



■ Vorzugsregion für Windenergie
 ■ Vorzugsregion für Solarenergie
 Wasserstoffströme in Mt_{H2}/a

Weltweite Infrastruktur zur Wasserstoffbereitstellung auf Basis erneuerbarer Energien

Philipp-Matthias Heuser

Energie & Umwelt / Energy & Environment
 Band / Volume 532
 ISBN 978-3-95806-531-4

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung
Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3)

Weltweite Infrastruktur zur Wasserstoff- bereitstellung auf Basis erneuerbarer Energien

Philipp-Matthias Heuser

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 532

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-531-4

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	Motivation.....	2
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3
2	LITERATUR ZU WELTWEITEN ENERGIEINFRASTRUKTUREN.....	7
2.1	Anforderung an Modellansätze zur Infrastrukturabbildung.....	7
2.2	Überblick weltweiter Energieinfrastrukturen.....	8
2.2.1	Erdöl.....	8
2.2.2	Erdgas.....	10
2.3	Modellierung internationaler Wasserstoffbereitstellung.....	12
2.3.1	Potentialbestimmung von Windenergie und Photovoltaik.....	13
2.3.2	Ansätze für regionale Wasserstoffinfrastrukturen.....	15
2.3.3	Bilaterale Wasserstoffinfrastrukturen in der Literatur.....	18
2.4	Ansätze zur Bedarfsabschätzung und Güterallokation.....	25
2.4.1	Bedarfsschätzung.....	26
2.4.2	Güterallokation.....	28
2.5	Ableitung eines geeigneten Modellansatzes.....	29
2.6	Zusammenfassung.....	30
3	DATENGRUNDLAGE ZU WASSERSTOFFINFRASTRUKTUREN.....	33
3.1	Physikalisch-chemische Eigenschaften von Wasserstoff.....	33
3.2	Elemente und Parameter der Wasserstoffinfrastruktur.....	34
3.2.1	Potentialanalyse erneuerbarer Energien.....	35
3.2.2	Wasserstoffbereitstellung.....	43
3.2.3	Energetische und industrielle Wasserstoffnutzung.....	54
3.3	Zusammenfassung.....	58
4	BESTIMMUNG DES WIND- UND SOLARENERGIEPOTENTIALS.....	59
4.1	Landflächenverfügbarkeit und Platzierung.....	59
4.2	Berechnung der Volllaststunden.....	62
4.2.1	Simulation von Windenergieanlagen (WEA).....	62
4.2.2	Simulation von (Freiflächen-)Photovoltaik (PV).....	64
4.3	Clusterbildung und Vernetzung.....	64
4.4	Ermittlung von Angebots- und Kostenkurven.....	67
4.5	Zusammenfassung.....	71

5	DESIGN DER WELTWEITEN WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR.....	73
5.1	Ableitung der Modellanforderungen	73
5.2	Übergreifende Modellbeschreibung	75
5.3	Komponenten der inländischen Bereitstellungskette.....	77
5.3.1	Einteilung der elektrischen Energie und Wasserstoffherstellung.....	77
5.3.2	Pipelinetransport	78
5.3.3	Wasserstoffkonditionierung	79
5.3.4	Wasserstoffspeicherung	80
5.4	Modellierung des Überseeexportes	81
5.4.1	Modellseitige Abbildung des Schiffstransportes.....	82
5.4.2	Ableitung von Kostenfunktionen	83
5.5	Verteilung des globalen Wasserstoffangebots	84
5.5.1	Ermittlung des globalen Wasserstoffbedarfs.....	84
5.5.2	Ansatz zur weltweiten Wasserstoffallokation	85
5.6	Zusammenfassung	86
6	ANGEBOTS- UND KOSTENANALYSE DER WASSERSTOFFBEREITSTELLUNG	89
6.1	Nutzungspotential erneuerbarer Energien in ausgewählten Regionen	89
6.1.1	Auswahl der Vorzugsregionen.....	89
6.1.2	Ergebnisse der Landverfügbarkeitsanalyse	91
6.1.3	Ergebnisse der Windenergiepotentialanalyse.....	92
6.1.4	Ergebnisse der Solarenergiepotentialanalyse.....	99
6.2	Analyse der inländischen Bereitstellungsketten	106
6.2.1	Wasserstoff aus Windenergie.....	107
6.2.2	Wasserstoff aus Solarenergie.....	115
6.3	Regionsspezifische Angebots- und Kostenkurven	124
6.3.1	Windreiche Vorzugsregionen.....	124
6.3.2	Sonnenreiche Vorzugsregionen	127
6.4	Sensitivitätsanalyse der Bereitstellungspfade	131
6.4.1	Variation der Speicherdimensionierung	131
6.4.2	Variation der Elektrolysekosten	133
6.4.3	Vergleich von Investitionskostenvariationen	134
6.4.4	Analyse eines Szenarios mit reduzierten Investitionskosten.....	135
6.4.5	Kostenvergleich der Bereitstellungspfade LH ₂ und LOHC	137
6.5	Einordnung und Diskussion der Ergebnisse.....	138
6.6	Zusammenfassung	141

7	WELTWEITE WASSERSTOFFALLOKATION ZUR BEDARFSDECKUNG	145
7.1	Abschätzung des voraussichtlichen Wasserstoffbedarfs	145
7.2	Analyse der Allokationsergebnisse.....	147
7.2.1	Kostenoptimale Wasserstoffimporte.....	147
7.2.2	Export- und Importkosten.....	151
7.2.3	Primärenergieaufwand.....	153
7.3	Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse	155
7.3.1	Variation des Wasserstoffangebots.....	155
7.3.2	Reduzierung der Investitionskosten für den LH ₂ -Schifftransport.....	158
7.3.3	Technischer Vergleich von LH ₂ und LOHC	159
7.4	Einordnung und Diskussion der Ergebnisse	162
7.5	Zusammenfassung.....	166
8	DISKUSSION	169
9	ZUSAMMENFASSUNG.....	173
	ANHANG.....	179
A	Algorithmen zur Clusteranalyse.....	179
B	Parameter der Konditionierungstechnologien.....	181
C	Parameter zur Bestimmung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs.....	182
D	Ergebnisse der Windenergiepotentialanalyse.....	183
E	Ergebnisse der Solarenergiepotentialanalyse	185
F	Gewählte Hafenstandorte.....	189
G	Spezifische Kosten des Überseetransportes	190
H	Kostenoptimale Allokationsmengen.....	192
I	Sensitivitätsanalyse der Wasserstoffallokation	197
	ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS	201
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	205
	TABELLENVERZEICHNIS	215
	LITERATURVERZEICHNIS	217
	DANKSAGUNG.....	231

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 532
ISBN 978-3-95806-531-4