

Inhaltsverzeichnis

1	Der Stoff, aus dem die Zukunft ist	1
1.1	Einleitung: Wasserstoff als Teil des Lebens	1
1.2	Wissenschaftliche Entdeckung und wirtschaftliche Nutzung	2
1.3	Wasserstoff als Energieträger	3
1.4	Perspektiven der Wasserstofftechnologien	4
2	In der Wasserstoffwirtschaft liegen viele Chancen	7
2.1	Wasserstoffnutzung heute und morgen	7
2.2	Wasserstoffmobilität als Problemlöser und Hebel	9
2.3	Eine klimaneutrale Industrie und ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf	11
2.4	Sektorkopplung – die nächste Phase der Energiewende	13
2.5	Deutschlands Platz in einer H ₂ -Weltwirtschaft	15
2.6	Ausblick	17
	Literatur	18
3	Potenziale einer Wasserstoffwirtschaft aus wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Perspektive	21
3.1	Wirtschaftliche Relevanz von Wasserstoff	22
3.2	Wertschöpfungspotenziale für die deutsche Industrie	23
3.2.1	Die Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft	24
3.2.2	Umsatzpotenziale und Arbeitsplätze	25
3.2.3	Vielversprechende Wertschöpfungspotenziale für die deutsche Industrie	26
3.3	Beitrag von Wasserstoff zur Erreichung von Klima- und Umweltzielen	29

3.4	Akzeptanz von Wasserstoff in der Gesellschaft	31
3.4.1	Sozio-politische Akzeptanz von Wasserstoff	32
3.4.2	Marktakzeptanz	34
3.4.3	Lokale Akzeptanz	34
3.5	Nachfragepotenziale von Wasserstoff und wirtschaftliche Situation	35
3.5.1	Sektor Industrie	37
3.5.2	Sektor Verkehr	41
3.5.3	Sektor Wärme	43
3.5.4	Sektor Energiesysteme	45
	Literatur	49
4	Einsatz von Wasserstofftechnologien im Energiesystem	53
4.1	Einleitung	54
4.2	Die Rolle von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern im Energiesystem bis 2050	56
4.3	Regionale Aspekte von Angebot und Nachfrage: Mögliche Standorte der Elektrolyseure und der erneuerbaren Stromerzeugung	62
4.3.1	Diskussion der räumlichen Verortung von H ₂ -Angebot und -Nachfrage	63
4.4	Direkte Wasserstofferzeugung aus Offshore-Windstrom aus europäischer Sicht	64
4.4.1	Diskussion der Mengengerüste	65
4.4.2	Systemvergleich	66
4.4.3	Ökonomische Bewertung und Vergleich	70
4.5	Anforderungen an das Übertragungsnetz in Deutschland	70
4.6	Fazit	78
	Literatur	80
5	Einsatz von Wasserstofftechnologien in der Industrie	83
5.1	Stoffliche Nutzung von H ₂ : Stahlindustrie	84
5.1.1	Einsatz von Wasserstoff in der Rohstahlproduktion	85
5.1.2	Stoffliche Nutzung von Hüttengasen (CCU)	92
5.2	Stoffliche Nutzung von H ₂ : Chemische Industrie	99
5.2.1	Überblick zu Bedarf und Potenzial für den Einsatz von grünem Wasserstoff	99
5.2.2	Einsatz von grünem Wasserstoff in der Raffinerie	102
5.2.3	Neue Syntheserouten für Basischemikalien mit grünem Wasserstoff	105

5.3	Industrien mit unvermeidbarem CO ₂ -Anfall als zukünftige Rohstoffquelle	109
5.4	Energetische Nutzung von Wasserstoff in der Industrie	110
5.4.1	Grundlagen der Bereitstellung von Prozesswärme mit Wasserstoff	111
5.4.2	Verbrennung von Wasserstoff-Erdgasgemischen	112
5.4.3	Direkte Dampferzeugung mit Wasserstoff	113
5.5	Einsatz von Wasserstoff in der Keramikindustrie	113
5.6	Ausblick	115
	Literatur	117
6	Einsatz von Wasserstofftechnologien in Mobilität und Transport	123
6.1	Einleitung	124
6.2	Wasserstofftechnologien für den Antriebsstrang	125
6.2.1	Brennstoffzellenantriebe	125
6.2.2	Verbrennungsmotorische Antriebe für Wasserstoff	126
6.2.3	Fahrzeugseitige Wasserstoffspeicherung	126
6.3	Synthetische Wasserstoffträger	131
6.3.1	Anforderungen an SynFuels	132
6.3.2	Arten synthetischer Kraftstoffe	133
6.3.3	Grenzen von SynFuels	137
6.4	Infrastruktur für H ₂ -Technologien – Wasserstofftankstellen	139
6.5	Diskussion nach Mobilitätssektoren	140
6.5.1	Individualmobilität	141
6.5.2	Öffentlicher Personenverkehr	143
6.5.3	Güterverkehr	145
6.5.4	Luftfahrt	150
	Literatur	151
7	Einsatz von Wasserstofftechnologien in Gebäuden	155
7.1	Anwendungsfälle und systemische Integration	155
7.2	Gebäude und Wärmeerzeuger – Bestand und Entwicklung	158
7.3	Wärmeerzeuger – Dezentrale Lösungen	161
7.3.1	Wasserstoff-Heizkessel	161
7.3.2	Brennstoffzellen-BHKW	162
7.4	Wasserstoff in Quartieren	163
7.5	Wasserstoff in Gasnetzen – Beimischung und Umstellung	164
7.5.1	Wasserstoffbeimischung in Abhängigkeit der Herkunft von Erdgas	165
7.5.2	Umwidmung des Erdgasnetzes auf 100 % Wasserstoff	167

7.6	Kosten und Wirtschaftlichkeit einer H ₂ -basierten dezentralen Wärmeversorgung	167
	Literatur	171
8	Wasserstoffinfrastrukturen – Netze und Speicher	175
8.1	Einleitung	176
8.1.1	Wasserstoffinfrastrukturen als Grundlage der Sektorkopplungsoption	176
8.1.2	Reine Wasserstoffnetze	177
8.2	Aufbau von Wasserstoffnetzinfrastrukturen	180
8.2.1	Wasserstoff-Beimischung in das Erdgasnetz	180
8.2.2	Transformation der Gastransportnetze	181
8.2.3	Transformation der Gasverteilnetze	181
8.3	Transformation von H ₂ -Inseln und H ₂ -Tälern zu zusammenhängenden Netzen	185
8.4	Anforderungen an die Transformation von Infrastrukturkomponenten	188
8.4.1	Wirkungen von Wasserstoff auf die Werkstoffe des Rohrnetzes	189
8.4.2	Konsequenzen für die Überwachung von Rohrnetzen	191
8.4.3	Auswirkungen von Wasserstoff auf Verdichteranlagen	191
8.5	Welche Herausforderungen und Lösungen ergeben sich für den Betrieb der Infrastrukturen?	192
8.5.1	Daten und Digital Twins	193
8.5.2	Mathematische Modelle	194
8.5.3	Decision Support Tools/Smart Gas Networks	195
8.6	Optionen geologischer Speicher	196
8.7	Weitere Speicheroptionen	199
8.7.1	Druckgasspeicher	200
8.7.2	Flüssiger Wasserstoff	201
8.7.3	Binäre Metallhydride	201
8.7.4	Flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC)	202
	Literatur	202
9	Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse und weitere Verfahren	207
9.1	Verfahren zur Wasserstoffherzeugung	208
9.2	Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse	211
9.2.1	Grundlagen der Wasserelektrolyse	211
9.2.2	Alkalische Wasserelektrolyse	219

9.2.3	PEM-Elektrolyse	225
9.2.4	AEM-Elektrolyse	230
9.2.5	Hochtemperatur-Dampfelektrolyse	233
9.2.6	Co-Elektrolyse von Wasser und Kohlenstoffdioxid	237
9.2.7	Protonenleitende Hochtemperaturelektrolyse auf Keramikbasis	239
9.3	Weitere innovative Verfahren zur Wasserstofferzeugung	241
9.3.1	Dampfreformierung mit CO ₂ -Abscheidung und -Nutzung	241
9.3.2	Methanpyrolyse	243
9.3.3	Photokatalytische Verfahren	245
9.3.4	Biologische Verfahren	248
9.4	Zusammenfassung und Ausblick	250
	Literatur	251
10	Brennstoffzellen-Technologien	259
10.1	Einleitung	259
10.2	Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen	263
10.2.1	Überblick	263
10.2.2	Stack-Komponenten	263
10.2.3	Systemkomponenten	268
10.2.4	Betriebsführung	269
10.2.5	Lebensdauer und Degradation	272
10.3	Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen	273
10.3.1	Überblick	273
10.3.2	Stack-Komponenten	273
10.3.3	Systemkomponenten	275
10.4	Direktmethanol-Brennstoffzellen	278
10.4.1	Überblick	278
10.4.2	Stack-Komponenten	278
10.4.3	Systemkomponenten	279
10.5	Alkalische Brennstoffzellen	280
10.5.1	Überblick	280
10.6	Oxidkeramische Brennstoffzellen	281
10.6.1	Überblick	281
10.6.2	Stack-Komponenten	282
10.6.3	Systemkomponenten	283
10.6.4	Betriebsführung	288
10.6.5	Lebensdauer und Degradation	290

10.7	Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen	290
10.7.1	Überblick	290
10.7.2	Stack-Komponenten	292
	Literatur	295
11	Produktion der PEM-Systeme, Hochskalierung, Rollout-Konzept	297
11.1	Brennstoffzellen	297
11.1.1	Produktionselemente	298
11.1.2	Technologieoptimierung	299
11.1.3	Fertigungsverfahren	300
11.1.4	Automatisierung	303
11.1.5	Kontinuierliche Prozessführung	305
11.1.6	Skalierungseffekte	307
11.1.7	Vergleich ausgewählter BPP-Produktionsverfahren	313
11.1.8	Rollout-Konzept	317
11.2	Elektrolyseur	319
11.2.1	Kostenanteile und Kostensenkungspotenziale	320
11.2.2	Technologien	322
11.2.3	Skalierung	324
11.2.4	Rollout-Konzept	326
	Literatur	329
12	Standardisierung, Tests und Zertifizierung	331
12.1	Bedeutung der Standardisierung für die Wasserstofftechnologien	332
12.2	Übersicht zu Standardisierung, Akteuren und Prozessen	333
12.2.1	Begrifflichkeiten und Prozesse	333
12.2.2	Nationale Normung und Standardisierung	335
12.2.3	Internationale Normung und Standardisierung	336
12.3	Existierende Normen im Bereich der Wasserstofftechnologien	338
12.3.1	Überblick	338
12.3.2	Erzeugung	338
12.3.3	Transport & Infrastruktur	340
12.3.4	Speicherung	340
12.3.5	Verkehr & Industrie	342
12.3.6	Wärmesektor	342
12.3.7	Sicherheit	342
12.3.8	Brennstoffzelle	344
12.4	Anwendungsbeispiele	344
	Literatur	349

13	Unfallsicherheit und Lebensdauer – Materialien	351
13.1	Motivation: Wasserstoff als Energieträger	352
13.2	Unfallsicherheit und Lebensdauer: Hydrogen Embrittlement . .	355
13.3	Materialien und Mechanismen: Stahlwerkstoffe	356
13.4	Experimentelle Materialprüfung und theoretische Materialmodellierung	359
13.5	Diskussion: Hydrogen Readiness	363
	Literatur	365
14	Sensorik und Sicherheit	367
14.1	Einleitung	368
14.2	Herausforderungen	370
14.3	H ₂ -Sensortechnologien und Anwendungen	377
	14.3.1 Etablierte Sensoren	377
	14.3.2 MEMS-basierte Sensoren	384
	14.3.3 Optische Sensoren	387
14.4	Sensoren für die zerstörungsfreie Prüfung	392
14.5	Zusammenfassung und Ausblick	398
	Literatur	399
15	Digitalisierung und Simulation von Wasserstofftechnologien	403
15.1	Einleitung und Übersicht	404
15.2	Zukünftige Wasserstoffbedarfe und Integration in Energiemärkte	405
15.3	Modellierung und Simulation von Wasserstoff-Pipelines	409
	15.3.1 Stationäre Modelle	409
	15.3.2 Transiente Modelle	410
	15.3.3 Herausforderungen und Ausblick	410
15.4	Integration in verfahrenstechnische Prozesse	411
15.5	Optimiertes Stack-Design	415
	15.5.1 Modellbasierte Simulationsansätze	415
	15.5.2 Auslegung von Bipolarplatten	417
15.6	Skalierung und Flexibilisierung durch Digitalisierung	418
15.7	Simulationsgestützte Gestaltung sicherer Wasserstoffinfrastrukturen	421
	Literatur	423

16 Die internationale Dimension der Wasserstofftechnologien im	
Energiesystem	427
16.1 Relevanz von grünem Wasserstoff	428
16.2 Internationale Wasserstoffwirtschaft	429
16.2.1 Green Deal	429
16.2.2 Pariser Abkommen	431
16.3 Wasserstoffstrategien und -Roadmaps	431
16.3.1 Zeitliche Einordnung	431
16.3.2 Strategiepapiere von nicht-staatlichen Institutionen	432
16.4 Antreiber einer Wasserstoffwirtschaft	433
16.4.1 Umweltpolitik	433
16.4.2 Wirtschaftspolitik – Export, Industrie, Wohlstand	433
16.4.3 Energiepolitik	433
16.5 Internationaler Handel und Partnerschaften	434
16.5.1 Europa – Naher Osten und Nordafrika (MENA)	434
16.5.2 Deutschland – Westafrika	435
16.5.3 Australien – Japan/Deutschland	435
16.6 Rahmenbedingungen und Designelemente für den Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten	436
16.6.1 Markt für Importe	436
16.6.2 Potenziale für erneuerbare Energien und Import	436
16.6.3 Nachhaltigkeit	437
16.6.4 Marktmechanismen und Preis	437
16.6.5 Governance	438
16.6.6 Internationale Zusammenarbeit	438
16.6.7 Lokale Kompetenzen	439
16.6.8 Technologiesouveränität	439
16.7 Globale Erzeugungspotenziale für grünen Wasserstoff und synthetische Brenn- und Kraftstoffe	440
16.7.1 Faktoren bei der Potenzialanalyse	440
16.7.2 Zentrale Ergebnisse	441
16.7.3 Globale PtX-Potenziale	443
16.7.4 Kosten der Standorte	444
16.7.5 Ergebnisse für einzelne Energieträger	446
16.8 Schlussfolgerungen	448
Literatur	449

17	Ausblick und Perspektiven der Wasserstofftechnologien	453
17.1	Einleitung	454
17.2	Offshore-Wasserstoffproduktion – Wege zur Deckung zukünftiger Wasserstoffbedarfe	456
17.2.1	Hybride Offshore-Wasserstoffproduktion	457
17.2.2	Autarke Offshore-Wasserstoffproduktionsanlagen	458
17.2.3	Die Rolle der Elektrolýsetechnologie	459
17.2.4	Leitprojekte zur Produktion von Wasserstoff auf hoher See	460
17.3	Der Weg der chemischen Grundstoffindustrie zur Klimaneutralität	462
17.3.1	Zur klimaneutralen Methanolsynthese und Folgechemie	464
17.3.2	Zur klimaneutralen Fischer-Tropsch-Synthese	467
17.3.3	Beiträge des stofflichen Kunststoffrecyclings	468
17.4	Evolutionäre Fertigungstechnologien für Elektrolýseure	472
17.4.1	Status quo	472
17.4.2	Wesentliche Herausforderungen	473
17.5	Handlungsoptionen für die Entwicklung einer systemischen Roadmap zur fundamentalen Skalierung der Elektrolýseurproduktion	474
17.5.1	Pfad A – Skalierung bestehender Produkte	474
17.5.2	Pfad B – Evolution von Design und Fertigungstechnologie	475
17.5.3	Systemische Roadmap	476
	Literatur	476
	Glossar	481