137
5.2.7	Integrierte Serienschaltung .....	138
5.3	Weitere Dünnschichtzellen .....	139
5.3.1	Zellen aus Cadmium-Tellurid .....	139
5.3.2	CIS-Zellen .....	140
5.4	Hybride Waferzellen .....	142
5.4.1	Kombination von c-Si und a-Si (HIT-Zelle) .....	142
5.4.2	Stapelzellen aus III/V-Halbleitern .....	143

5.5	Sonstige Zellenkonzepte .....	144
5.6	Konzentratorsysteme.....	145
5.6.1	Prinzip der Strahlungsbündelung .....	145
5.6.2	Was bringt die Konzentration? .....	146
5.6.3	Beispiele von Konzentratorsystemen .....	147
5.6.4	Vor- und Nachteile von Konzentratorsystemen .....	148
5.7	Ökologische Fragestellungen zur Zellen- und Modulherstellung .....	148
5.7.1	Umweltauswirkungen bei Herstellung und Betrieb .....	148
5.7.1.1	Beispiel Cadmium-Tellurid .....	148
5.7.1.2	Beispiel Silizium .....	149
5.7.2	Verfügbarkeit der Materialien .....	150
5.7.2.1	Silizium .....	150
5.7.2.2	Cadmium-Tellurid .....	150
5.7.2.3	CIS.....	151
5.7.2.4	III/V-Halbleiter .....	151
5.7.3	Energierücklaufzeit und Erntefaktor .....	152
5.8	Zusammenfassung .....	155

## **6 Solarmodule und Solargeneratoren .....158**

6.1	Eigenschaften von Solarmodulen .....	158
6.1.1	Solarzellenkennlinie in allen vier Quadranten.....	158
6.1.2	Parallelschaltung von Zellen .....	159
6.1.3	Reihenschaltung von Zellen .....	160
6.1.4	Einsatz von Bypassdioden .....	161
6.1.4.1	Reduzierung von Verschattungsverlusten .....	161
6.1.4.2	Vermeidung von Hotspots .....	163
6.1.5	Typische Kennlinien von Solarmodulen .....	166
6.1.5.1	Variation der Bestrahlungsstärke .....	166
6.1.5.2	Temperaturverhalten .....	167
6.1.6	Sonderfall Dünnschichtmodule .....	168
6.1.7	Beispiele von Datenblattangaben .....	170
6.2	Verschaltung von Solarmodulen.....	171
6.2.1	Parallelschaltung von Strings.....	171
6.2.2	Was passiert bei Verkabelungsfehlern? .....	171
6.2.3	Verluste durch Mismatching .....	172
6.2.4	Schlaue Verschaltung bei Verschattung.....	173
6.3	Gleichstrom-Komponenten .....	175
6.3.1	Prinzipieller Anlagenaufbau.....	175

- 6.3.2 Gleichstromverkabelung..... 177
- 6.4 Anlagentypen..... 178
  - 6.4.1 Freilandanlagen..... 179
  - 6.4.2 Flachdachanlagen..... 181
  - 6.4.3 Schrägdachanlagen..... 182
  - 6.4.4 Fassadenanlagen..... 184

**7      Systemtechnik netzgekoppelter Anlagen .....186**

- 7.1 Solargenerator und Last ..... 186
  - 7.1.1 Widerstandslast ..... 186
  - 7.1.2 DC/DC-Wandler ..... 187
    - 7.1.2.1 Idee..... 187
    - 7.1.2.2 Tiefsetzsteller ..... 188
    - 7.1.2.3 Hochsetzsteller ..... 190
  - 7.1.3 MPP-Tracker ..... 192
- 7.2 Aufbau netzgekoppelter Anlagen ..... 193
  - 7.2.1 Einspeisevarianten ..... 193
  - 7.2.2 Anlagenkonzepte ..... 194
- 7.3 Aufbau von Wechselrichtern ..... 196
  - 7.3.1 Aufgaben des Wechselrichters ..... 196
  - 7.3.2 Netzgeführte und selbstgeführte Wechselrichter..... 196
  - 7.3.3 Trafoloser Wechselrichter..... 197
  - 7.3.4 Wechselrichter mit Netztrafo..... 199
  - 7.3.5 Wechselrichter mit HF-Trafo ..... 199
  - 7.3.6 Dreiphasige Einspeisung..... 201
  - 7.3.7 Weitere schlaue Konzepte ..... 202
- 7.4 Wirkungsgrad von Wechselrichtern ..... 203
  - 7.4.1 Umwandlungswirkungsgrad ..... 203
  - 7.4.2 Europäischer Wirkungsgrad ..... 205
  - 7.4.3 Schlaues MPP-Tracking ..... 207
- 7.5 Dimensionierung von Wechselrichtern ..... 207
  - 7.5.1 Leistungsdimensionierung ..... 207
  - 7.5.2 Spannungsdimensionierung ..... 208
  - 7.5.3 Stromdimensionierung ..... 209
- 7.6 Anforderungen der Netzbetreiber ..... 210
  - 7.6.1 Vermeidung von Inselbetrieb ..... 210
  - 7.6.2 Maximale Einspeiseleistung..... 212
  - 7.6.3 Blindleistungsbereitstellung..... 212

7.7	Sicherheitsaspekte .....	215
7.7.1	Erdung des Generators und Blitzschutz .....	215
7.7.2	Brandschutz .....	216

## **8 Speicherung von Solarstrom .....** **217**

8.1	Prinzip der Solarstromspeicherung .....	217
8.2	Akkumulatoren .....	218
8.2.1	Blei-Säure-Batterie .....	219
8.2.1.1	Prinzip und Aufbau .....	219
8.2.1.2	Typen von Bleiakkus .....	221
8.2.1.3	Akkukapazität .....	223
8.2.1.4	Spannungsverlauf .....	224
8.2.1.5	Fazit .....	224
8.2.2	Laderegler .....	224
8.2.2.1	Serienregler .....	225
8.2.2.2	Shuntregler .....	225
8.2.2.3	MPP-Laderegler .....	226
8.2.2.4	Produktbeispiele .....	226
8.2.3	Lithium-Ionen-Batterie .....	227
8.2.3.1	Prinzip und Aufbau .....	228
8.2.3.2	Reaktionen beim Lade- und Entladevorgang .....	229
8.2.3.3	Materialkombinationen und Zellspannung .....	230
8.2.3.4	Sicherheitsaspekte .....	231
8.2.3.5	Ladeverfahren .....	231
8.2.3.6	Bauformen .....	232
8.2.3.7	Lebensdauer .....	233
8.2.3.8	Einsatzbereiche .....	234
8.2.3.9	Fazit .....	234
8.2.4	Natrium-Schwefel-Batterie .....	234
8.2.4.1	Prinzip und Aufbau .....	234
8.2.4.2	Besonderheiten der Hochtemperatur-Batterie .....	235
8.2.4.3	Natrium-Schwefel-Batterien in der Praxis .....	236
8.2.4.4	Fazit .....	237
8.2.5	Redox-Flow-Batterie .....	237
8.2.5.1	Prinzip und Aufbau .....	237
8.2.5.2	Verhalten im praktischen Einsatz .....	240
8.2.5.3	Konkrete Anwendungen .....	241
8.2.5.4	Fazit .....	241

8.2.6	Vergleich der verschiedenen Batterietypen .....	242
8.3	Speichereinsatz zur Erhöhung des Eigenverbrauchs .....	243
8.3.1	Eigenverbrauch in Privathaushalten .....	243
8.3.1.1	Lösung ohne Speicher .....	243
8.3.1.2	Lösung mit Speicher .....	244
8.3.1.3	Beispiele von Speichersystemen .....	245
8.3.1.4	Was kostet die Speicherung einer Kilowattstunde? .....	245
8.3.1.5	Das Smart Home .....	248
8.3.2	Eigenverbrauch in Gewerbebetrieben .....	249
8.3.2.1	Beispiel Produktionsbetrieb .....	249
8.3.2.2	Beispiel Krankenhaus .....	249
8.4	Speichereinsatz aus Sicht des Netzes .....	250
8.4.1	Peak-Shaving durch Speicher .....	251
8.4.2	Marktanreizprogramm für Solarspeicher .....	251
8.5	Inselsysteme .....	254
8.5.1	Prinzipieller Aufbau .....	254
8.5.2	Beispiele von Inselsystemen .....	255
8.5.2.1	Solar Home Systems .....	255
8.5.2.2	Hybridsysteme .....	256
8.5.3	Dimensionierung von Inselanlagen .....	257
8.5.3.1	Erfassung des Stromverbrauchs .....	258
8.5.3.2	Dimensionierung des PV-Generators .....	258
8.5.3.3	Auswahl des Akkus .....	260
<b>9</b>	<b>Photovoltaische Messtechnik .....</b>	<b>263</b>
9.1	Messung solarer Strahlung .....	263
9.1.1	Globalstrahlungssensoren .....	263
9.1.1.1	Pyranometer .....	263
9.1.1.2	Strahlungssensoren aus Solarzellen .....	265
9.1.2	Messung von Direkt- und Diffusstrahlung .....	266
9.2	Leistungsmessung von Solarmodulen .....	267
9.2.1	Aufbau eines Solarmodul-Leistungsprüfstands .....	267
9.2.2	Güteklassen von Modulflashern .....	268
9.2.3	Bestimmung der Modulparameter .....	269
9.3	Peakleistungsmessung vor Ort .....	270
9.3.1	Prinzip der Peakleistungsmessung .....	270
9.3.2	Möglichkeiten und Grenzen des Messprinzips .....	271
9.4	Thermographie-Messtechnik .....	272



9.4.1	Prinzip der Infrarot-Temperaturmessung .....	272
9.4.2	Hell-Thermographie von Solarmodulen .....	273
9.4.3	Dunkel-Thermographie .....	275
9.5	Elektrolumineszenz-Messtechnik .....	276
9.5.1	Messprinzip .....	276
9.5.2	Beispiele von Aufnahmen .....	277
9.5.3	LowCost-Outdoor-Elektrolumineszenz-Untersuchungen .....	279
9.6	Untersuchungen zur spannungsinduzierten Degradation (PID) .....	282
9.6.1	Erklärung des PID-Effektes .....	282
9.6.2	Prüfung von Modulen auf PID .....	284
9.6.3	EL-Untersuchungen zu PID .....	285

## **10 Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen .....287**

10.1	Planung und Dimensionierung .....	287
10.1.1	Standortwahl .....	287
10.1.2	Verschattungen .....	288
10.1.2.1	Verschattungsanalyse .....	288
10.1.2.2	Nahverschattungen .....	289
10.1.2.3	Eigenverschattungen .....	290
10.1.2.4	Optimierte Stringverschaltung .....	292
10.1.3	Anlagendimensionierung mit Simulationsprogrammen .....	292
10.1.3.1	Wechselrichter-Auslegungstools .....	292
10.1.3.2	Simulationsprogramme für Photovoltaikanlagen .....	292
10.2	Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen .....	295
10.2.1	Das Erneuerbare-Energien-Gesetz .....	295
10.2.2	Renditeberechnung .....	295
10.2.2.1	Eingangsgrößen .....	296
10.2.2.2	Amortisationszeit .....	296
10.2.2.3	Objektrendite .....	297
10.2.2.4	Renditeerhöhung durch Eigenverbrauch des Solarstroms .....	299
10.2.2.5	Weitere Einflussgrößen .....	299
10.3	Überwachung, Monitoring und Visualisierung .....	300
10.3.1	Methoden zur Anlagenüberwachung .....	300
10.3.2	Monitoring von PV-Anlagen .....	300
10.3.2.1	Spezifische Erträge .....	300
10.3.2.2	Verluste .....	302
10.3.2.3	Performance Ratio .....	302
10.3.2.4	Konkrete Maßnahmen zum Monitoring .....	303

10.3.3 Visualisierung .....	303
10.4 Betriebsergebnisse von konkreten Anlagen .....	304
10.4.1 Schrägdachanlage aus dem Jahre 1996 .....	304
10.4.2 Schrägdachanlage aus dem Jahre 2002 .....	306
10.4.3 Flachdachanlage aus dem Jahre 2008 .....	307

## **11 Zukünftige Entwicklung.....309**

11.1 Potential der Photovoltaik .....	309
11.1.1 Theoretisches Potential .....	309
11.1.2 Technisch nutzbare Strahlungsenergie .....	309
11.1.3 Technisches Stromerzeugungspotential .....	311
11.1.4 Photovoltaik versus Biomasse .....	312
11.2 Effiziente Förderinstrumente .....	313
11.3 Preis- und Vergütungsentwicklung .....	314
11.3.1 Preisentwicklung von Solarmodulen .....	314
11.3.2 Entwicklung der Einspeisevergütung .....	316
11.4 Erneuerbare Energien im heutigen Stromversorgungssystem .....	317
11.4.1 Struktur der Stromerzeugung .....	317
11.4.2 Kraftwerksarten und Regelenergie .....	318
11.4.3 Zusammenspiel aus Sonne und Wind .....	319
11.4.4 Exemplarische Stromproduktionsverläufe .....	320
11.5 Überlegungen zur zukünftigen Energieversorgung .....	322
11.5.1 Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien .....	322
11.5.2 Optionen zur Speicherung von elektrischer Energie .....	325
11.5.2.1 Pumpspeicherwerke .....	325
11.5.2.2 Druckluftspeicher .....	326
11.5.2.3 Batteriespeicherung .....	326
11.5.2.4 Elektromobilität .....	327
11.5.2.5 Wasserstoff als Speicher .....	327
11.5.2.6 Power-to-Gas: Methanisierung .....	327
11.5.3 Alternativen zur Speicherung .....	328
11.5.3.1 Aktives Lastmanagement durch Smart Grids .....	328
11.5.3.2 Ausbau des Stromnetzes .....	329
11.5.3.3 Begrenzung der Einspeiseleistung .....	329
11.5.3.4 Einsatz flexibler Kraftwerke .....	329
11.6 Fazit .....	329

## **12 Übungsaufgaben .....331**

<b>13</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>342</b>
13.1	Einfluss von Ausrichtung und Neigung auf die Jahresstrahlungssumme an verschiedenen Standorten.....	342
13.1.1	Standort Hamburg.....	343
13.1.2	Standort München.....	344
13.1.3	Standort Bern.....	345
13.1.4	Standort Wien .....	346
13.1.5	Standort Marseille .....	347
13.1.6	Standort Kairo .....	348
13.2	Checkliste zu Planung, Installation und Betrieb einer Photovoltaikanlage.....	349
13.3	Im Buch verwendete Abkürzungen .....	351
13.4	Physikalische Konstanten/Materialparameter .....	353
	<b>Literatur .....</b>	<b>355</b>
	<b>Index .....</b>	<b>365</b>