

INHALT

1	Einleitung: Rettet Wasserstoff das Klima?	14
2	Energieversorgung von der Steinzeit bis heute	18
2.1	Der Energiebedarf wächst	19
2.2	Heutige Energiequellen	21
2.2.1	Primärenergie: Bedarf und Quellen	21
2.2.2	Strom: Musterkind der Energiewende	23
2.2.3	Wärme: Seit Jahrzehnten kaum Bewegung	25
2.2.4	Mobilität: Verkehrswende kommt in Sicht	26
2.2.5	Sektorenkopplung: Alle zusammen statt jeder für sich	28
2.3	Grenzen der heutigen Energieversorgung	29
2.3.1	Treibhausgase und Klimawandel	29
2.3.2	Die Endlichkeit fossiler Brennstoffe	35
2.3.3	Schadstoffe und andere Umweltbelastungen	37
2.4	Ausweg Atomenergie?	42
2.5	Das richtige Timing: Speicher und Lastmanagement	44
2.6	Zukunftsszenarien für die Energiewende	48
2.7	Der Beginn der solaren Wasserstoffwirtschaft	51
2.8	Politische Wasserstoffstrategien	54
3	Wasserstoff und seine Eigenschaften	60
3.1	Eigenschaften	60
3.1.1	H ₂ -Konfiguration	62
3.1.2	Wasserstoff im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen	63
3.2	Wasserstoff und Sicherheit	64
3.2.1	Knallgasreaktion	65
3.2.2	Materialwechselwirkungen	66
4	Gewinnung von Wasserstoff	70
4.1	Zukünftiger Wasserstoffbedarf	70
4.2	Herstellungsprozesse im Überblick	71
4.2.1	Die Elektrolyse: Hoffnungsträger für grünen Wasserstoff	71
4.2.2	Reformierung von Kohlenwasserstoffen	77
4.2.3	Pyrolytische Prozesse auf Basis fester Kohlenwasserstoffe	81
4.2.4	Methanpyrolyse: Ein Traum in türkis	82

4.2.5	Kværner-Verfahren	83
4.2.6	Biologische Herstellung: Von Natur aus grün	84
4.2.7	Dissoziation: Wasserstoff aus dem Solarturm	86
4.2.8	Methanhydrat: Wasserstoff aus der Tiefsee?	88
4.3	Reinigung	88
4.3.1	Anforderungen an die Reinheit	89
4.3.2	Wichtige Reinigungsverfahren im Überblick	90
4.4	Herstellungskosten	93
5	Speicherung und Transport von Wasserstoff	98
5.1	Gasförmiger Wasserstoff	99
5.1.1	Gasdruckbehälter	100
5.1.2	Transport mit Pipelines	102
5.1.3	Speicherung in Kavernen und porösem Gestein	104
5.1.4	Transport und Speicherung durch H ₂ -Beimischung ins Gasnetz	107
5.1.5	Gasnetzeinspeisung per Methanisierung	108
5.2	Tiefkalter Wasserstoff (flüssig)	109
5.2.1	Kryogenbehälter	110
5.2.2	Transport von flüssigem Wasserstoff per Lkw oder Bahn	112
5.2.3	Transport von flüssigem Wasserstoff per Schiff	113
5.2.4	Pipelines für Flüssigwasserstoff	113
5.3	Wasserstoffspeicherung und -transport in Flüssigkeiten	114
5.3.1	Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC)	114
5.3.2	Flüssige Treib- und Kraftstoffe auf Basis von Wasserstoff (E-Fuels)	116
5.4	Speicherung von Wasserstoff in Festkörpern	118
5.4.1	Metallhydrid	118
5.4.2	Nanoröhrchen	122
6	Tankstellen-Infrastruktur	124
6.1	Aufbau eines Tankstellennetzes	124
6.2	Belieferung der Tankstellen	126
6.3	Fahrzeugbetankung	127
6.3.1	Betankung mit gasförmigem Wasserstoff	127
6.3.2	Betankung mit flüssigem Wasserstoff	128

7	Sicherheit	132
7.1	Vorsichtsmaßnahmen	132
7.1.1	Brand- und Explosionsverhalten	133
7.1.2	Maßnahmen im Brandfall	134
7.1.3	Atemwege und Hautkontakt	135
7.2	Unfallszenarien und Lerneffekte	135
7.2.1	Lkw-Unfälle	136
7.2.2	Pkw-Brandversuche	136
7.2.3	Lachenbildung und Verdampfung	137
8	Brennstoffzelle	140
8.1	Grundsätzliche Funktionsweise	142
8.2	Effizienz von Brennstoffzellen	146
8.3	Typen von Brennstoffzellen	148
8.3.1	PEM-Brennstoffzelle	148
8.3.2	Alkalische Brennstoffzelle (AFC)	151
8.3.3	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC)	152
8.3.4	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)	153
8.3.5	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)	154
8.3.6	Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)	155
8.3.7	Festsäure-Brennstoffzelle (SAFC)	156
8.3.8	Mikrobielle Brennstoffzelle	156
8.4	Alternative Energieträger für die Brennstoffzelle	158
8.4.1	Methan (Erdgas, Biomethan, E-Methan)	158
8.4.2	Flüssiggas	158
8.4.3	Biogas, Klärgas & Co.	159
8.4.4	Methanol	160
8.5	Kosten von Brennstoffzellen	161
8.6	Chancen und Herausforderungen	162
9	Einsatzgebiete von Brennstoffzellen	166
9.1	Mikro und Mini	166
9.2	Portable Einheiten	167
9.3	Back-up-Systeme und Offgrid-Anwendungen	168
9.4	Hausenergieversorgung	169
9.5	Kraftwerksbetrieb	171

9.6	Fahrzeuge	173
9.6.1	Pkw	175
9.6.2	Lkw	178
9.6.3	Busse	180
9.7	Luftfahrt	183
9.8	Raumfahrt	188
9.9	Schifffahrt	188
10	Wasserstoffmotor	194
10.1	Funktion des Wasserstoffmotors	194
10.2	Eigenschaften des Wasserstoffmotors	195
10.3	Herausforderungen bei H ₂ -Motoren	196
10.4	Umweltbilanz	198
10.5	Fahrzeuge mit H ₂ -Motor	198
11	Wasserstoff für die Industrie	202
12	Katalytischer Brenner	206
13	Kosten der Wasserstofftechnologien	208
14	Fazit und Ausblick	212
15	Anhang	218
15.1	Abkürzungen	218
15.2	Einheiten/Formelzeichen	219
15.3	Elemente	219
15.4	Geschichte	220
15.5	Umrechnungstabelle Wasserstoff	226
15.6	Kennwerttabelle	227
15.7	LH ₂ -Sicherheitsmaßnahmen	228
15.8	Literatur	230
15.9	Index	234
15.10	Autoren	238