

Inhaltsverzeichnis

Wasserstoff als Energieträger – ein Leitfaden (C. J. Winter)	1
---	---

Teil A: Bedeutung und Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff	13
--	----

1	Energieversorgungsstrukturen und die Rolle gasförmiger Energieträger (J. Nitsch)	14
1.1	Struktur der Energienachfrage	14
1.2	Der Energieverbrauch im weltweiten Vergleich	17
1.3	Verbraucherstrukturen und ihr Einfluß auf die Nutzungsmöglichkeiten der einzelnen Energieträger	20
1.4	Energiressourcen und die Reichweite der verfügbaren Energiequellen	23
1.5	Anforderungen an zukünftige Energiesysteme	28
	Literatur zu Kapitel 1	29

2	Techniken zur energetischen Verwendung von Wasserstoff (W. Peschka; H. Wendt 2.2.2–2.2.6)	31
2.1	Verbrennung von Wasserstoff	31
2.1.1	Reaktionsmechanismen und Schadstoffbildung	31
2.1.2	Großfeuerungen mit Wasserstoff	34
2.1.3	Wasserstoff-Luft-Brenner für Anwendungen in Haushalt und Gewerbe	35
2.1.4	Katalytische Heizer	36
2.1.5	Gasturbinen	38
2.1.6	Verbrennungskraftmaschinen mit innerer Verbrennung	40
2.2	Brennstoffzellen	42
2.2.1	Überblick	42
2.2.2	Prinzipien der elektrochemischen, kalten Verbrennung	43
2.2.3	Reaktionstechnik und Elektrodenmorphologie	44
2.2.4	Konstruktive Merkmale der Zelle	46
2.2.5	Elektrolythaushalt	46
2.2.6	Gesamtsystem der Brennstoffzellenanlage und Systempreis	47
2.2.7	Charakterisierung unterschiedlicher, kommerziell angebotener Brennstoffzellensysteme	49
2.3	Stationäre Nutzungssysteme für Wasserstoff	51
2.3.1	Gasmotoren und Brennstoffbatterien zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung	51
2.3.2	Dezentrale Hausenergiesysteme	52

2.3.3	Speicher- und Spitzenlastkraftwerke mit Wasserstoff	53
2.4	Wasserstoff als Kraftstoff	57
2.4.1	Wasserstoff in der Luftfahrt	57
2.4.2	Wasserstoff für Kraftfahrzeuge	58
2.4.3	Weitere Anwendungsmöglichkeiten	60
	Literatur zu Kapitel 2	61
3	Wasserstoff als Rohstoff (W. Schnurnberger)	65
3.1	Heutige Situation und zukünftige Entwicklung	65
3.2	Nichtenergetische Nutzung in der chemischen Industrie	68
3.2.1	Großtechnische Synthesen mit Wasserstoff	68
3.2.2	Spezielle Wasserstoffverbraucher	71
3.2.3	Direktreduktionsverfahren der Eisenherstellung	73
3.3	Indirekt energetische Nutzung von Wasserstoff	75
3.3.1	Hydrierende Raffinerieverfahren	76
3.3.2	Hydrierende Kohleveredlung	80
3.3.3	Kohlenstoffnutzungsgrad und Primärenergieeinsatz	83
3.4	Nichtfossiler Wasserstoff als Rohstoff	84
	Literatur zu Kapitel 3	86
4	Sicherheitsaspekte von Wasserstoff als Energieträger und Energiespeicher (M. Fischer, H. Eichert)	88
4.1	Einführung	88
4.2	Sicherheitstechnische Kenngrößen und Eigenschaften	89
4.2.1	Zündgrenzen und Zündenergie	89
4.2.2	Löschabstand	92
4.2.3	Verbrennungsgeschwindigkeit	92
4.2.4	Flammentemperatur	94
4.2.5	Detonationsgeschwindigkeit und Detonationsüberdruck	94
4.2.6	Explosionsenergie	95
4.3	Deflagrations- und Detonationsverhalten	96
4.4	Zusammenfassung	99
	Literatur zu Kapitel 4	100
Teil B: Herstellung von Wasserstoff aus nichtfossiler Primärenergie		103
5	Photovoltaische Stromerzeugung (G. H. Bauer)	104
5.1	Physikalische Mechanismen	104
5.1.1	Reflexion und Absorption	104
5.1.2	Direkte und indirekte Halbleiter	105
5.1.3	Absorption und Überschußenergie	106
5.1.4	Rekombination	106
5.1.5	Lokale Trennung von Ladungsträgern	107
5.1.6	Sperrende Kontakte	107
5.1.7	Diodenkennlinie	109
5.1.8	Interne Verluste und maximal erreichbarer Wirkungsgrad	110

5.1.9	Einfluß äußerer Parameter auf die Diodenkennlinie	112
5.1.10	Methoden zur Erhöhung des Wirkungsgrades	115
5.2	Solarzellentechnologie	118
5.2.1	Siliziumtechnologie	119
5.2.2	Kenndaten von Siliziumsolarzellen	122
5.2.3	Dünnschichttechnik	122
5.2.4	Galliumarsenid and Galliumaluminiumarsenid	133
5.3	Solarzellenmodule und Solarzellengeneratoren	134
5.3.1	Verschaltung von Zellen zu Modulen	134
5.3.2	Generatoren	136
5.4	Stand der Photovoltaik	138
5.4.1	Randbedingungen und Forderungen	138
5.4.2	Derzeitiger Entwicklungsstand	138
5.5	Zielvorstellungen und künftige Entwicklungen	140
	Literatur zu Kapitel 5	142
6	Thermische und mechanische Stromerzeugung (J. Nitsch)	146
6.1	Thermodynamik der solarthermischen Energiewandlung	146
6.2	Bereitstellung von Hochtemperaturwärme mittels Solarenergie	149
6.2.1	Solarturmkraftwerke	149
6.2.2	Paraboloidspiegel	153
6.3	Wärmebereitstellung mittels Kernenergie	155
6.4	Kreisprozesse zur Elektrizitätsbereitstellung	158
6.5	Mechanische Energiewandlung zur Elektrizitätsbereitstellung	162
6.5.1	Elektrizität aus Wasserkraft	162
6.5.2	Elektrizität aus Wind	163
6.6	Weitere indirekte Möglichkeiten der Solarenergienutzung	167
6.7	Einsatzmöglichkeiten zur Wasserstoffherzeugung	169
	Literatur zu Kapitel 6	171
7	Verfahren zur Wasserspaltung (H. Wendt 7.1 bis 7.7; G. H. Bauer 7.8)	173
7.1	Überblick	173
7.2	Thermodynamik der Wasserspaltung	175
7.2.1	Tieftemperaturwasserspaltung ($T < 2000$ K)	175
7.2.2	Hochtemperaturwasserspaltung ($T > 2000$ K)	176
7.2.3	Thermodynamische Daten der chemischen Wasserspaltung	177
7.3	Energiehaushalt chemisch-technischer Prozesse	177
7.3.1	Energieverluste chemischer Prozesse nach dem ersten Hauptsatz	178
7.3.2	Energieverluste chemischer Prozesse nach dem zweiten Hauptsatz	179
7.4	Konventionelle Prozesse zur Wasserspaltung mit Kohlenwasserstoffen oder Kohle als Primärenergiequelle	180
7.4.1	Dampfspaltungsverfahren und Vergasungsverfahren	180
7.4.2	Primärprozesse	181
7.4.3	CO-Konvertierung	183
7.4.4	Abschließende Trenn- und Reinigungsoperationen	183
7.4.5	Energieausbeuten unterschiedlicher Verfahren der Wasserstoffdarstellung aus fossilen Brennstoffen	183

7.5	Wasserspaltung durch Elektrolyse	185
7.5.1	Konventionelle alkalische Wasserelektrolyse	186
7.5.2	Innovation in der Technik der alkalischen Wasserelektrolysen	191
7.5.3	Strom-Spannungs-Charakteristik neuer Hochstromelektrolysezellen	195
7.5.4	Wirtschaftliche Implikationen der technischen Neuerungen für die alkalische Wasserelektrolyse	196
7.6	Wasserspaltung durch thermochemische Kreisprozesse	197
7.6.1	Maximaler und praktischer Wirkungsgrad der thermochemischen Wasserspaltung	198
7.6.2	Schwefelsäurezyklen	201
7.7	Ökonomischer Vergleich unterschiedlicher Wasserstoffproduktionsverfahren	205
7.8	Weitere Verfahren zur Wasserspaltung	207
7.8.1	Photoelektrochemische Wasserspaltung	207
7.8.2	Photochemische Methoden	209
7.8.3	Photobiologische Wasserstofferzeugung	211
	Literatur zu Kapitel 7	212
8	Ausgewählte technische Systeme zur Wasserstoffherstellung (W. Schnurnberger, W. Seeger, H. Steeb)	216
8.1	Übersicht und Systemauswahl	216
8.2	Anlagentechnik der Elektrolyse	219
8.2.1	Nebenanlagen	219
8.2.2	Fortschrittliche Verfahren	223
8.2.3	Intermittierender Betrieb	223
8.2.4	Auslegung der Elektrolyseleistung	224
8.3	Elektrolyse und Wasserkraft	226
8.4	Elektrolyse und Kernenergie	227
8.5	Elektrolyse und thermische Solarkraftwerke	228
8.5.1	Systembeschreibung	228
8.5.2	Auslegung	230
8.5.3	Kopplung mit Hochtemperaturdampfelektrolyse	231
8.6	Elektrolyse und Windenergie	233
8.6.1	Anlagenkonzepte	233
8.6.2	Beschreibung der Anlagen	233
8.6.3	Leistungsauslegung	236
8.7	Elektrolyse und photovoltaische Solaranlagen	238
8.7.1	Solargeneratoren	238
8.7.2	Leistungsaufbereitung	243
8.7.3	Gesamtsystem	248
8.7.4	Erfahrungen mit einer Versuchsanlage	249
8.7.5	Ausblick	254
	Literatur zu Kapitel 8	254
9	Speicherung, Transport und Verteilung von Wasserstoff (C. Carpentis)	256
9.1	Einleitung	256
9.2	Speichertypen und -methoden	257

9.2.1	Speichertypen	257
9.2.2	Wasserstoffspeicherungsmethoden	257
9.2.3	Einige Bemerkungen zur Wasserstoffverdichtung	269
9.2.4	Zusammenstellung der spezifischen Daten der Wasserstoffspeicher	270
9.3	Stationäre Wasserstoff-Großspeicherung	272
9.3.1	Das System des Wasserstoff-Großspeichers	272
9.3.2	Energiesysteme mit Wasserstoff-Großspeicher als Untersystem	275
9.4	Überregionaler Wasserstofftransport	276
9.4.1	Allgemeines	276
9.4.2	Wasserstoffgas-Transferleitungen	277
9.4.3	Flüssigwasserstoff-Ferntransport	284
9.5	Regionaler Wasserstofftransport und -verteilung	287
9.5.1	Allgemeines	287
9.5.2	Die Kostensituation bei regionalem Wasserstofftransport und -verteilung	287
9.5.3	Zusammenfassung der Speicherungs-, Transport- und Verteilungskosten für Wasserstoff	289
9.6	Wasserstoffspeicherung im Endnutzungsbereich	290
9.6.1	Stationäre Kleinspeicher für Wasserstoff	290
9.6.2	Wasserstofftanks für Kraftfahrzeuge und Vergleich der Alternativen	291
	Literatur zu Kapitel 9	294

Teil C: Entwurf einer zukünftigen Wasserstoffenergiewirtschaft 297

10	Potential und Möglichkeiten von Wasserstoff (J. Nitsch, C. Voigt)	298
10.1	Zukünftiger Beitrag des Wasserstoffs an der Energiebedarfsdeckung	298
10.1.1	Rahmenbedingungen für Wasserstoffsysteme	298
10.1.2	Die Entwicklung des zukünftigen Energieverbrauchs	299
10.1.3	Wasserstoffpotential in einem Industrieland	302
10.1.4	Wasserstoffpotential in den Entwicklungsländern	306
10.2	Standorte zur Wasserstofferzeugung aus unbegrenzten Energiequellen	307
10.2.1	Sonnenenergie	307
10.2.2	Wasserkraft	314
10.2.3	Windenergie	316
	Literatur zu Kapitel 10	317

11	Wasserstoff in einer zukünftigen Energieversorgung (J. Nitsch, C. Voigt)	319
11.1	Wasserstofferzeugung mittels großer Sonnen- und Windenergieanlagen	319
11.1.1	Übersicht	319
11.1.2	Sammlung von Sonnen- und Windenergie und Umwandlung in elektrische Energie (Teilsystem I)	321
11.1.3	Elektrolytische Wasserstofferzeugung (Teilsystem II)	326
11.1.4	Zu- und Fortleitung von Wasser, Wasserstoff und Strom (Teilsystem III)	327
11.1.5	Systemvergleich	328
11.1.6	Rohstoffbedarf	329

11.1.7	Energiebedarf	332
11.1.8	Anlagekosten	333
11.2	Ausbaustrategie und Aufwand für die Bereitstellung großer Wasserstoffmengen	335
11.2.1	Wachstumsraten und Zeitrahmen	335
11.2.2	Materialbedarf und Produktionskapazitäten für große Wasserstoffmengen	337
11.2.3	Materialkreislauf	340
11.2.4	Dynamische Energiebilanz von Wasserstoffanlagen	341
11.3	Transport über große Entfernungen	342
11.4	Kernenergie zur Produktion großer Wasserstoffmengen	346
11.5	Merkmale eines Energiesystems mit einem großen Anteil von Wasserstoff	350
11.5.1	Wasserstoffkosten	350
11.5.2	Auswirkungen auf die Umwelt	353
11.5.3	Weitere Eigenschaften eines Wasserstoffenergiesystems	357
	Literatur zu Kapitel 11	360
12	Einführungskonzepte für nichtfossilen Wasserstoff (J. Nitsch, C. Voigt)	362
12.1	Einführung in den Industrieländern	362
12.1.1	Erweiterung heutiger Märkte	362
12.1.2	Früher energetischer Einsatz	363
12.2	Dezentraler Einsatz von Wasserstoff in südlichen Ländern	365
12.2.1	Wasserstoff zur Speicherung von Sonnenenergie	366
12.2.2	Frühe Nutzung von Wasserstoff in sonnenreichen Ländern	367
12.2.3	Wasserstoff als Energieträger in abgelegenen Gebieten	369
12.3	Projekte und Aktivitäten zur solaren Wasserstoffherzeugung	369
	Literatur zu Kapitel 12	372
13	Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen und die Kooperation mit Erzeugerländern (J. Nitsch, H. Klaiß)	373
13.1	Kapitalerfordernisse	373
13.2	Finanzierungsmöglichkeiten	375
13.3	Kooperation mit den Erzeugerländern	376
13.4	Schritte auf dem Weg zum solaren Wasserstoff	377
	Literatur zu Kapitel 13	379
	Sachverzeichnis	381