

# Inhaltsverzeichnis

<b>Wasserstoff als Energieträger – Ein Leitfaden (C. J. Winter)</b> . . . . .	1
<b>Teil A: Bedeutung und Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff</b> . . . . .	11
<b>1 Energieversorgungsstrukturen und die Rolle gasförmiger Energieträger (J. Nitsch)</b> . . . . .	12
1.1 Struktur der Energienachfrage . . . . .	12
1.2 Der Energieverbrauch im weltweiten Vergleich . . . . .	15
1.3 Verbraucherstrukturen und ihr Einfluß auf die Nutzungsmöglichkeiten der einzelnen Energieträger . . . . .	18
1.4 Energieressourcen und die Reichweite der verfügbaren Energiequellen . . . . .	21
1.5 Anforderungen an zukünftige Energiesysteme . . . . .	26
Literatur zu Kapitel 1 . . . . .	27
<b>2 Techniken zur energetischen Verwendung von Wasserstoff (W. Peschka)</b> . . . . .	29
2.1 Verbrennung von Wasserstoff . . . . .	29
2.1.1 Reaktionsmechanismen und Schadstoffbildung . . . . .	29
2.1.2 Großfeuerungen mit Wasserstoff . . . . .	32
2.1.3 Wasserstoff-Luft-Brenner für Anwendungen in Haushalt und Gewerbe . . . . .	33
2.1.4 Katalytischer Heizer . . . . .	34
2.1.5 Gasturbinen . . . . .	36
2.1.6 Verbrennungskraftmaschinen mit innerer Verbrennung . . . . .	38
2.2 Brennstoffbatterien . . . . .	40
2.3 Stationäre Nutzungssysteme für Wasserstoff . . . . .	41
2.3.1 Gasmotoren und Brennstoffbatterien zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung . . . . .	41
2.3.2 Dezentrale Hausenergiesysteme . . . . .	43
2.3.3 Speicher- und Spitzenlastkraftwerke mit Wasserstoff . . . . .	44
2.4 Wasserstoff als Kraftstoff . . . . .	47
2.4.1 Wasserstoff in der Luftfahrt . . . . .	48
2.4.2 Wasserstoff für Kraftfahrzeuge . . . . .	49
2.4.3 Weitere Anwendungsmöglichkeiten . . . . .	51
Literatur zu Kapitel 2 . . . . .	51
<b>3 Wasserstoff als Rohstoff (W. Schnurnberger)</b> . . . . .	56
3.1 Heutige Situation und zukünftige Entwicklung . . . . .	56

3.2	Nichtenergetische Nutzung in der chemischen Industrie . . . . .	59
3.2.1	Großtechnische Synthesen mit Wasserstoff . . . . .	59
3.2.2	Spezielle Wasserstoffverbraucher . . . . .	62
3.2.3	Direktreduktionsverfahren der Eisenherstellung . . . . .	64
3.3	Indirekt energetische Nutzung von Wasserstoff . . . . .	66
3.3.1	Hydrierende Raffinerieverfahren . . . . .	67
3.3.2	Hydrierende Kohleveredlung . . . . .	71
3.3.3	Kohlenstoffnutzungsgrad und Primärenergieeinsatz . . . . .	74
3.4	Nichtfossiler Wasserstoff als Rohstoff . . . . .	75
	Literatur zu Kapitel 3 . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Sicherheitsaspekte von Wasserstoff als Energieträger und Energiespeicher</b> (M. Fischer, H. Eichert) . . . . .	79
4.1	Einführung . . . . .	79
4.2	Sicherheitstechnische Kenngrößen und Eigenschaften . . . . .	80
4.2.1	Zündgrenzen und Zündenergie . . . . .	80
4.2.2	Löschabstand . . . . .	83
4.2.3	Verbrennungsgeschwindigkeit . . . . .	83
4.2.4	Flammentemperatur . . . . .	85
4.2.5	Detonationsgeschwindigkeit und Detonationsüberdruck . . . . .	85
4.2.6	Explosionsenergie . . . . .	86
4.3	Deflagrations- und Detonationsverhalten . . . . .	87
4.4	Zusammenfassung . . . . .	90
	Literatur zu Kapitel 4 . . . . .	91
<b>Teil B: Herstellung von Wasserstoff aus nichtfossiler Primärenergie . . . . .</b>		<b>93</b>
<b>5</b>	<b>Photovoltaische Stromerzeugung (G. Bauer) . . . . .</b>	<b>94</b>
5.1	Physikalische Mechanismen . . . . .	94
5.1.1	Reflexion und Absorption . . . . .	94
5.1.2	Direkte und indirekte Halbleiter . . . . .	95
5.1.3	Absorption und Überschußenergie . . . . .	96
5.1.4	Rekombination . . . . .	96
5.1.5	Lokale Trennung von Ladungsträgern . . . . .	97
5.1.6	Sperrende Kontakte . . . . .	97
5.1.7	Diodenkennlinie . . . . .	99
5.1.8	Interne Verluste und maximal erreichbarer Wirkungsgrad . . . . .	100
5.1.9	Einfluß äußerer Parameter auf die Diodenkennlinie . . . . .	102
5.1.10	Methoden zur Erhöhung des Wirkungsgrades . . . . .	105
5.2	Solarzellentechnologie . . . . .	108
5.2.1	Siliziumtechnologie . . . . .	109
5.2.2	Kenndaten von Siliziumsolarzellen . . . . .	112
5.2.3	Dünnschichttechnik . . . . .	112
5.2.4	Galliumarsenid and Galliumaluminiumarsenid . . . . .	123
5.3	Solarzellenmodule und Solarzellengeneratoren . . . . .	124
5.3.1	Verschaltung von Zellen zu Modulen . . . . .	124

5.3.2	Generatoren . . . . .	126
5.4	Stand der Photovoltaik . . . . .	128
5.4.1	Randbedingungen und Forderungen . . . . .	128
5.4.2	Derzeitiger Entwicklungsstand . . . . .	128
5.5	Zielvorstellungen und künftige Entwicklungen . . . . .	130
	Literatur zu Kapitel 5 . . . . .	132
<b>6</b>	<b>Thermische und mechanische Stromerzeugung (J. Nitsch) . . . . .</b>	<b>136</b>
6.1	Thermodynamik der solarthermischen Energiewandlung . . . . .	136
6.2	Bereitstellung von Hochtemperaturwärme mittels Solarenergie . . . . .	139
6.2.1	Solarturmkraftwerke . . . . .	139
6.2.2	Paraboloidspiegel . . . . .	143
6.3	Wärmebereitstellung mittels Kernenergie . . . . .	145
6.4	Kreisprozesse zur Elektrizitätsbereitstellung . . . . .	148
6.5	Mechanische Energiewandlung zur Elektrizitätsbereitstellung . . . . .	152
6.5.1	Elektrizität aus Wasserkraft . . . . .	152
6.5.2	Elektrizität aus Wind . . . . .	153
6.6	Weitere indirekte Möglichkeiten der Solarenergienutzung . . . . .	157
6.7	Einsatzmöglichkeiten zur Wasserstoffherzeugung . . . . .	159
	Literatur zu Kapitel 6 . . . . .	161
<b>7</b>	<b>Verfahren zur Wasserspaltung (H. Wendt 7.1 bis 7.7; G. Bauer 7.8) . . . . .</b>	<b>162</b>
7.1	Überblick . . . . .	162
7.2	Thermodynamik der Wasserspaltung . . . . .	164
7.2.1	Tiefemperaturwasserspaltung ( $T < 2000$ K) . . . . .	164
7.2.2	Hochtemperaturwasserspaltung ( $T > 2000$ K) . . . . .	165
7.2.3	Thermodynamische Daten der chemischen Wasserspaltung . . . . .	166
7.3	Energiehaushalt chemisch-technischer Prozesse . . . . .	166
7.3.1	Energieverluste chemischer Prozesse nach dem ersten Hauptsatz . . . . .	167
7.3.2	Exergieverluste chemischer Prozesse nach dem zweiten Hauptsatz . . . . .	168
7.4	Konventionelle Prozesse zur Wasserspaltung mit Kohlenwasserstoffen oder Kohle als Primärenergiequelle . . . . .	169
7.4.1	Dampfspaltungsverfahren und Vergasungsverfahren . . . . .	169
7.4.2	Primärprozesse . . . . .	170
7.4.3	CO-Konvertierung . . . . .	172
7.4.4	Abschließende Trenn- und Reinigungsoperationen . . . . .	172
7.4.5	Energieausbeuten unterschiedlicher Verfahren der Wasserstoffdarstellung aus fossilen Brennstoffen . . . . .	172
7.5	Wasserspaltung durch Elektrolyse . . . . .	174
7.5.1	Konventionelle alkalische Wasserelektrolyse . . . . .	175
7.5.2	Innovation in der Technik der alkalischen Wasserelektrolysen . . . . .	180
7.5.3	Strom-Spannungs-Charakteristik neuer Hochstromelektrolysezellen . . . . .	184
7.5.4	Wirtschaftliche Implikationen der technischen Neuerungen für die alkalische Wasserelektrolyse . . . . .	185
7.6	Wasserspaltung durch thermochemische Kreisprozesse . . . . .	186
7.6.1	Maximaler und praktischer Wirkungsgrad der thermochemischen Wasserspaltung . . . . .	187

7.6.2	Schwefelsäurezyklen . . . . .	190
7.7	Ökonomischer Vergleich unterschiedlicher Wasserstoffproduktionsverfahren . . . . .	193
7.8	Weitere Verfahren zur Wasserspaltung . . . . .	195
7.8.1	Photoelektrochemische Wasserspaltung . . . . .	196
7.8.2	Photochemische Methoden . . . . .	198
7.8.3	Photobiologische Wasserstoffherzeugung . . . . .	200
	Literatur zu Kapitel 7 . . . . .	201
<b>8</b>	<b>Ausgewählte technische Systeme zur Wasserstoffherstellung</b> (W. Schnurnberger, W. Seeger, H. Steeb) . . . . .	205
8.1	Übersicht und Systemauswahl . . . . .	205
8.2	Anlagentechnik der Elektrolyse . . . . .	208
8.2.1	Nebenanlagen . . . . .	208
8.2.2	Fortschrittliche Verfahren . . . . .	212
8.2.3	Intermittierender Betrieb . . . . .	212
8.2.4	Auslegung der Elektrolyseleistung . . . . .	213
8.3	Elektrolyse und Wasserkraft . . . . .	215
8.4	Elektrolyse und Kernenergie . . . . .	216
8.5	Elektrolyse und thermische Solarkraftwerke . . . . .	217
8.5.1	Systembeschreibung . . . . .	217
8.5.2	Auslegung . . . . .	219
8.5.3	Kopplung mit Hochtemperaturdampfelektrolyse . . . . .	220
8.6	Elektrolyse und Windenergie . . . . .	222
8.6.1	Anlagenkonzepte . . . . .	222
8.6.2	Beschreibung der Anlagen . . . . .	222
8.6.3	Leistungsauslegung . . . . .	225
8.7	Elektrolyse und photovoltaische Solaranlagen . . . . .	227
8.7.1	Solargeneratoren . . . . .	227
8.7.2	Leistungsaufbereitung . . . . .	232
8.7.3	Gesamtsystem . . . . .	237
8.7.4	Erfahrungen mit einer Versuchsanlage . . . . .	238
8.7.5	Ausblick . . . . .	243
	Literatur zu Kapitel 8 . . . . .	243
<b>9</b>	<b>Speicherung, Transport und Verteilung von Wasserstoff (C. Carpetis)</b> . . . . .	245
9.1	Einleitung . . . . .	245
9.2	Speichertypen und -methoden . . . . .	246
9.2.1	Speichertypen . . . . .	246
9.2.2	Wasserstoffspeicherungsmethoden . . . . .	246
9.2.3	Einige Bemerkungen zur Wasserstoffverdichtung . . . . .	258
9.2.4	Zusammenstellung der spezifischen Daten der Wasserstoffspeicher . . . . .	259
9.3	Stationäre Wasserstoff-Großspeicherung . . . . .	261
9.3.1	Das System des stationären Wasserstoff-Großspeichers . . . . .	261
9.3.2	Energiesysteme mit Wasserstoff-Großspeicher als Untersystem . . . . .	264
9.4	Überregionaler Wasserstofftransport . . . . .	265
9.4.1	Allgemeines . . . . .	265

9.4.2	Wasserstoffgas-Transferleitungen . . . . .	266
9.4.3	Flüssigwasserstoff-Ferntransport . . . . .	273
9.5	Regionaler Wasserstofftransport und -verteilung . . . . .	276
9.5.1	Allgemeines . . . . .	276
9.5.2	Die Kostensituation bei regionalem Wasserstofftransport und -verteilung . . . . .	276
9.5.3	Zusammenfassung der Speicherungs-, Transport- und Verteilungskosten für Wasserstoff . . . . .	278
9.6	Wasserstoffspeicherung im Endnutzungsbereich . . . . .	279
9.6.1	Stationäre Kleinspeicher für Wasserstoff . . . . .	279
9.6.2	Wasserstofftanks für Kraftfahrzeuge und Vergleich der Alternativen . . . . .	280
	Literatur zu Kapitel 9 . . . . .	283

**Teil C: Entwurf einer zukünftigen Wasserstoffenergiewirtschaft . . . . . 287**

**10 Potential und Möglichkeiten von Wasserstoff (J. Nitsch, C. Voigt) . . . 288**

10.1	Zukünftiger Beitrag des Wasserstoffs an der Energiebedarfsdeckung . . . . .	288
10.1.1	Rahmenbedingungen für Wasserstoffsysteme . . . . .	288
10.1.2	Die Entwicklung des zukünftigen Energieverbrauchs . . . . .	289
10.1.3	Wasserstoffpotential in einem Industrieland . . . . .	292
10.1.4	Wasserstoffpotential in den Entwicklungsländern . . . . .	296
10.2	Standorte zur Wasserstofferzeugung aus unbegrenzten Energiequellen . . . . .	297
10.2.1	Sonnenenergie . . . . .	297
10.2.2	Wasserkraft . . . . .	304
10.2.3	Windenergie . . . . .	306
	Literatur zu Kapitel 10 . . . . .	307

**11 Wasserstoff in einer zukünftigen Energieversorgung (J. Nitsch, C. Voigt) 309**

11.1	Wasserstofferzeugung mittels großer Sonnen- und Windenergieanlagen . . . . .	309
11.1.1	Übersicht . . . . .	309
11.1.2	Sammlung von Sonnen- und Windenergie und Umwandlung in elektrische Energie (Teilsystem I) . . . . .	311
11.1.3	Elektrolytische Wasserstofferzeugung (Teilsystem II) . . . . .	316
11.1.4	Zu- und Fortleitung von Wasser, Wasserstoff und Strom (Teilsystem III) . . . . .	317
11.1.5	Systemvergleich . . . . .	318
11.1.6	Rohstoffbedarf . . . . .	319
11.1.7	Energiebedarf . . . . .	322
11.1.8	Anlagekosten . . . . .	323
11.2	Ausbaustrategie und Aufwand für die Bereitstellung großer Wasserstoffmengen . . . . .	325
11.2.1	Wachstumsraten und Zeitrahmen . . . . .	325
11.2.2	Jährlicher Materialbedarf für große Wasserstoffmengen . . . . .	327
11.2.3	Materialkreislauf . . . . .	330
11.2.4	Dynamische Energiebilanz von Wasserstoffanlagen . . . . .	331
11.3	Transport über große Entfernungen . . . . .	332

11.4	Kernenergie zur Produktion großer Wasserstoffmengen . . . . .	336
11.5	Merkmale eines Energiesystems mit einem großen Anteil von Wasserstoff	340
11.5.1	Wasserstoffkosten . . . . .	340
11.5.2	Auswirkungen auf die Umwelt . . . . .	343
11.5.3	Weitere Eigenschaften eines Wasserstoffenergiesystems . . . . .	347
	Literatur zu Kapitel 11 . . . . .	350
<b>12</b>	<b>Einführungskonzepte für nichtfossilen Wasserstoff (J. Nitsch, C. Voigt)</b>	<b>352</b>
12.1	Einführung in den Industrieländern . . . . .	352
12.1.1	Erweiterung heutiger Märkte . . . . .	352
12.1.2	Früher energetischer Einsatz . . . . .	353
12.2	Dezentraler Einsatz von Wasserstoff in südlichen Ländern . . . . .	355
12.2.1	Wasserstoff zur Speicherung von Sonnenenergie . . . . .	356
12.2.2	Frühe Nutzung von Wasserstoff in sonnenreichen Ländern . . . . .	357
12.2.3	Wasserstoff als Energieträger in abgelegenen Gebieten . . . . .	359
12.2.4	Ein Projekt zur solaren Wasserstofferzeugung . . . . .	359
	Literatur zu Kapitel 12 . . . . .	360
<b>13</b>	<b>Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen und die Kooperation mit Erzeugungsländern (J. Nitsch, H. Klaiß)</b>	<b>362</b>
13.1	Kapitalerfordernisse . . . . .	362
13.2	Finanzierungsmöglichkeiten . . . . .	364
13.3	Kooperation mit den Erzeugerländern . . . . .	365
13.4	Schritte auf dem Weg zum solaren Wasserstoff . . . . .	366
	Literatur zu Kapitel 13 . . . . .	367
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>369</b>