

Inhaltsverzeichnis

Wasserstoff als Energieträger – Ein Leitfaden (C. J. Winter)	1
Teil A: Bedeutung und Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff	11
1 Energieversorgungsstrukturen und die Rolle gasförmiger Energieträger (J. Nitsch)	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
2 Techniken zur energetischen Verwendung von Wasserstoff (W. Peschka)	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
3 Wasserstoff als Rohstoff (W. Schnurnberger)	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
4	Sicherheitsaspekte von Wasserstoff als Energieträger und Energiespeicher (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
Teil B: Herstellung von Wasserstoff aus nichtfossiler Primärenergie		93
5	Photovoltaische Stromerzeugung (G. Bauer)	94
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
6	Thermische und mechanische Stromerzeugung (J. Nitsch)	136
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
7	Verfahren zur Wasserspaltung (H. Wendt 7.1 bis 7.7; G. Bauer 7.8)	162
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
8	Ausgewählte technische Systeme zur Wasserstoffherstellung (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
9	Speicherung, Transport und Verteilung von Wasserstoff (C. Carpetis)	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 Literatur zu Kapitel 9	280 283
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
12	Einführungskonzepte für nichtfossilen Wasserstoff (J. Nitsch, C. Voigt)	352
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
13	Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen und die Kooperation mit Erzeugungsländern (J. Nitsch, H. Klaiß)	362
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
	Sachverzeichnis	369