

BACHELORARBEIT

Akteure auf dem Wasserstoffmarkt der Zukunft und die Auswirkungen des Handels auf nationale Wasserhaushalte

vorgelegt am 11.01.2024
Modou Gaye, [REDACTED]

1. Prüfer: Prof. Dr. Birth-Reichert
2. Prüfer: Prof. Dr. Lauer

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Department Maschinenbau und Produktion

Berliner Tor 21
20099 Hamburg

Zusammenfassung

Das Thema der vorliegenden Bachelorarbeit ist die perspektivische Untersuchung zukünftiger Akteure auf dem Wasserstoffmarkt und die Untersuchung der Auswirkungen des Wasserstoffhandels auf nationale Wasserhaushalte.

Diese Arbeit umfasst die Beschreibung der Wasserstoffproduktion, sowie die Erarbeitung der damit verbundenen Abhängigkeit der Ressource Wasser. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung perspektivischer Importeure und Exporteure von Wasserstoff und seinen Derivaten im Zeitraum von 2030 bis 2050. In diesem Kontext werden die voraussichtlichen Bedarfs-, Import- und Exportmengen möglicher Akteure, sowie Angaben zu perspektivischen Elektrolysekapazitäten genauer beleuchtet.

Auf Grundlage der ermittelten Mengenangaben, wurden Prognosen erstellt, um fehlende Angaben zu ergänzen.

Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchungen bezüglich der Wasserabhängigkeit der Wasserstoffproduktion, wurden anhand des Fallbeispiels Chile-Deutschland Auswirkungen auf die jeweiligen nationalen Wasserhaushalte ermittelt. Hierbei wurden die perspektivischen Importmengen Deutschlands als Grundlage der Wassermengenberechnung verwendet und die so ermittelten Wassermengen mit nationalen Wasserverbräuchen verglichen.

Die Ergebnisse der genannten Untersuchungen sind mehrere Länderübersichten, in denen für jeweils zehn Importeure und Exporteure voraussichtliche Elektrolysekapazitäten, sowie Bedarfs-, Import- und Exportmengen visualisiert wurden. Die Untersuchung der Beeinflussung der Wasserhaushalte durch die örtliche Verschiebung der Ressource Wasser, hat gezeigt, dass die zur Produktion aufgewendeten Wassermengen die importierten Wassermengen deutlich übersteigen. Die voraussichtliche Beeinflussung des Wasserhaushaltes ist daher im Exportland höher als im Importland. Ebenfalls wurde am Fallbeispiel Chile-Deutschland erarbeitet, dass die importierten Wassermengen einen wahrscheinlich positiven Einfluss auf die nationalen und, je nach Ort der Nutzung, regionalen Wasserhaushalte haben wird. Die importierten Wassermengen stellen auf nationaler Ebene jedoch eine vergleichsweise geringe Menge an Wasser dar. Die zur Produktion notwendige Wassermenge könnte, je nach Quelle der Bereitstellung, zu einer Verschärfung bereits bestehender Wasserknappheiten führen, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, die Wasserbereitstellung zur Wasserstoffproduktion sorgfältig zu planen. Die gewonnen Ergebnisse dieser Arbeit sollen eine Grundlage bilden, mit deren Hilfe Mengenverhältnisse verglichen und visualisiert werden können. Des Weiteren soll diese Arbeit als Grundlage für weiterführende Untersuchungen im Bereich des Wasserstoffhandels dienen und dabei helfen einzelne Akteure auf dem Wasserstoffmarkt der Zukunft genauer zu untersuchen.

Abstract

This paper undertakes an analysis of future players on the hydrogen market and investigates the effects of hydrogen trade on national water budgets.

This thesis includes a description of hydrogen production and illustrates its dependence on water as a resource. The emphasis lies on the investigation of prospective importers and exporters of hydrogen and its derivatives in the period from 2030 to 2050. In this context, the expected demand, import and export volumes of possible players, as well as information on prospective electrolysis capacities, are examined in more detail.

Forecasts were drawn up on the basis of the quantities determined in order to supplement missing information.

Based on the results of the investigations into the water dependency of hydrogen production, the effects on the respective national water budgets were determined using Chile and Germany as a case study. The perspective german import volumes were used as the basis for calculating the water volumes which were then compared with national water consumption.

The results of these studies are displayed in several country overviews, in which the expected electrolysis capacities as well as demand, import and export volumes were visualized for ten importers and ten exporters. The investigation of the effect of the local shift in water resources on water budgets has shown that the quantities of water used for production significantly exceed the quantities of water imported. The probable effect on the water balance is therefore higher in the exporting country than in the importing country. The Chile-Germany case study also showed that the imported water volumes will probably have a positive influence on the national and, depending on the place of use, regional water budgets. However, the imported water volumes represent a comparatively small amount of water at national level. The amount of water required for production could, depending on the source of supply, lead to an exacerbation of existing water shortages, resulting in the need to carefully plan the supply of water for hydrogen production. The results of this work are intended to provide a basis for comparing and visualizing volume ratios. Furthermore, this work should serve as a basis for further investigations in the field of hydrogen trading and help to examine individual players on the hydrogen market of the future in more detail.

Zielsetzung der Bachelorarbeit

Die vorliegende Bachelorarbeit hat das Ziel anhand von Länderstrategien und ergänzender Literatur, zukünftige Importeure und Exporteure von Wasserstoff und seinen Derivaten in der Zukunft (Zeithorizont 2030-2050) zu identifizieren.

Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen, sollen Bedarfsmengen, sowie potenzielle Import- und Exportmengen untersucht und visualisiert werden. Des Weiteren sollen Prognosen über fehlende Mengenangaben erstellt werden.

Auf Grundlage der ermittelten Wasserstoffmengen und der Theorie zur Wasserstoffproduktion, sowie der dazugehörigen Abhängigkeit der Ressource Wasser, sollen Beeinflussungen der Wasserhaushalte durch den Wasserstoffhandel untersucht werden. Die nationalen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt durch die Verarbeitung und der örtlichen Verschiebung der Ressource Wasser, sollen hierbei anhand eines Fallbeispiels erarbeitet und visualisiert werde.



Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Herrn Modou Gaye

Matrikel-Nummer: XXXXXXXXXX

Thema: Akteure auf dem Wasserstoffmarkt der Zukunft und die Auswirkungen des Handels auf nationale Wasserhaushalte

Wasserstoff wird aktuell als Energieträger der Zukunft betitelt [28]. Dies liegt in erster Linie an seiner allgemeinen Verfügbarkeit und seinen vielschichtigen Einsatzmöglichkeiten. Wasserstoff ist aus allen regenerativen Energien herstellbar, lässt sich auf verschiedenste Arten speichern und ohne Schadstoffemissionen direkt in Strom, Wärme und Bewegungsenergie umwandeln. Prognosen zufolge, soll die Bandbreite des Wasserstoffbedarfs im Jahr 2050 global zwischen 4-11% des weltweiten Energiebedarfs betragen [37]. Um eine solche Nachfrage zu decken, müssen beträchtliche Mengen an Wasserstoff produziert werden. Der hohe Verbrauch an Wasser und erneuerbaren Energien macht es einigen Ländern unmöglich, ihren Wasserstoff bedarfsdeckend zu produzieren, wodurch sie zukünftig auf Importe angewiesen sein werden. Welche Länder dies sind und welche Zusammenhänge mit der Wasserstoffproduktion, den dazugehörigen Umweltauswirkungen und der Importabhängigkeiten einhergehen, werden im Zuge der Bachelorthesis genauer beleuchtet.

Schwerpunkte:

- Beschreibung der Wasserstoffproduktion und Abhängigkeit von der Ressource Wasser
- Untersuchung der perspektivischen Wasserstoff-Bedarfe in Importländer
- Untersuchung der perspektivischen Wasserstoffproduktionspotentiale in Exportländern
- Bestimmung der Beeinflussung des Wasserhaushaltes u.a. auch durch die örtliche Verschiebung
- Aufarbeitung der regionalen Konsequenzen durch die Verarbeitung der kritischen Ressource Wasser vor dem Hintergrund der technischen Bereitstellung
- Aufarbeitung der Resultate an exemplarischen Beispielregionen und Wertschöpfungsketten
- Identifikation von Maßnahmen zur Optimierung der Abhängigkeiten

Die Ergebnisse werden mit wissenschaftlicher Praxis einhergehend dokumentiert.

Hinweise zur Bachelorarbeit

Beim Lesen der vorliegenden Bachelorarbeit sind folgende Anmerkungen zu berücksichtigen:

- Wenn die spezifische Art des Wasserstoffs oder seiner Derivate nicht eindeutig beschrieben wird, beziehen sich die Mengen grundsätzlich auf CO₂-arme Wasserstoffmengen.
- Das Wort „Länder“ wird in der vorliegenden Arbeit teilweise synonym für Akteure (Länder, Regionen, Staatengemeinschaften) verwendet.
- Alle durchgeführten Rechnungen wurden mit einer Genauigkeit von zwei Nachkommastellen durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	ii
Zielsetzung der Bachelorarbeit	iii
Aufgabenstellung	iv
Hinweise zur Bachelorarbeit	vi
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung.....	7
2 Theoretischer Rahmen	8
2.1 Wasserstoff als Energieträger.....	8
2.2 Wasserstoffarten.....	9
2.2.1 Grüner Wasserstoff.....	9
2.2.2 Grauer Wasserstoff.....	9
2.2.3 Blauer Wasserstoff.....	9
2.3 Wasserstoffproduktion und die Abhängigkeit von der Ressource Wasser	10
2.3.1 Verfahren zur Gewinnung von Wasserstoff	10
2.3.2 Reformierungsprozesse im Allgemeinen	10
2.3.3 Dampfreformierung.....	10
2.3.4 Elektrolyseverfahren im Allgemeinen	12
2.3.5 Alkalische Elektrolyse (AEL)	12
2.3.6 PEM-Elektrolyse	13
2.3.7 HTE-Elektrolyse (Hochtemperatur- oder Dampfelektrolyseur)	13
2.3.8 Abhängigkeit der Ressourcen Wasser und Energie	14
2.3.9 Bereitstellung der Ressource Wasser durch Meerwasserentsalzung	15
3 Methodik.....	17
3.1 Identifizierung der Akteure auf dem Wasserstoffmarkt der Zukunft	19
3.2 Methodik der Szenarien	22
3.3 Länderübersicht: Szenario-DEU	22
3.3.1 Basisfaktoren und Ermittlungsverfahren	23
3.3.2 Berechnung der Basisfaktoren.....	24
3.3.3 Anwendung des Szenario-DEU:	26
3.4 Länderübersicht: Szenario-CHL.....	30
3.4.1 Basisfaktoren und Ermittlungsverfahren:	31
3.4.2 Ermittlung der Bedarfs- und möglichen Exportmengen Chiles:	32
3.4.3 Anwendung des Szenarios-CHL.....	37
3.5 Korrektur der Szenarien.....	42

3.5.1	Korrektur des Szenarios-DEU.....	42
3.5.2	Korrektur des Szenarios-CHL	44
3.6	Bestimmung des Einflusses auf Wasserhaushalte:	48
3.6.1	Einfluss auf den Wasserhaushalt in Deutschland.....	50
3.6.2	Einfluss auf den Wasserhaushalt in Chile	51
4	Ergebnisse.....	53
4.1	Untersuchung der perspektivischen Wasserstoffbedarfsmengen in Importländer ..	53
4.1.1	Deutschland	53
4.1.2	Japan	55
4.1.3	Süd-Korea	57
4.1.4	EU	58
4.2	Untersuchung der perspektivischen Wasserstoffproduktionspotentiale in Exportländern.....	59
4.2.1	Chile	59
4.2.2	Australien	63
4.2.3	Kanada	64
4.2.4	Marokko.....	66
4.3	Länderübersichten und Szenarien	68
4.3.1	Länderübersicht.....	68
4.4	Szenarien der Länderübersicht.....	72
4.4.1	Länderübersicht: Szenario-DEU	72
4.4.2	Korrektur der Länderübersicht: Szenario-DEU.....	75
4.4.3	Länderübersicht: Szenario-CHL.....	76
4.4.4	Korrektur der Länderübersicht: Szenario-CHL	79
4.5	Bestimmung der Beeinflussung des Wasserhaushaltes u.a. auch durch die örtliche Verschiebung	81
4.5.1	Fallbeispiel: Wasserstoffhandel zwischen Chile und Deutschland.....	83
5	Diskussion	97
5.1	Die Länderübersicht.....	97
5.2	Die Szenarien	98
5.2.1	Szenario-DEU.....	99
5.2.2	Szenario-CHL	99
5.3	Auswirkungen des Wasserstoffhandel auf nationale Wasserhaushalte am Fallbeispiel Chile – Deutschland	100
5.3.1	Deutschland	101
5.3.2	Chile	101
6	Fazit.....	103
7	Literaturverzeichnis.....	104
8	Anhang	A-P

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 CHILEAN HXDROGEN AND DERIVATIVE MARKET PROJECTIONS: 2025-2050; [63]	33
ABBILDUNG 2 LEVELIZED COST OF GREEN HYDROGEN (USD/KG H ₂) [63]	60
ABBILDUNG 3 COMPARISON OF PRODUCTION COSTS 2030 [63]	61
ABBILDUNG 4 CHILEAN HYDROGEN AND DERIVATE MARKET PROJECTIONS: 2025-2050 [63]	62
ABBILDUNG 5 NACHFRAGESZENARIO FÜR GRÜNEN WASSERSTOFF (INKL. DERIVATE) IN MAROKKO NACH KATEGORIE; IN TWH) [88]	67
ABBILDUNG 6 ANZAHL DER INDUSTRIEUNTERNEHMEN IN DEUTSCHLAND NACH BUNDESLÄNDERN IM JAHR 2022 [94]	88
ABBILDUNG 7 GRAFISCHE DARSTELLUNG DER DATEN AUS ABB.6; EIGENE DARSTELLUNG	89
ABBILDUNG 8 ANZAHL AN INDUSTRIEUNTERNEHMEN UND INSGESAMT EINGESETZTE WASSERMENGEN NACH BUNDESLÄNDERN; EIGENE DARSTELLUNG	89

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 UNTERSUCHTE STUDIEN ZUR IDENTIFIZIERUNG PERSPEKTIVISCHER EXPORTEURE	19
TABELLE 2 UNTERSUCHTE STUDIEN ZUR IDENTIFIZIERUNG PERSPEKTIVISCHER IMPORTEURE	20
TABELLE 3 AUSWAHL DER ZU BETRACHTENDEN IMPORTEURE UND EXPORTEURE	20
TABELLE 4 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-DEU VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: DEUTSCHLAND)	22
TABELLE 5 FARBSKALA DES SZENARIO-DEU	24
TABELLE 6 BASISFAKTOREN DES SZENARIO-DEU	25
TABELLE 7 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-DEU VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: JAPAN)	26
TABELLE 8 ANWENDUNGSBEISPIEL: LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-DEU VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: JAPAN)	28
TABELLE 9 AUSSCHNITT 1 DER TABELLE 92: PRODUKTIONSPOTENTIALE DURCH ELEKTROLYSE [TWH]	28
TABELLE 10 ANWENDUNGSBEISPIEL: LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-DEU VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: UK)	29
TABELLE 11 AUSSCHNITT 2 DER TABELLE 92: PRODUKTIONSPOTENTIALE DURCH ELEKTROLYSE [TWH]	29
TABELLE 12 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: CHILE)	30
TABELLE 13 FARBSKALA DES SZENARIOS-CHL	32
TABELLE 14 MARKTANTEILE DER PRODUKTION VON WASSERSTOFF UND SEINEN DERIVATEN IN CHILE [B USD]	33
TABELLE 15 BASISFAKTOREN DES SZENARIOS-CHL	35
TABELLE 16 ANWENDUNGSBEISPIEL1: LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: CHILE)	36
TABELLE 17 ANWENDUNGSBEISPIEL2: LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: CHILE)	37
TABELLE 18 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: NORWEGEN)	37
TABELLE 19 ANWENDUNGSBEISPIEL: LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: NORWEGEN)	38
TABELLE 20 ANWENDUNGSBEISPIEL1: LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: KANADA)	40
TABELLE 21 ANWENDUNGSBEISPIEL2: LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: KANADA)	41
TABELLE 22 AUSSCHNITT 3 DER TABELLE 92: PRODUKTIONSPOTENTIALE DURCH ELEKTROLYSE [TWH]	42
TABELLE 23 KORREKTUR DES SZENARIOS-DEU: ÜBERSICHT DER BEDARFSQUOTIENTEN	43
TABELLE 24 KORREKTUR DES SZENARIOS-DEU: BASISFAKTOREN DES SZENARIOS-DEU	43
TABELLE 25 KORREKTUR DES SZENARIOS-DEU: FARBSKALA DES SZENARIO-DEU	43
TABELLE 26 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: UAE)	44
TABELLE 27 KORREKTUR DES SZENARIOS-CHL: BASISFAKTOREN DES SZENARIOS-CHL	44
TABELLE 28 KORREKTUR DES SZENARIOS-CHL: FARBSKALA DES SZENARIO-CHL	44

TABELLE 29 KORREKTUR DES SZENARIOS-CHL: LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: ARGENTINIEN)	45
TABELLE 30 ANWENDUNGSBEISPIEL: KORREKTUR DES SZENARIOS-CHL: LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: ARGENTINIEN)	46
TABELLE 31 KORREKTUR DES SZENARIOS-CHL: LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: NIEDERLANDE).....	47
TABELLE 32 KORREKTUR DES SZENARIOS-CHL: LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: UAE)	47
TABELLE 33 IMPORTBEDARF NACH LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: DEUTSCHLAND).....	48
TABELLE 34 ÜBERSICHT DER ERMITTLUNG DER WASSERBEDARFSMENGE	48
TABELLE 35 ÜBERSICHT DER WASSERBEDARFSWERTE NACH TECHNOLOGIE	48
TABELLE 36 ÜBERSICHT DER ERMITTELTEN WASSERMENGEN	49
TABELLE 37 ÜBERSICHT DER UMKEHROSMOSE	51
TABELLE 38 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: DEUTSCHLAND)	53
TABELLE 39 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: JAPAN)	55
TABELLE 40 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: SÜD-KOREA).....	57
TABELLE 41 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: EU)	58
TABELLE 42 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: CHILE).....	59
TABELLE 43 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: AUSTRALIEN).....	63
TABELLE 44 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: KANADA)	64
TABELLE 45 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: MAROKKO)	66
TABELLE 46 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: DEUTSCHLAND UND JAPAN).....	68
TABELLE 47 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: SÜD-KOREA UND EU)	68
TABELLE 48 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: FRANKREICH UND UK).....	69
TABELLE 49 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: USA UND ITALIEN)	69
TABELLE 50 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: TÜRKEI UND CHINA).....	69
TABELLE 51 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: CHILE UND MAROKKO)	70
TABELLE 52 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: AUSTRALIEN UND KANADA)	70
TABELLE 53 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: NIEDERLANDE UND NORWEGEN)	70
TABELLE 54 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: ARGENTINIEN UND SPANIEN)	71
TABELLE 55 LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: UAE UND SÜD AFRIKA)	71
TABELLE 56 BASISFAKTOREN DES SZENARIO-DEU	72
TABELLE 57 FARBSKALA DES SZENARIO-DEU	72
TABELLE 58 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-DEU: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: DEUTSCHLAND UND JAPAN)	72
TABELLE 59 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-DEU: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: SÜD-KOREA UND EU).....	73
TABELLE 60 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-DEU: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: FRANKREICH UND UK).....	73
TABELLE 61 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-DEU: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: USA UND ITALIEN).....	73
TABELLE 62 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-DEU: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: TÜRKEI UND CHINA)	74
TABELLE 63 KORREKTUR DES SZENARIOS-DEU: BASISFAKTOREN DES SZENARIOS-DEU	75
TABELLE 64 KORREKTUR DES SZENARIOS-DEU: FARBSKALA DES SZENARIO-DEU	75
TABELLE 65 KORREKTUR DES SZENARIOS-DEU: LÄNDERÜBERSICHT: VORAUSSICHTLICHE IMPORTEURE (AUSSCHNITT: SÜD-KOREA UND EU).....	75
TABELLE 66 BASISFAKTOREN DES SZENARIOS-CHL	76
TABELLE 67 FARBSKALA DES SZENARIOS-CHL.....	76
TABELLE 68 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: CHILE UND MAROKKO).....	76

TABELLE 69 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: AUSTRALIEN UND KANADA).....	77
TABELLE 70 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: NIEDERLANDE UND NORWEGEN).....	77
TABELLE 71 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: ARGENTINIEN UND SPANIEN)	77
TABELLE 72 LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL: VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: UAE UND SÜD AFRIKA)	78
TABELLE 73 KORREKTUR DES SZENARIOS-CHL: BASISFAKTOREN DES SZENARIOS-CHL	79
TABELLE 74 FARBSKALA NACH KORREKTUR DES SZENARIOS-CHL	79
TABELLE 75 KORREKTUR DER LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: NIEDERLANDE UND ARGENTINIEN).....	79
TABELLE 76 KORREKTUR DER LÄNDERÜBERSICHT: SZENARIO-CHL VORAUSSICHTLICHE EXPORTEURE (AUSSCHNITT: UAE).....	80
TABELLE 77 ÜBERSICHT DER ERMITTLUNG DER WASSERBEDARFSMENGE	83
TABELLE 78 ÜBERSICHT DER WASSERBEDARFSWERTE NACH TECHNOLOGIE	83
TABELLE 79 ÜBERSICHT DER ERMITTELTEN WASSERMENGEN	84
TABELLE 80 PROZENTUALER ANTEIL DER UNTERSUCHTEN WASSERMENGEN AM WASSERDARGEBOT IN DEUTSCHLAND	85
TABELLE 81 PROZENTUALER ANTEIL DER UNTERSUCHTEN WASSERMENGEN AM WASSERDARGEBOT IN CHILE	85
TABELLE 82 WASSERVERBRAUCH NACH SEKTOREN IN DEUTSCHLAND.....	86
TABELLE 83 PROZENTUALER ANTEIL DER IMPORTIERTEN WASSERMENGEN AN VERBRAUCHERMENGEN	86
TABELLE 84 WASSERVERBRAUCH NACH SEKTOREN IN CHILE.....	91
TABELLE 85 PROZENTUALER ANTEIL DER AUFGEWENDETEN WASSERMENGEN AN VERBRAUCHERMENGEN	91
TABELLE 86 MEERWASSERBEDARF ZUR ERZEUGUNG DER UNTERSUCHTEN WASSERMENGEN DURCH UMKEHROSMOSE	92
TABELLE 87 PRODUKTIONSDAUER ZUR PRODUKTION DER UNTERSUCHTEN WASSERMENGEN DURCH DIE VORHANDENEN ANLAGEN CHILES.....	93
TABELLE 88 PRODUKTIONSDAUER ZUR PRODUKTION DER UNTERSUCHTEN WASSERMENGEN DURCH EINE THEORETISCHE ANLAGE.....	94
TABELLE 89 ENERGIEBEDARF ZUR ERZEUGUNG DER WASSERMENGEN DURCH UMKEHROSMOSE	94
TABELLE 90 IN CHILE ERZEUGTER STROM NACH ENERGietRÄGERN.....	95
TABELLE 91 VERHÄLTNIS DER ENERGIEMENGEN ZUR STROMERZEUGUNG 2021	95
TABELLE 92 PRODUKTIONSPOTENTIALE DURCH ELEKTROLYSE [TWH]	A
TABELLE 93 PRODUKTIONSPOTENTIALE DURCH ELEKTROLYSE [MT].....	B
TABELLE 94 BASISWERTE DER BUNDESLÄNDER ZUR WEITEREN BETRACHTUNG UND VERTEILUNG DER IMPORTIERTEN WASSERMENGEN	C
TABELLE 95 WASSEREINSATZ DER WIRTSCHAFTSZWEIGE UND PRIVATEN HAUSHALTE 2019 NACH BUNDESLÄNDERN; [98].....	D
TABELLE 96 AUFTEILUNG DER IMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2030 (MIN.) NACH ANTEIL AM GESAMTWASSERVERBRAUCH DER BUNDESLÄNDER	E
TABELLE 97 AUFTEILUNG DER IMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2030 (MAX.) NACH ANTEIL AM GESAMTWASSERVERBRAUCH DER BUNDESLÄNDER	F
TABELLE 98 AUFTEILUNG DER IMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2050 (MIN.) NACH ANTEIL AM GESAMTWASSERVERBRAUCH DER BUNDESLÄNDER	G
TABELLE 99 AUFTEILUNG DER IMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2050 (MAX.) NACH ANTEIL AM GESAMTWASSERVERBRAUCH DER BUNDESLÄNDER	H
TABELLE 100 AUFTEILUNG DER IMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2030 (MIN.) NACH ANTEIL AN INDUSTRIEUNTERNEHMEN DER BUNDESLÄNDER	I
TABELLE 101 AUFTEILUNG DER IMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2030 (MAX.) NACH ANTEIL AN INDUSTRIEUNTERNEHMEN DER BUNDESLÄNDER	J
TABELLE 102 AUFTEILUNG DER IMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2050 (MIN.) NACH ANTEIL AN INDUSTRIEUNTERNEHMEN DER BUNDESLÄNDER	K
TABELLE 103 AUFTEILUNG DER IMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2050 (MAX.) NACH ANTEIL AN INDUSTRIEUNTERNEHMEN DER BUNDESLÄNDER.....	L

TABELLE 104 ANTEIL DER GESAMTIMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2030 (MIN.) AN VERBRÄUCHEN DER BUNDESLÄNDER.....	M
TABELLE 105 ANTEIL DER GESAMTIMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2030 (MAX.) AN VERBRÄUCHEN DER BUNDESLÄNDER.....	N
TABELLE 106 ANTEIL DER GESAMTIMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2050 (MIN.) AN VERBRÄUCHEN DER BUNDESLÄNDER.....	O
TABELLE 107 ANTEIL DER GESAMTIMPORTIERTEN WASSERMENGE VON 2050 (MAX.) AN VERBRÄUCHEN DER BUNDESLÄNDER.....	P

Abkürzungsverzeichnis

AEL.....	<i>Alkalische Elektrolyse</i>
AUD.....	<i>Australischer Dollar</i>
CCS.....	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CCU.....	<i>Carbon Capture and Usage</i>
FCEV.....	<i>Fuel Cell Electric Vehicles</i>
GCC.....	<i>Gulf Cooperation Council</i>
HTEL.....	<i>Hochtemperatur Elektrolyse</i>
JPY.....	<i>Japanischer Yen</i>
NTP.....	<i>Normal Temperature and Pressure</i>
PEM.....	<i>Proton Exchange Membrane</i>
PtG.....	<i>Power-to-Gas</i>
PtX.....	<i>Power-to-X</i>
UAE.....	<i>United Arab Emirates</i>
UK.....	<i>United Kingdom</i>
USD.....	<i>US-Dollar</i>

1 Einleitung

Angesichts drohender Klimakatastrophen und der damit verbundenen Notwendigkeit Energiesysteme weltweit nachhaltiger zu gestalten, gewinnt die energetische Nutzung von Wasserstoff und seinen Derivaten immer mehr an Bedeutung. Der vielversprechende Energieträger Wasserstoff rückte in den letzten Jahren zunehmend in den Fokus internationaler Energiestrategien. So haben bereits 54 Länder [18] eigene Wasserstoffstrategien vorgestellt und teilweise Partnerschaften für den gemeinsamen Ausbau und Handel von Wasserstoff und wasserstoffbezogener Technologie beschlossen [7]. Die weltweite Nachfrage nach nachhaltigen Energiesystemen und Energieträgern führt zu einer zunehmenden internationalen Zusammenarbeit beim Thema Wasserstoff. Länder, die über großes Potential an erneuerbarer Energien verfügen, sehen im Export von Wasserstoff und seinen Derivaten eine vielversprechende Möglichkeit, ihre Energiewende voranzutreiben, internationale Beziehungen zu stärken und wirtschaftliche Relevanz zu erlangen. Gleichzeitig stehen mögliche Importländer vor der Herausforderung, ihre eigene Energieversorgung nachhaltiger zu gestalten und die Energieversorgungssicherheit des eigenen Landes sicherzustellen. Um diese Herausforderungen zu meistern, werden einige Länder in Zukunft vermehrt auf den Import von nachhaltigem Wasserstoff und seinen Derivaten setzen.

Diese Bachelorarbeit widmet sich der Betrachtung zukünftiger Importeure und Exporteure von Wasserstoff und seinen Derivaten auf dem Weltmarkt, sowie den Auswirkungen des Wasserstoffhandels auf nationale Wasserhaushalte. Im Zentrum dieser Arbeit steht die Betrachtung perspektivischer CO₂-armer Wasserstoffbedarfsmengen, voraussichtlicher Elektrolysekapazitäten, sowie möglicher Import- und Exportmengen. Hierfür wurden Importeure und Exporteure für den Zeitraum 2030-2050 identifiziert und ihre Wasserstoffstrategien analysiert. Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen wurden Szenarien erstellt, mit Hilfe derer fehlende Angaben der Kategorien Bedarf, voraussichtliche Elektrolysekapazität, sowie mögliche Import- und Exportmengen prognostiziert wurden.

Die vorliegende Bachelorarbeit strebt nicht nur an einen Überblick über zukünftige Akteure auf dem Wasserstoffmarkt zu schaffen, sondern auch die für die Produktion notwendigen Wassermengen, sowie die durch den Import von Wasserstoff importierten Wassermengen an einem Fallbeispiel zu visualisieren, einzuordnen und zu beurteilen. Durch die Untersuchung der zukünftigen Akteure und die Betrachtung der Auswirkungen des Wasserstoffhandels auf nationale Wasserhaushalte, soll eine Grundlage geschaffen werden, auf der, basierend auf den gewonnenen Ergebnissen, in zukünftigen Arbeiten aufgebaut werden kann.

2 Theoretischer Rahmen

2.1 Wasserstoff als Energieträger

Wasserstoff zeichnet sich durch seine gravimetrische Energiedichte aus. Diese ist mit einem Wert von ca. 120 MJ/Kg bzw. 33,3 kWh/Kg fast dreimal so hoch wie beispielsweise die von Heizöl oder Dieselmotorkraftstoff. Der volumetrische Wert der Energiedichte ist aufgrund der Dichte des Wasserstoffs gering [79].

Wasserstoff ist keine Energiequelle, da er in reiner Form in der Natur nur in kleinen Mengen zu finden ist. Jedoch lässt sich Wasserstoff auf mehreren Wegen herstellen und somit flexibel als Energieträger einsetzen. Wasserstoff ist aus allen regenerativen Energien herstellbar, lässt sich auf unterschiedliche Arten speichern und ohne Schadstoffemissionen direkt in Strom, Wärme und kinetische Energie umwandeln [75]. Durch seine vielseitigen Einsatzmöglichkeiten, wie beispielsweise im Verkehr, in der Chemie- und Lebensmittelindustrie, oder auch zur Unterstützung fluktuierender Energiesysteme, wird Wasserstoff oft als Energieträger der Zukunft betitelt [28].

Die wahrscheinlich wichtigste energetische Nutzung des Wasserstoffs ist die exotherme Oxidation. Hierbei wird innere chemische Energie als Wärme freigesetzt. Dies geschieht als sogenannte heiße Verbrennung. Die so gewonnene Wärme kann durch weitere Verfahren in mechanische Arbeit umgewandelt werden. Die Umwandlung von Wärme in Arbeit ist an den Carnot-Wirkungsgrad gebunden [104].

Die Oxidation von Wasserstoff in einer galvanischen Zelle erreicht geringere Temperaturen und wird daher als kalte Verbrennung betitelt. Die innere chemische Energie wird hierbei direkt in elektrische Arbeit umgesetzt und unterliegt nicht den Limitierungen des Carnot-Wirkungsgrades. In Kombination mit der geringen Umweltbelastung der Energiegewinnung und der lokalen Nutz- und Speicherfähigkeiten des Wasserstoffs ist die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger für eine nachhaltige Energieversorgung der Zukunft prädestiniert [104].

2.2 Wasserstofffarben

Zur Kennzeichnung der Herstellungs- und Gewinnungsmethoden, wird Wasserstoff in verschiedenen Farbklassen aufgeteilt. Die Aufteilung in grünen, blauen, türkisen oder grauen Wasserstoff dient dazu, die Herstellungsarten und letztlich das Maß an Klimaneutralität des so erzeugten Wasserstoffs zu unterscheiden. Die nachfolgenden Wasserstoffarten sind auf die, für diese Arbeit relevanten Arten, begrenzt.

2.2.1 Grüner Wasserstoff

Grüner Wasserstoff kann durch verschiedene Elektrolyseverfahren hergestellt werden. Mittels elektrischer Energie wird Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten. Durch den Einsatz erneuerbarer Energien aus beispielsweise Windkraft-, Wasserkraft- oder Solarkraftanlagen, ist die Herstellung von grünem Wasserstoff CO₂-neutral. „Grüner Wasserstoff“ gilt nur als grün, wenn der eingesetzte Strom aus erneuerbaren Quellen stammt. Die Verwendung von elektrischer Energie zur Gewinnung von Gasen wird auch als Power-to-Gas (PtG) bezeichnet [26].

2.2.2 Grauer Wasserstoff

Dem grünen Wasserstoff gegenüber steht der sogenannte graue Wasserstoff. Grauer Wasserstoff wird aus fossilen Energieträgern gewonnen. Das häufigste technische Verfahren ist die Dampfreformierung von Erdgas. Auch die Verwendung von Kohle ist möglich. Bei der Dampfreformierung wird Erdgas unter Hitze in Wasserstoff und CO₂ umgewandelt. Das so produzierte CO₂ wird anschließend in die Atmosphäre emittiert, wodurch der Gewinnungsprozess als klimaschädlich gilt. Es werden pro Tonne gewonnenen Wasserstoffs ca. 10 Tonnen CO₂ emittiert [26].

2.2.3 Blauer Wasserstoff

Der blaue Wasserstoff wird, wie der graue Wasserstoff auch, durch die Dampfreformierung von Erdgas oder Kohle gewonnen. Der Unterschied liegt in der weiteren Verarbeitung des CO₂. Dieses wird nicht in die Atmosphäre emittiert, sondern durch „Carbon Capture and Storage“ (CCS) bzw. „Carbon Capture and Usage“ (CCU) Methoden gespeichert oder weiterverarbeitet. Die Wasserstoffproduktion kann als treibhausgasneutral bilanziert werden [26].

2.3 Wasserstoffproduktion und die Abhängigkeit von der Ressource Wasser

2.3.1 Verfahren zur Gewinnung von Wasserstoff

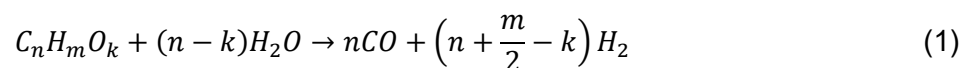
Im Folgenden wird exemplarisch das Verfahren der Dampfreformierung und das Verfahren der Elektrolyse genauer beleuchtet. Neben diesen Methodiken gibt es auch weitere Prozesse zur Gewinnung von Wasserstoff. Diese werden jedoch im Zuge dieser Arbeit vernachlässigt.

2.3.2 Reformierungsprozesse im Allgemeinen

Der Begriff Reformierung im Allgemeinen beschreibt die Erzeugung von Wasserstoff aus Kohlenwasserstoffen durch chemische Prozesse. Bei der Dampfreformierung werden sogenannte leichte Kohlenwasserstoffe (z.B. Methan) mit Wasserdampf in einem endothermen Prozess in Synthesegas (CO und H₂) umgewandelt. Bei der partiellen Oxidation wird, unter Einsatz schwerer Kohlenwasserstoffe (z.B. schweres Heizöl) und Sauerstoff, exotherm Synthesegas gewonnen. Die autotherme Reformierung kombiniert beide Verfahren. Im Idealfall deckt hierbei die exotherme partielle Oxidationsreaktion den Energiebedarf der endotherm ablaufenden Dampfreformierungsreaktion [31].

2.3.3 Dampfreformierung

Als Dampfreformierung wird der Prozess der endotherm katalytischen Umsetzung von leichten Kohlenstoffen, wie beispielsweise Erdgas, Flüssiggas oder Naphtha, mit Wasserdampf bezeichnet. Die Prozesse der Dampfreformierung laufen großtechnisch mit einem Dampfüberschuss bei Temperaturen von ca. 700-900°C und Drücken von 20-40 bar ab. Um die Reaktion zu beschleunigen, werden Katalysatoren eingesetzt. Diese bestehen beispielsweise aus Nickel oder Edelmetallen. Das entstehende Gemisch aus CO und H₂ wird auch als Synthesegas oder Wassergas bezeichnet. Die Nettoreaktionsgleichung lautet im Allgemeinen wie folgt:



Synthesegas findet als solches in der Chemieindustrie weitere Verwendung. Wird das Synthesegas zur Gewinnung von Wasserstoff verwendet, so wird das Kohlenmonoxid (CO) in der leicht exothermen Wassergasreaktion mit Wasserdampf katalytisch weiter zu Kohlendioxid und Wasserstoff reagieren. Diese Reaktion ist auch als Shiftreaktion bekannt. $\Delta_R H$ gibt die Reaktionsenthalpie der jeweiligen Reaktion an.



$$\Delta_R H = -41 \text{ kJ/mol}$$

Grundsätzlich werden zwei Shiftreaktionen unterschieden. Die Hochtemperatur-Shiftreaktion mit einer Reaktionstemperatur von 300-500°C, mit Fe/Cr- oder Co/Mo-Katalysatoren, und die Niedertemperatur-Shiftreaktion mit einer Reaktionstemperatur von 190-280°C, mit Messing oder CuO/ZnO-Katalysatoren. Das dabei entstehende Gasgemisch wird anschließend durch Druckwechseladsorption oder Membranabtrennung vom Kohlendioxid bereinigt.

Bei Verwendung von Erdgas wird zum Schutz des Nickelkatalysators das Erdgas entschwefelt, mit Wasserdampf versetzt und auf eine Temperatur von ca. 500°C erhitzt. In den Rohrbündeln des Katalysators, im Reformerofen, laufen folgende Reaktionen ab:



$$\Delta_R H = 206 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta_R H = 165 \text{ kJ/mol}$$

Aus dem Reformer tritt das Gas mit einer Temperatur von ca. 850°C aus. Nachdem das Gasgemisch abgekühlt wurde, wird das CO in der Shiftreaktion abgebaut. Die anschließende Gasreinigung erfolgt mittels Druckwechseladsorption.

Das Restgas mit einem brennbaren Anteil von ca. 60 % wird zurückgeführt und zusammen mit dem Brenngas zur Befeuerung des Reformers verwendet.

Dampfpreformierungsanlagen weisen Produktionskapazitäten von bis zu 100.000 Nm³/h an produziertem Wasserstoff auf. Kleinere Anlagen können bis zu 150 Nm³/h produzieren. Für einen Nennkubikmeter an reinem Wasserstoff werden ungefähr 0,45 Nm³ Methan benötigt. Der Wirkungsgrad einer Dampfpreformierungsanlage liegt hierbei zwischen 75 % und 80 % [31].

2.3.4 Elektrolyseverfahren im Allgemeinen

Die Elektrolyse wird genutzt, um das Edukt Wasser in die Produkte Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten. Die hierbei verwendete Energieform ist elektrischer Strom.

Der Prozess der Elektrolyse kann grundsätzlich in zwei Teilreaktionen unterteilt werden, die an der Kathode und an der Anode ablaufen. An der Kathode wird hierbei H₂ freigesetzt und an der Anode O₂. Die beiden Produktgase werden bei ihrer Produktion durch einen ionen-durchlässigen Separator (Diaphragma) getrennt. Die Reaktionsgleichung lautet hierbei wie folgt:



$$\Delta_R H = +571,8 \text{ kJ/mol}$$

Die Reaktion verläuft dabei endotherm, was am positiven Vorzeichen der Reaktionsenthalpie zu erkennen ist. Die verschiedenen Elektrolyse-Verfahren unterscheiden sich nach Betriebsdruck, Betriebstemperatur und Bauweise [31].

2.3.5 Alkalische Elektrolyse (AEL)

Die alkalischen Elektrolyseure sind weltweit im Einsatz, da sie als sehr erprobt gelten, eine hohe Langzeitstabilität aufweisen und mit vergleichsweise günstigen Materialien arbeiten. Als Elektrolyt wird eine Kaliumhydroxid-Lösung (KOH) mit einer Konzentration von 20-40 % genutzt. Unter einer Gleichspannung von ca. 1,5 Volt wird an der Kathode Wasserstoff und an der Anode Sauerstoff gebildet. Als Elektroden werden nickelbasierte, rutheniumoxid- oder iridiumoxidbeschichtete Titanelektroden verwendet. Die Anode und Kathode werden bei alkalischen Elektrolyseuren durch eine poröse, semipermeable Zirfon-Membran getrennt. Diese limitiert die Effizienz des Elektrolyseurs, da sie lediglich einem begrenzten Druck standhält. Der produzierte Wasserstoff muss daher im Anschluss unter Energieaufwand komprimiert werden [100].

Die üblichen Betriebstemperaturen der AEL liegen zwischen 80°C und 100°C. Ein repräsentativer AEL-Elektrolyseur erzeugt zwischen 200 und 500 m³ H₂ pro Stunde, bei einer Stromdichte von 3 kA/m². Der Speisewasserbedarf liegt hierbei, je nach Hersteller, bei 0,85-1 Liter pro m³ H₂ (NTP). Der Wirkungsgrad bei etwa 70 %. Der alkalische Elektrolyseur eignet sich auch für einen intermittierenden Betrieb und kann daher den Anforderungen des Lastmanagements im Stromnetz und stark fluktuierenden Energiequellen angepasst werden. Die Technologie ist folglich für den Einsatz in Power-to-Gas (PtG) Konzepten von großer Bedeutung [68].

2.3.6 PEM-Elektrolyse

Im PEM-Elektrolyseur zum Zweck der Gewinnung von Wasserstoff, kommt ein Festpolymer-Elektrolyt zum Einsatz. Dieser wird auch als Proton Exchange Membrane (PEM) bezeichnet. Die aggressiv saure Umgebung bei der PEM-Elektrolyse, stellt hohe Anforderungen an das Material. Aus diesem Grund ist die Polymermembran kathodenseitig mit einer porösen platinbeschichteten Kohlenstoffelektrode ausgestattet. Die Anode besitzt meist eine Ruthenium- oder Iridiumoxidbeschichtung. PEM-Elektrolyseure sind deutlich kompakter und dynamischer als AEL-Elektrolyseure.

Die Erzeugung von Wasserstoff geschieht bei einer Temperatur von etwa 120°C, einem Druck von 10-30 bar und einem Stromverbrauch von ca. 4-6 kWh_{el}/m³ H₂ (NTP). Laut Herstellerangaben lassen sich die Volumenströme zu Modulen von 80-240 m³/h H₂ (NTP) zusammenstellen. Die Stromdichte ist mit 10-15 kA/m² deutlich höher als die der AEL. Die PEM-Elektrolyseure benötigen eine Speisewasser-Zufuhr von 1-1,3 Litern pro Kubikmeter H₂ (NTP), wobei 0,3 Liter Abwasser entstehen. Bezogen auf den unteren Heizwert von Wasserstoff besitzen die PEM-Elektrolyseure Wirkungsgrade von ca. 70 %.

Auch die PEM-Elektrolyse-Technologie erlaubt einen intermittierenden, sowie einen Überlastbetrieb, wodurch sie für den Einsatz in Power-to-Gas Konzepten geeignet ist [68].

2.3.7 HTE-Elektrolyse (Hochtemperatur- oder Dampfelektrolyseur)

Je nach Aufbau arbeitet der Hochtemperatur-Elektrolyseur in einem Temperaturspektrum zwischen 100°C und ca. 900°C, wobei der Wirkungsgrad mit steigender Temperatur zunimmt. Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse trifft Wasserdampf auf eine Festoxid-Elektrolysezelle. In dieser Zelle erfolgt die Spaltung der Wassermoleküle über Nickel-Cermet Dampf-Wasserstoffelektroden und Mischoxide aus Lanthan, Strontium und Cobalt-Sauerstoffelektroden.

Im autothermen Verfahren (parallele exotherme und endotherme Reaktion), bei einem Druck von 20bar und einer Temperatur von 900°C, wird 3,2 kWh_{el} und 0,6 kWh_{th} Niedertemperaturwärme pro m³H₂ eingesetzt. Beim allothermen Verfahren (äußere Wärmezufuhr) werden 2,6 kWh_{el}, 0,6 kWh_{th} Niedertemperaturwärme und 0,5 kWh_{th} Hochtemperaturwärme benötigt. Es können Wirkungsgrade von bis zu 90 % erzielt werden. Die Technologie der HTE-Elektrolyse eignet sich besonders für den Einsatz in energieintensiven Sektoren, da dort zumeist große Mengen an Abwärme verfügbar sind [68].

2.3.8 Abhängigkeit der Ressourcen Wasser und Energie

Basierend auf den Molmassenverhältnissen von Wasser H_2O (18,01528 g/mol) und Wasserstoff H_2 (2,01588 g/mol) lässt sich ein theoretischer Wasserbedarf für die Herstellung eines Kilogramms Wasserstoff H_2 ermitteln. Dieser liegt bei vollständiger stofflichen Umsetzung bei $8,937 \text{ Kg}_{H_2O}/\text{Kg}_{H_2}$. Die Reaktionsgleichung lautet wie folgt:



$$\Delta_R H = +571,8 \text{ kJ/mol}$$

Die Reaktionsenthalpie beträgt umgerechnet ca. +0,0794 KWh/mol. Die daraus resultierende externe Energiemenge für die Herstellung eines Kilogramms Wasserstoff, beträgt ca. 39,4 KWh. Da die angegebenen Werte lediglich theoretische Werte sind und keinerlei Wirkungsgrade oder andere Gegebenheiten berücksichtigen, werden die Wasser- und Energiebedarfe einzelner Technologien im Folgenden genauer beleuchtet.

Der Wasserverbrauch der verwendeten Technologie variiert aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsgradverluste. So hat die AEL einen Wasserbedarf von 10,1-11,9 Kg/Kg H_2 , die PEMEL 11,9-15,5 Kg/Kg H_2 und die HTEL ca. 16 Kg/Kg H_2 . Hinzu kommt ein Wasserüberschuss, zum Schutz der Elektrolyseure von 10-20 %. Der Betrieb der Anlagen benötigt ebenfalls Wasser, welches zur Kühlung eingesetzt wird. Dieses überschreitet die Menge des Edukt Wassers um einen Faktor 50 bis 300 [99]. Jedoch sollten diese Wassermengen gesondert betrachtet werden, da sie je nach System einmalig aufgewendet werden müssen. Dieser Aufwand an Wasser wird in dieser Arbeit nicht genauer betrachtet.

Der Wasserverbrauch, der in dieser Arbeit verwendet wird, liegt inklusive 20 % Schutzaufschlag, je nach Technologie, bei $12,14 - 19,53 \text{ Kg}_{H_2O}/\text{Kg}_{H_2}$.

Der Wasserverbrauch zur Bereitstellung der eingesetzten Energie wird hierbei nicht berücksichtigt. Dieser variiert je nach eingesetzter Technologie und Verwendungszweck. So kann beispielsweise Wasser in Kühlsystemen nach einmaligem Aufwand in einem Kreislauf dauerhaft genutzt werden. Wasser, was zur Herstellung der Energiesystemen verwendet, wird hingegen nicht [99].

Für die Berechnung des Energiebedarfs zur Herstellung von Wasserstoff wird ein Wirkungsgrad von 70 % angenommen. Somit ergibt sich auf Basis des theoretischen Energiebedarfs ein Bedarf von ca. $56,3 \text{ kWh/Kg}_{H_2}$.

Aufgrund des hohen Marktanteils der PEM und AEL-Elektrolyse werden im weiteren Verlauf mit den Werten dieser gerechnet [3].

2.3.9 Bereitstellung der Ressource Wasser durch Meerwasserentsalzung

Die Entsalzung von Meerwasser ist ein wichtiger Prozess, um Süßwasser aus dem salzhaltigem Meerwasser zu gewinnen. Die Entsalzung wird vor allem dann notwendig, wenn der Bedarf an Wasser das verfügbare Süßwasserkontingent übersteigt. In vielen Teilen der Welt kommen Entsalzungstechnologien zum Einsatz, um den Wasserbedarf von Haushalten, Landwirtschaft und Industrie zu decken. Obwohl die Meerwasserentsalzung aufgrund ihres hohen Energiebedarfs eine sehr teure Technologie ist, gewinnt sie immer mehr an Wichtigkeit, um der zunehmenden Wasserknappheit entgegenzuwirken.

2.3.9.1 Umkehrosmose

Bei der Umkehrosmose wird Rohwasser (Meerwasser oder verschmutztes Süßwasser) mittels hohen Drucks durch eine semipermeable Membran gepresst. Der hohe Druck ist hierbei notwendig, um den osmotischen Druck zu überwinden. Die semipermeable Membran dient hierbei als wasserdurchlässiger Filter, welcher Salze, Bakterien, Kalk und Giftstoffe wie z.B. Schwermetalle zurückhält. Mit beispielsweise steigender Salzkonzentration im hinterbliebenen Konzentrat steigt der osmotische Druck, wodurch der Prozess irgendwann zum Stehen kommen würde. Um dem entgegenzuwirken, wird das Konzentrat in regelmäßigen Abständen abgeführt.

Je nach Verschmutzungsgrad des Rohwassers und Verwendung des Reinwassers, ist eine Vorreinigung notwendig. Durch die Vorfilter können Grobstoffe (Partikelgröße bis zu 20 Mikrometer) oder Keime gezielt entfernt werden. Verwendet werden hierbei meistens Aktivkohlefilter, aber auch UV-Bestrahlungen können als zusätzliche Sicherheitsstufe nachgeschaltet werden. Die Vorfilterung mindert den Verschleiß der Anlage und der Membran. Das so gewonnene Reinwasser kann im Anschluss bedenkenlos als Trinkwasser oder in industriellen Prozessen verwendet werden.

Je nach Verschmutzung und Salzkonzentration des Rohwassers muss aufgrund der hohen Drücke mit einem Energieaufwand von 2-3 kWh/m³ Reinwasser gerechnet werden [73]; [70].

2.3.9.2 Mehrstufige Entspannungsverdampfung

Bei der mehrstufigen Entspannungsverdampfung handelt es sich um ein thermisches Verfahren zur Gewinnung von Reinwasser. Dieses Verfahren wird auch als MFS (Multi-Stage-Flash Evaporation) -Verfahren bezeichnet.

Das mehrstufige Entspannungsverdampfungsverfahren ist ein Verfahren, das auf der Verdampfung und Kondensation von Wasser basiert. Es ist die weltweit häufigste Methode zur Entsalzung von Meerwasser. Das zu verarbeitende Meerwasser wird durch eine Pumpe aus dem Meer gefördert und anschließend in einer Vakuumkammer verdampft. Die hierfür benötigte Wärmeenergie wird oftmals in Form von Abwärme aus nahestehenden Kraftwerken bereitgestellt. Der dabei entstehende Dampf wird über Wärmetauscher kondensiert und das so gewonnene Reinwasser aufgefangen. Die Wärmetauscher werden hierbei mit dem geförderten Meerwasser durchströmt, wodurch das Meerwasser vorgewärmt wird und gleichzeitig den Wasserdampf kondensiert. Das Verfahren besteht aus mehreren hintereinander geschalteten Stufen. In jeder Stufe wird die Salzkonzentration erhöht und der Dampfanteil reduziert. Als Endprodukte des Prozesses erhält man Reinwasser und eine hochkonzentrierte Salzlake, welche auch als Brine bezeichnet wird.

Die Sole wird im Anschluss an den Prozess zurück ins Meer geleitet, wodurch Schäden am lokalen Ökosystem entstehen können [71]; [30].

3 Methodik

Im Folgenden wird die methodische Vorgehensweise dieser Bachelorarbeit genauer beleuchtet. Zur Erarbeitung der Literaturgrundlage wurde eine systematische Recherche als auch eine Recherche nach dem „Schneeballsystem“ durchgeführt. Die systematische Recherche diente dazu Literatur zu bestimmten Suchbegriffen zu finden, um so eine Erstauswahl an Literatur für diese Arbeit zu ermitteln. Die Methode nach dem „Schneeballsystem“ wurde verwendet, um basierend auf der Erstauswahl ergänzende Literatur aus den jeweiligen Verzeichnissen zu gewinnen und so die Literaturgrundlage dieser Arbeit zu bilden.

Die Literaturrecherche fand im Zeitraum vom 23.10.2023 bis zum 30.11.2023 statt. Hierbei wurde deutschsprachige, als auch englischsprachige Literatur verwendet. Untersucht wurden die Produktionsverfahren zur Gewinnung von Wasserstoff und der damit verbundenen Abhängigkeit der Ressource Wasser. Ebenfalls wurden Wasserstoffstrategien von einzelnen Ländern, sowie weiterführende Studien, die sich mit Import-, Export- und Produktionspotentialen von Wasserstoff und seinen Derivaten bestimmter Länder beschäftigen, analysiert. Basierend auf den Ergebnissen wurde der Einfluss des Wasserstoffhandels auf die jeweiligen Wasserhaushalte an einem exemplarischen Beispiel erarbeitet. Hierzu wurden ergänzende Statistiken zu anderen Wasserverbräuchen und Dargebotsmengen ermittelt und mit den gehandelten Wassermengen verglichen. Die Untersuchungsgruppe dieser Arbeit sind einzelne Länder, welche perspektivisches Potential an Import- oder Exportmengen sowie Produktionskapazitäten von Wasserstoff und seinen Derivaten aufweisen.

Ziel der systematischen Literaturrecherche war es Länder zu identifizieren, welche als Akteure auf einem zukünftigen Wasserstoffmarkt als Importeur oder als Exporteur von Wasserstoff und seinen Derivaten agieren. Die Literaturrecherche wurde hierbei im Internet durchgeführt. Größtenteils wurden für die Suche Google oder Google Scholar verwendet. Aber auch die Datenbanken des Fraunhofer Institutes, sowie die der Internationalen Energieagentur (IEA) wurden genutzt.

Die verwendeten Suchbegriffe wurden basierend auf den zu untersuchenden Fragestellungen dieser Arbeit ausgewählt. So wurden die ersten Quellen über die Kombination der folgenden Suchbegriffe ermittelt: „Import“, „Export“, „Wasserstoff“, „2030“, „2050“, „Hydrogen“, „Trade“, „Flows“.

Zu Beginn wurden Studien ausgewählt und gesichtet, welche sich mit zukünftigen Bedarfen und Produktionskapazitäten von Wasserstoff und seinen Derivaten weltweit beschäftigen. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde eine Auswahl an Ländern erstellt,

welche großes Export- und/oder Importpotential auswiesen. Ein weiteres Auswahlkriterium hierbei war die Veröffentlichung einer Wasserstoffstrategie der jeweiligen Länder.

Die einzelnen Länder wurden genauer untersucht und deren Wasserstoffstrategien für den Zeitraum 2030 bis 2050 analysiert. Hierbei war wichtig, welche allgemeinen Ziele die jeweiligen Länder verfolgen und wie diese erreicht werden sollen. Diese umfassten die Versorgung, Nutzung und Produktion von Wasserstoff und seinen Derivaten. Falls vorhanden wurden ebenfalls Import-, Export und Produktionspotentiale bestimmt. Bei fehlenden Angaben wurde mittels „Schneeballverfahren“ weitere Literatur erarbeitet, um die fehlenden Angaben zu ermitteln. Je nach Ergebnissen wurden die einzelnen Ländern entweder der Gruppe der zukünftigen Importeure oder die der zukünftigen Exporteure zugewiesen. In einigen Ländern sind Exporte und Importe von Wasserstoff möglich. Diese Länder wurden trotzdem einer der Kategorien (Importeur oder Exporteur) zugeordnet.

Nach Ermittlung der zukünftigen Importeure und Exporteure von Wasserstoff und seinen Derivaten, wurde eine engere Auswahl dieser Länder getroffen und deren Import- oder Exportpotential für den Zeitraum 2030 bis 2050 ermittelt.

Die Auswahl geschah hierbei anhand der zur Verfügung stehenden Literatur, der Verfügbarkeit einer Wasserstoffstrategie auf Deutsch oder Englisch und den darin enthaltenen Angaben zu Import-, Export- und der Produktion von Wasserstoff und seinen Derivaten.

Die Literaturrecherche zum Thema „Herstellung von Wasserstoff und dem damit verbundenen Ressourcenbedarf“, wurde über den Bibliothekskatalog der HAW Hamburg durchgeführt. Hierbei wurde Literatur ausgewählt, die den Prozess der Wasserstoffherstellung beschreibt. Der Wasserbedarf pro Kg Wasserstoff wurde anschließend aus den gewonnenen Erkenntnissen ermittelt.

3.1 Identifizierung der Akteure auf dem Wasserstoffmarkt der Zukunft

Die Identifizierung der zu betrachtenden Länder, geschah mittels Analyse bereits vorhandener Studien zum Thema Wasserstoffhandel. Hierbei wurde ermittelt, welche Länder am häufigsten über die betrachteten Studien hinweg in der jeweiligen Kategorie Importeur oder Exporteur genannt wurden. Aus den gewonnenen Ergebnissen wurde eine Auswahl an Ländern erstellt.

In Tabelle 1 sind die jeweiligen Studien und genannten Export-Länder aufgelistet.

Quelle:	[9]	[53]		[85]	[2]	[50]
Zeithorizont:	2030	2030	2050	2030/2050	k.A.	2050
Länder:	Marokko	Island	Ägypten	Spanien	GCC	Australien
	Spanien	Kanada	Algerien	Portugal	Australien	Chile
	Chile	Marokko	Argentinien	Niederlande	Kanada	Nord Afrika
	Niederlande	Norwegen	Australien	UK	Chile	Kolumbien
		Tunesien	Kanada	Australien	Argentinien	Spanien
		Türkei	Kasachstan	Chile		Italien
			Russland	Marokko		
			Saudi-Arabien	Norwegen		
				UAE		
				Namibia		

Tabelle 1 Untersuchte Studien zur Identifizierung perspektivischer Exporteure

In Tabelle 2 sind die jeweiligen Studien und genannten Import-Länder aufgelistet.

Quelle:	[2]		[50]
Zeithorizont:	k.A.	k.A.	2050
Länder:	Deutschland	Brasilien	Deutschland
	Frankreich	Indien	Japan
	UK	USA	Süd-Korea
	Italien	China	Latein Amerika
	Japan		Rest Europa
	Südkorea		Argentinien
			Türkei
			Indonesien

Tabelle 2 Untersuchte Studien zur Identifizierung perspektivischer Importeure

Die Länder Brasilien, Indien, USA und China wurden in der angegebenen Studie als Selbstversorger aufgelistet und werden daher in der Tabelle 2 gesondert aufgelistet. Sie wurden aus Mangel an weiteren Daten als potenzielle Importeure mit aufgelistet.

Die Vorauswahl an zukünftigen Import- und Exportländern wurde basierend auf der Häufigkeit der genannten Länder sowie der geografischen Verteilung der Länder erstellt. So wurde versucht Exportländer stellvertretend für eine Region oder einen Kontinent auszuwählen. Aufgrund der hohen Anzahl an Industrienationen wurde der Hauptfokus bei den Importländern auf Europa und Asien gelegt [93].

Tabelle 3 zeigt die Auswahl an Ländern, welche für die weitere Betrachtung als Importeure oder Exporteure von Wasserstoff und seinen Derivaten ausgewählt wurden.

Nr.	Exporteure	Importeure
1.	Marokko	Deutschland
2.	Chile	Japan
3.	Niederlande	Süd-Korea
4.	Kanada	EU
5.	Norwegen	Frankreich
6.	Argentinien	Italien
7.	Australien	UK
8.	Spanien	USA
9.	UAE	China
10.	Süd Afrika	Türkei

Tabelle 3 Auswahl der zu betrachtenden Importeure und Exporteure

Basierend auf der Verfügbarkeit von Länderspezifischen Daten wurden anhand dieser Auswahl jeweils vier Länder, der Kategorien Importeure und Exporteure, ausgewählt und genauer betrachtet. Bei diesen Ländern handelt es sich um Importeure oder Exporteure von Wasserstoff und seinen Derivaten, die eindeutig der einen oder der anderen Kategorie zugeordnet werden konnten. Dies wurde den jeweiligen Länderstrategien entnommen. Bei den nicht genauer betrachteten Ländern sind teilweise sowohl Exporte als auch Importe möglich, jedoch überwiegt der Anteil Ihrer jeweils zugeteilten Kategorie im Betrachtungszeitraum.

Folgende Länder wurden für eine genauere Betrachtung ausgewählt:

Exporteure: Chile, Marokko, Kanada, Australien

Importeure: Deutschland, Japan, Süd-Korea, EU

Die Ergebnisse der Länder Betrachtung wurden anschließend in zwei Tabellen festgehalten (siehe Länderübersichtstabellen 46-55). Die Tabelle der voraussichtlichen Importeure beinhaltet die Kategorien Bedarf, Importbedarfe, sowie die voraussichtlichen Elektrolysekapazitäten der jeweiligen Länder für die Jahre 2030 und 2050. Die Tabelle der voraussichtlichen Exporteure beinhaltet die Kategorien Bedarf, mögliche Exportmengen, sowie die voraussichtlichen Elektrolysekapazitäten der jeweiligen Länder für die Jahre 2030 und 2050. Bei den angegebenen Mengen handelt es sich um CO₂-armen Wasserstoff (inkl. Derivate). Grund hierfür sind fehlende Angaben zu der genauen Klimabilanz des jeweiligen Wasserstoffs in den meisten Länderstrategien.

In einigen Fällen wurden aufgrund der in Länderstrategien angegebenen Daten Werte für Jahre innerhalb des Zeitraums von 2030 bis 2050 aufgeführt. Im Falle der Türkei wurden Werte für das Jahr 2053 angegeben.

Für die Kategorien Bedarf, Importbedarf und mögliche Exportmengen, wurden hierbei Minimal- und Maximalwerte angegeben. Sofern Angaben mit Quellen belegt werden konnten, wurde dies bei der voraussichtlichen Elektrolysekapazität ebenfalls getan. Bei nur einem genannten Wert der voraussichtlichen Elektrolysekapazität wurde dieser für das ganze Jahr übernommen. Grundsätzlich wurde der erste Literaturwert, der für eine Kategorie bestimmt werden konnte, als Minimalwert angenommen, bis ein niedrigerer Wert ermittelt werden konnte. Daher kommt es in den Tabellen häufiger zu fehlenden Maximalwerten, bei gegebenen Minimalwerten. Andersherum jedoch nicht. Eine Ausnahme bilden hierbei die Bedarfsangaben Kanadas für das Jahr 2050. Diese stammen aus derselben Quelle wie die maximalen Werte der möglichen Exportmengen und wurden daher den maximalen Bedarfen für das Jahr 2050 zugeordnet.

3.2 Methodik der Szenarien

Aufgrund fehlender Angaben in den Länderübersichtstabellen 46-55, in den Kategorien: Bedarf, Importbedarf, mögliche Exportmengen und voraussichtliche Elektrolysekapazitäten, wurden zwei Szenarien erstellt, um diese Angaben zu ergänzen. Das erste Szenario ist das Szenario-DEU, mit Hilfe dessen die Angaben der voraussichtlichen Importeure basierend auf den Werten Deutschlands ermittelt wurden. Das zweite Szenario ist das Szenario-CHL, mit Hilfe dessen die Angaben der voraussichtlichen Exporteure basierend auf den Werten Chiles ermittelt wurden. Die einzelnen Szenarien und die verwendeten Vorgehensweisen werden im weiteren Verlauf genauer beleuchtet.

3.3 Länderübersicht: Szenario-DEU

voraussichtlicher Importeur	Deutschland			
	2030		2050	
Jahr				
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	95,00	130,00	110,00	800,00
Bedarf [Mt]	2,85	3,90	3,30	24,02
Importbedarf [TWh]	47,50	91,00	55,00	400,00
Importbedarf [Mt]	1,43	2,73	1,65	12,01
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	10		50	80

Tabelle 4 Länderübersicht: Szenario-DEU voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Deutschland)

Das Szenario-DEU basiert auf den Angaben Deutschlands für die Jahre 2030 und 2050 in den folgenden Kategorien:

- Bedarf
- Importbedarf
- voraussichtliche Elektrolysekapazität

Die Werte Deutschlands wurden für dieses Szenario als Basiswerte gewählt, da die Angaben zu den genannten Kategorien vollständig vorhanden waren.

Das Szenario-DEU verfolgt das Ziel mit Hilfe der Basiswerte fehlende Angaben der anderen Länder zu errechnen. Mit Hilfe der errechneten Werte, soll eine Abschätzung von Größenordnungen, der gewählten Kategorien, ermöglicht werden. Ergänzend zu den Angaben Deutschlands wurde die Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (siehe Anhang) verwendet, um weitere Abschätzungen zu treffen.

3.3.1 Basisfaktoren und Ermittlungsverfahren

Zur Bestimmung fehlender Werte anderer Länder in den Kategorien Bedarf und Importbedarf wurden Basisfaktoren ermittelt, welche auf den Angaben Deutschlands in den jeweiligen Kategorien basieren. Diese Basisfaktoren bilden die Grundlage weiterer Berechnungen. Die Basisfaktoren in diesem Szenario sind folgende:

Der **Bedarfsquotient [B]**

Der Bedarfsquotient wurde für die Jahre 2030 und 2050 ermittelt und bildet das Verhältnis aus Minimal- und Maximalwert der Kategorie Bedarf eines jeweiligen Jahres ab. Der Bedarfsquotient B_{2030} wird hierbei für die Jahre zwischen 2030 und 2050 genutzt. Der Bedarfsquotient B_{2050} wird für Werte ab 2050 und darüber hinaus verwendet.

Der **Bedarf-Import-Faktor [F]**

Der Bedarf-Import-Faktor wurde für die jeweiligen Minimal- und Maximalwerte der Jahre 2030 und 2050 ermittelt. Er bildet das Verhältnis aus Importbedarfsmenge und Bedarfsmenge ab. Der Bedarf-Import-Faktor F_{2030} wird hierbei für die Jahre zwischen 2030 und 2050 genutzt. Der Bedarf-Import-Faktor F_{2050} wird für Werte ab 2050 und darüber hinaus verwendet.

Ergänzend zu den Basisfaktoren wurden zwei weitere Verfahren verwendet, um bei fehlenden Angaben zur voraussichtlichen Elektrolysekapazität diese zu bestimmen, oder basierend auf der angegebenen Elektrolysekapazität, Angaben der Kategorie Bedarf zu ermitteln. Die beiden Verfahren in diesem Szenario sind folgende:

Das **Differenzverfahren**

Das Differenzverfahren dient der Ermittlung der voraussichtlichen Elektrolysekapazität. In diesem Verfahren wird die Differenz der Maximalwerte der Kategorien Bedarf und Importbedarf eines Jahres gebildet. Mittels der errechneten Differenz wird in der Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (siehe Anhang) die Elektrolysekapazität herausgelesen, welche mit einer Volllaststundenzahl von 8000 Stunden, den maximal errechneten Differenzwert decken kann.

Das **Kapazitätsverfahren**

Das Kapazitätsverfahren dient der Ermittlung des minimalen und maximalen Bedarfs eines jeweiligen Jahres. In diesem Verfahren wird basierend auf der angegebenen Elektrolysekapazität, mithilfe der Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (siehe Anhang), ein Produktionswert für 1000 und für 8000 Volllaststunden ermittelt. Diese Werte dienen als Ausgangspunkte für die Ermittlung der Bedarfswerte des jeweiligen Jahres.

Mit Hilfe des jeweiligen Bedarf-Import-Faktors können so der minimale und maximale Bedarfswert ermittelt werden.

Das Kapazitätsverfahren ist der Verwendung der Faktoren untergeordnet. Es wird nur verwendet, falls ausschließlich Daten zu der voraussichtlichen Elektrolysekapazität vorhanden sind.

Zur Kennzeichnung der jeweils verwendeten Basisfaktoren und Verfahren, wurde eine Farbskala eingeführt.

Farbskala des Szenario-DEU	
Literaturwert	
Differenzverfahren	
Kapazitätsverfahren	
Bedarfsquotient [B]	
Bedarf-Import-Faktor [F]	

Tabelle 5 Farbskala des Szenario-DEU

3.3.2 Berechnung der Basisfaktoren

Ausgangspunkt der Berechnung der Basisfaktoren sind die Angaben für Deutschland aus der Tabelle 4.

Der Bedarfsquotient [B]

Der Bedarfsquotient ist der Quotient aus dem maximal und minimal Wert der Kategorie Bedarf des jeweiligen Jahres.

Allgemein:

$$\text{Bedarfsquotient} = \frac{\text{Bedarf}_{\max.}}{\text{Bedarf}_{\min.}} \quad (7)$$

Beispiel:

$$\text{Bedarfsquotient}_{2030} = \frac{\text{Bedarf}_{2030_{\max.}}}{\text{Bedarf}_{2030_{\min.}}} \quad (8)$$

$$B_{2030} = \frac{130 \text{ TWh}}{95 \text{ TWh}} = 1,37$$

$$\text{Bedarfsquotient}_{2050} = \frac{\text{Bedarf}_{2050_{\max.}}}{\text{Bedarf}_{2050_{\min.}}} \quad (9)$$

$$B_{2050} = \frac{800 \text{ TWh}}{110 \text{ TWh}} = 7,27$$

Der Bedarf-Import-Faktor [F]

Der Bedarf-Import-Faktor ist der Quotient der Kategorien Importbedarf und Bedarf eines Jahres. Er wird für jeweils die Minimal- und Maximalwerte eines Jahres bestimmt. Bei Betrachtung der Formeln ist zu beachten, dass der Ausdruck „*Bedarf – Import – Faktor*“ keine Rechnung, sondern einen Begriff darstellt.

Allgemein:

$$\text{Bedarf} - \text{Import} - \text{Faktor} = \frac{\text{Importbedarf}}{\text{Bedarf}} \quad (10)$$

Beispiel:

$$\text{Bedarf} - \text{Import} - \text{Faktor}_{2030_{\min.}} = \frac{\text{Importbedarf}_{2030_{\min.}}}{\text{Bedarf}_{2030_{\min.}}} \quad (11)$$

$$F_{2030_{\min.}} = \frac{47,5 \text{ TWh}}{95 \text{ TWh}} = 0,5$$

$$\text{Bedarf} - \text{Import} - \text{Faktor}_{2030_{\max.}} = \frac{\text{Importbedarf}_{2030_{\max.}}}{\text{Bedarf}_{2030_{\max.}}} \quad (12)$$

$$F_{2030_{\max.}} = \frac{91 \text{ TWh}}{130 \text{ TWh}} = 0,7$$

$$\text{Bedarf} - \text{Import} - \text{Faktor}_{2050_{\min.}} = \frac{\text{Importbedarf}_{2050_{\min.}}}{\text{Bedarf}_{2050_{\min.}}} \quad (13)$$

$$F_{2050_{\min.}} = \frac{55 \text{ TWh}}{110 \text{ TWh}} = 0,5$$

$$\text{Bedarf} - \text{Import} - \text{Faktor}_{2050_{\max.}} = \frac{\text{Importbedarf}_{2050_{\max.}}}{\text{Bedarf}_{2050_{\max.}}} \quad (14)$$

$$F_{2050_{\max.}} = \frac{400 \text{ TWh}}{800 \text{ TWh}} = 0,5$$

Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der Basisfaktoren.

Basisfaktoren des Szenarios-DEU				
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarfsquotient [B]:	1,37		7,27	
Bedarf-Import-Faktor [F]:	0,50	0,70	0,50	0,50

Tabelle 6 Basisfaktoren des Szenario-DEU

3.3.3 Anwendung des Szenario-DEU:

voraussichtlicher Importeur	Japan					
Jahr	2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	100,00	137,00	400,00	548,00	666,00	706,00
Bedarf [Mt]	3,00	4,11	12,00	16,46	20,00	21,20
Importbedarf [TWh]	10,00	95,90	68,00	383,60	333,00	353,00
Importbedarf [Mt]	0,30	2,88	2,04	11,52	10,00	10,60
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	20		60		65	

Tabelle 7 Länderübersicht: Szenario-DEU voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Japan)

Für dieses Beispiel wurden die Werte Japans gewählt, da hier beide Basisfaktoren und das Differenzverfahren genutzt wurden, um fehlende Werte in der Tabelle zu ermitteln. Zur Ermittlung der fehlenden Werte wurden folgende Rechnungen und Verfahren durchgeführt:

3.3.3.1 Anwendung des Bedarfsquotienten [B]

Die Ermittlung der Bedarfswerte für die Jahre 2030 und 2040 wurde mit Hilfe des Bedarfsquotienten [B] durchgeführt.

Allgemein:

$$Bedarf_{max.} = Bedarf_{min.} * B \quad (15)$$

Beispiel:

$$Bedarf_{2030_{max.}} = Bedarf_{2030_{min.}} * B_{2030} \quad (16)$$

$$137 \text{ TWh} = 100 \text{ TWh} * 1,37$$

$$Bedarf_{2040_{max.}} = Bedarf_{2040_{min.}} * B_{2030} \quad (17)$$

$$548 \text{ TWh} = 400 \text{ TWh} * 1,37$$

3.3.3.2 Anwendung des Bedarf-Import-Faktors [F]

Die Ermittlung der maximalen Importbedarfswerte für die Jahre 2030 und 2040 wurde, basierend auf den im ersten Schritt ermittelten Bedarfswerten, mit Hilfe des Bedarf-Import-Faktors [F] durchgeführt.

Allgemein:

$$\text{Importbedarf} = \text{Bedarf} * F \quad (18)$$

Beispiel:

$$\text{Importbedarf}_{2030_{\max.}} = \text{Bedarf}_{2030_{\max.}} * F_{2030_{\max.}} \quad (19)$$

$$95,9 \text{ TWh} = 137 \text{ TWh} * 0,7$$

$$\text{Importbedarf}_{2040_{\max.}} = \text{Bedarf}_{2040_{\max.}} * F_{2030_{\max.}} \quad (20)$$

$$383,6 \text{ TWh} = 548 \text{ TWh} * 0,7$$

Die Ermittlung des minimalen Importbedarfswertes für das Jahr 2050 wurde, basierend auf dem Literaturwert des minimalen Bedarfes für 2050, mit Hilfe des Bedarf-Import-Faktors [F] durchgeführt.

$$\text{Importbedarf}_{2050_{\min.}} = \text{Bedarf}_{2050_{\min.}} * F_{2050_{\min.}} \quad (21)$$

$$333 \text{ TWh} = 666 \text{ TWh} * 0,5$$

3.3.3.3 Anwendung des Differenzverfahren

Zur Ermittlung der voraussichtlichen Elektrolysekapazitäten für die Jahre 2030, 2040 und 2050, wurde das Differenzverfahren verwendet. Hierfür mussten im ersten Schritt die Differenzen der jeweiligen Minimal- und Maximalwerte der Kategorien Bedarf und Importbedarf eines Jahres errechnet werden.

Allgemein:

$$\text{Differenz aus Bedarf und Importbedarf} = \text{Bedarf} - \text{Importbedarf} \quad (22)$$

Die Ergebnisse dieser Rechnung sind in Tabelle 8 dargestellt.

voraussichtlicher Importeur	Japan					
Jahr	2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	100,00	137,00	400,00	548,00	666,00	706,00
Bedarf [Mt]	3,00	4,11	12,00	16,46	20,00	21,20
Importbedarf [TWh]	10,00	95,90	68,00	383,60	333,00	353,00
Importbedarf [Mt]	0,30	2,88	2,04	11,52	10,00	10,60
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	20		60		65	
Differenz aus Bedarf und Importbedarf [TWh]	90,00	41,10	332,00	164,40	333,00	353,00
Differenz aus Bedarf und Importbedarf [Mt]	2,70	1,23	9,96	4,94	10,00	10,60

Tabelle 8 Anwendungsbeispiel: Länderübersicht: Szenario-DEU voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Japan)

Im zweiten Schritt wurde die höchste Differenz eines Jahres als Grundlage der Elektrolysekapazitätsermittlung gewählt. Es wurden folgende Werte verwendet:

- Für 2030 wurde der Wert von 90 TWh abgelesen
- Für 2040 wurde der Wert von 332 TWh abgelesen
- Für 2050 wurde der Wert von 353 TWh abgelesen

Im letzten Schritt wurde mit Hilfe der Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (siehe Anhang) eine Elektrolysekapazität ermittelt, welche in der Lage ist, mit einer Volllaststunden Zahl von 8000 Stunden, die zuvor gewählten Werte zu produzieren. Die ausschlaggebenden Werte sind in Tabelle 8 und 9 gelb hinterlegt.

Produktionspotentiale durch Elektrolyse [TWh]								
Wirkungsgrad	0,7							
Volllaststunden	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
GW	TWh							
20	14	28	42	56	70	84	98	112
60	42	84	126	168	210	252	294	336
65	45,5	91	136,5	182	227,5	273	318,5	364

Tabelle 9 Ausschnitt 1 der Tabelle 92: Produktionspotentiale durch Elektrolyse [TWh]

3.3.3.4 Anwendung des Kapazitätsverfahren

Für die Veranschaulichung des Kapazitätsverfahren wurden die Werte des Vereinigten Königreichs (UK) gewählt.

voraussichtlicher Importeur	UK					
Jahr	2030		2035		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	14,00	186,67	80,00	140,00	250,00	460,00
Bedarf [Mt]	0,42	5,61	2,40	4,20	7,51	13,81
Importbedarf [TWh]	7,00	130,67	40,00	98,00	125,00	230,00
Importbedarf [Mt]	0,21	3,92	1,20	2,94	3,75	6,91
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	10		7	20	77	
Differenz aus Bedarf und Importbedarf [TWh]	7,00	56,00	40,00	42,00	125,00	230,00
Differenz aus Bedarf und Importbedarf [Mt]	0,21	1,69	1,20	1,26	3,76	6,90

Tabelle 10 Anwendungsbeispiel: Länderübersicht: Szenario-DEU voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: UK)

Das Kapazitätsverfahren wird nur dann angewendet, wenn es für ein bestimmtes Jahr Angaben zur voraussichtlichen Elektrolysekapazität gibt, jedoch keine Angaben zu den Kategorien Bedarf und Importbedarf. Es dient dazu, durch die Ermittlung der Produktionspotentiale der angegebenen Elektrolysekapazität einen Ausgangspunkt zur Anwendung der Basisfaktoren zu schaffen.

Im ersten Schritt wird basierend auf dem angegebenen Kapazitätswert, mit Hilfe der Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (Siehe Anhang), die Werte abgelesen, welche mit 1000 bzw. 8000 Volllaststunden produziert werden können. Die ausschlaggebenden Werte sind in Tabelle 11 gelb hinterlegt.

Produktionspotentiale durch Elektrolyse [TWh]								
Wirkungsgrad	0,7							
Volllaststunden	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
GW	TWh							
10	7	14	21	28	35	42	49	56

Tabelle 11 Ausschnitt 2 der Tabelle 92: Produktionspotentiale durch Elektrolyse [TWh]

Im zweiten Schritt werden die abgelesenen Werte als Differenz aus Bedarf und Importbedarf angenommen. Basierend auf diesen Werten, können mit Hilfe des Bedarf-Import-Faktors, der minimale und maximale Bedarfswert des jeweiligen Jahres berechnet werden.

Allgemein:

$$Bedarf = \frac{\text{Differenz aus Bedarf und Importbedarf}}{1 - F} \quad (23)$$

Beispiel:

$$Bedarf_{2030_{max.}} = \frac{\text{Differenz aus Bedarf und Importbedarf}}{1 - F_{2030_{max.}}} \quad (24)$$

$$186,67 TWh = \frac{56 TWh}{1 - 0,7}$$

$$Bedarf_{2030_{min.}} = \frac{\text{Differenz aus Bedarf und Importbedarf}}{1 - F_{2030_{min.}}} \quad (25)$$

$$14 TWh = \frac{7 TWh}{1 - 0,5}$$

Der Importbedarf kann anschließend wie im Beispiel zuvor mittels Bedarf-Import-Faktors [F] errechnet werden.

3.4 Länderübersicht: Szenario-CHL

voraussichtliche Exporteure	Chile					
	2030		2040		2050	
Jahr	min.	max.	min.	max.	min.	max.
min./max.						
Bedarf [TWh]	7,00	56,00	27,30	218,40	35,91	287,28
Bedarf [Mt]	0,21	1,68	0,82	6,56	1,08	8,63
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	25		130		190	
mögliche Exportmengen [TWh]	10,50	84,00	63,70	509,60	97,09	776,72
mögliche Exportmengen [Mt]	0,32	2,52	1,91	15,30	2,92	23,32

Tabelle 12 Länderübersicht: Szenario-CHL voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Chile)

Das Szenario-CHL basiert auf den Angaben Chiles für die Jahre 2030, 2040 und 2050 in den folgenden Kategorien:

- Bedarf
- mögliche Exportmengen
- voraussichtliche Elektrolysekapazitäten

Das Szenario-CHL verfolgt das Ziel mit Hilfe der Basiswerte fehlende Angaben der anderen Länder zu errechnen. Mit Hilfe der errechneten Werte soll eine Abschätzung von Größenordnungen der gewählten Kategorien ermöglicht werden. Ergänzend zu den Angaben Chiles, wurden die Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (Siehe Anhang) verwendet, um weitere Abschätzungen zu treffen.

3.4.1 Basisfaktoren und Ermittlungsverfahren:

Zur Bestimmung fehlender Werte anderer Länder in den Kategorien Bedarf und mögliche Exportmengen, wurden Basisfaktoren ermittelt, welche auf den Angaben Chiles aus Abb.1 basieren. Diese Basisfaktoren bilden die Grundlage weiterer Berechnungen. Die Basisfaktoren in diesem Szenario sind folgende:

Der Bedarfsfaktor [D]

Der Bedarfsfaktor wurde für die Jahre 2030, 2040 und 2050 ermittelt und bildet den Quotienten aus inländischem Marktanteil und der Summe aller Marktanteile. Der Bedarfsfaktor D_{2030} wird hierbei für alle Jahre zwischen 2030 und 2040 genutzt. Der Bedarfsfaktor D_{2040} für den Zeitraum zwischen 2040 und 2050 und der Bedarfsfaktor D_{2050} für das Jahr 2050 und darüber hinaus.

Der Exportfaktor [E]

Der Exportfaktor wurde für die Jahre 2030, 2040 und 2050 ermittelt und bildet den Quotienten aus internationalem Marktanteil und der Summe aller Marktanteile. Der Exportfaktor E_{2030} wird hierbei für alle Jahre zwischen 2030 und 2040 genutzt. Der Exportfaktor E_{2040} für den Zeitraum zwischen 2040 und 2050 und der Exportfaktor E_{2050} für das Jahr 2050 und darüber hinaus.

Ergänzend zu den Basisfaktoren wurden zwei weitere Verfahren verwendet, um bei fehlenden Angaben zur voraussichtlichen Elektrolysekapazität diese zu bestimmen, oder basierend auf der angegebenen Elektrolysekapazität, Gesamtproduktionswerte zu ermitteln. Beide Verfahren basieren auf den Angaben der Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (Siehe Anhang). Die beiden Verfahren in diesem Szenario sind folgende:

Das Gesamtproduktionsverfahren

Das Gesamtproduktionsverfahren dient der Ermittlung der Gesamtproduktion einer angegebenen Kapazität. Hierbei werden aus der Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (Siehe Anhang) die Produktionswerte für 1000 Volllaststunden (min.) und für 8000 Volllaststunden (max.) der jeweiligen Kapazität abgelesen. Die ermittelten Werte bilden anschließend die Grundlage zur Anwendung der Basisfaktoren. Das Verfahren wird nur angewendet, wenn die voraussichtliche Elektrolysekapazität angegeben, und die min. und/oder max. Werte eines Jahres in den Kategorien Bedarf und mögliche Exportmenge nicht angegeben sind.

Das Summenverfahren

Das Summenverfahren dient der Ermittlung der voraussichtlichen Elektrolysekapazität. Zur Anwendung des Verfahrens, werden vorerst jeweils die min. und max. Werte der Kategorien Bedarf und mögliche Exportmengen summiert. Im Anschluss wird der höchste Wert gewählt (Die Summe der min. oder die Summe der max. Werte) und mit Hilfe der Tabelle „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ eine Kapazität gewählt, welche diese Produktionssumme mit einer Volllaststunden Zahl von 8000 Volllaststunden decken kann. Zur Anwendung dieses Verfahrens, müssen vorerst die Werte der Kategorien Bedarf und mögliche Exportmenge bestimmt werden.

Zur Kennzeichnung der jeweils verwendeten Basisfaktoren und Verfahren, wurde eine Farbskala eingeführt.

Farbskala des Szenario-CHL	
Literatur Wert	
Bedarfsfaktor [D]	
Exportfaktor [E]	
Gesamtproduktionsverfahren/ Wert aus der Tabelle XXX	
Summenverfahren	

Tabelle 13 Farbskala des Szenarios-CHL

3.4.2 Ermittlung der Bedarfs- und möglichen Exportmengen Chiles:

Chile wurde trotz fehlender Quellenbelege für die Kategorien Bedarf und mögliche Exportmengen als Basis für das Szenario-CHL ausgewählt. Grund hierfür ist der in Abb.1 dargestellte Quellenbeleg bezüglich der Verteilung des Eigenbedarfs und der für den Export produzierten Wasserstoffmenge. Diese Verteilung wurde genutzt, um Basisfaktoren für die jeweiligen Jahre zu errechnen, welche im Zuge des Szenarios auf die anderen Länder angewandt wurden.

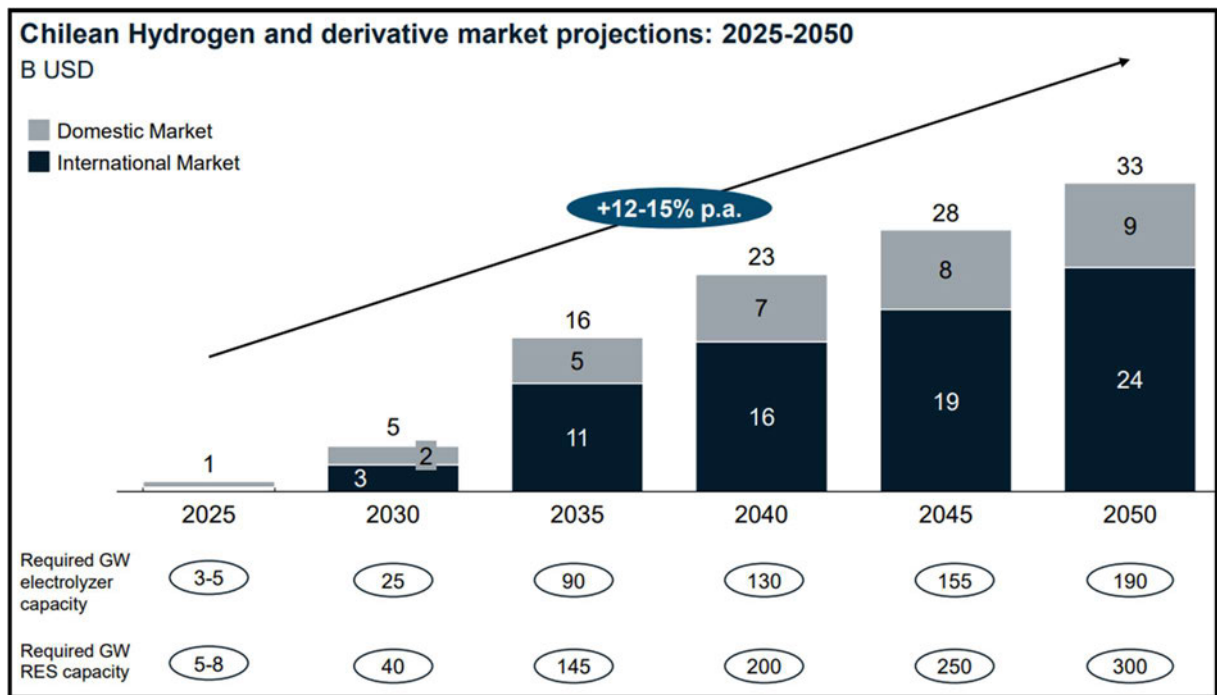


Abbildung 1 Chilean Hxdrogen and derivative market projections: 2025-2050; [63]

In Abb.1 ist die Verteilung der Marktanteile der in Chile produzierten Wasserstoff- und Derivatenmengen über einen Zeitraum von 2025 bis 2050 abgebildet. Es wird zwischen den Anteilen des chilenischen Marktes und den Anteilen des Internationalen Marktes unterschieden. Diese Aufteilung dient als Grundlage für die Ermittlung des Eigenbedarfs und der möglichen Exportmenge.

Die für den weiteren Verlauf relevanten Werte sind in Tabelle 14 dargestellt.

Marktanteile der Produktion von Wasserstoff und seinen Derivaten in Chile [B USD]			
Jahr	2030	2040	2050
Inländischer Marktanteil	2,00	7,00	9,00
Internationaler Marktanteil	3,00	16,00	24,00
Summe der Marktanteile	5,00	23,00	33,00

Tabelle 14 Marktanteile der Produktion von Wasserstoff und seinen Derivaten in Chile [B USD]

3.4.2.1 Berechnung der Basisfaktoren:

Ausgangspunkt zur Ermittlung der Basisfaktoren ist die in Abb.1 angegebene Verteilung der Marktanteile. Anhand dieser wurden die Basisfaktoren für die Jahre 2030, 2040 und 2050 errechnet.

Der Bedarfsfaktor [D]

Der Bedarfsfaktor [D] gibt an wie groß der Eigenbedarfsanteil bezogen auf die Gesamtproduktion ist.

Allgemein:

$$\text{Bedarfsfaktor} = \frac{\text{Inländischer Marktanteil}}{\text{Summe der Marktanteile}} \quad (26)$$

Beispiel:

$$\text{Bedarfsfaktor}_{2030} = \frac{\text{Inländischer Marktanteil}_{2030}}{\text{Summe der Marktanteile}_{2030}} \quad (27)$$

$$D_{2030} = \frac{2 \text{ BUSD}}{5 \text{ BUSD}} = 0,4$$

$$\text{Bedarfsfaktor}_{2040} = \frac{\text{Inländischer Marktanteil}_{2040}}{\text{Summe der Marktanteile}_{2040}} \quad (28)$$

$$D_{2040} = \frac{7 \text{ BUSD}}{23 \text{ BUSD}} = 0,3$$

$$\text{Bedarfsfaktor}_{2050} = \frac{\text{Inländischer Marktanteil}_{2050}}{\text{Summe der Marktanteile}_{2050}} \quad (29)$$

$$D_{2050} = \frac{9 \text{ BUSD}}{33 \text{ BUSD}} = 0,27$$

Der Exportfaktor [E]

Der Exportfaktor [E] zeigt wie groß der Exportanteil bezogen auf die Gesamtproduktion ist.

Allgemein:

$$\text{Exportfaktor} = \frac{\text{Internationaler Marktanteil}}{\text{Summe der Marktanteile}} \quad (30)$$

Beispiel:

$$\text{Exportfaktor}_{2030} = \frac{\text{Inländischer Marktanteil}_{2030}}{\text{Summe der Marktanteile}_{2030}} \quad (31)$$

$$E_{2030} = \frac{3 \text{ BUSD}}{5 \text{ BUSD}} = 0,6$$

$$\text{Exportfaktor}_{2040} = \frac{\text{Inländischer Marktanteil}_{2040}}{\text{Summe der Marktanteile}_{2040}} \quad (32)$$

$$E_{2040} = \frac{16 \text{ BUSD}}{23 \text{ BUSD}} = 0,7$$

$$\text{Exportfaktor}_{2050} = \frac{\text{Inländischer Marktanteil}_{2050}}{\text{Summe der Marktanteile}_{2050}} \quad (33)$$

$$E_{2050} = \frac{24 \text{ BUSD}}{33 \text{ BUSD}} = 0,73$$

Die Werte der Faktoren sind in Tabelle 15 dargestellt.

Basisfaktoren des Szenarios-CHL			
Jahr	2030	2040	2050
Bedarfsfaktor [D]	0,40	0,30	0,27
Exportfaktor [E]	0,60	0,70	0,73

Tabelle 15 Basisfaktoren des Szenarios-CHL

3.4.2.2 Anwendung des Gesamtproduktionsverfahrens:

Vor Anwendung der Basisfaktoren, wurde das Gesamtproduktionsverfahren angewandt. Basierend auf den gegebenen Kapazitätswerten Chiles, wurden Gesamtproduktionsmengen der jeweiligen Kapazitäten ermittelt. Hierfür wurde die Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (Siehe Anhang) genutzt. Die Minimalwerte der Gesamtproduktion entsprechen hierbei den Produktionsmengen der jeweiligen Kapazität bei 1000 Volllaststunden. Die Maximalwerte der Gesamtproduktion entsprechen den Produktionsmengen der jeweiligen Kapazität bei 8000 Volllaststunden.

voraussichtliche Exporteure	Chile					
	2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	25		130		190	
Volllaststunden	1000	8000	1000	8000	1000	8000
Gesamtproduktion [TWh]	17,50	140,00	91,00	728,00	133,00	1064,00

Tabelle 16 Anwendungsbeispiel1: Länderübersicht: Szenario-CHL voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Chile)

Die in Tabelle 16 gelb hinterlegten Werte wurden aus der Tabelle „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ abgelesen und bilden die Grundlage zur Anwendung der Basisfaktoren.

3.4.2.3 Anwendung der Basisfaktoren:

Mit Hilfe der ermittelten minimalen und maximalen Gesamtproduktionsmengen und den errechneten Basisfaktoren, können nun die jeweiligen Bedarfs- und Exportmengen bestimmt werden. Die nachfolgenden Berechnungen der Bedarfs- und Exportmengen werden exemplarisch für die Werte für 2030 durchgeführt. Die Berechnung der Werte für 2040 und 2050 wurden analog mit den jeweiligen Basisfaktoren und Gesamtproduktionsmengen durchgeführt.

Allgemein:

$$Bedarf = Gesamtproduktion * D \quad (34)$$

$$mögliche Exportmenge = Gesamtproduktion * E \quad (35)$$

Beispiel:

$$Bedarf_{2030_{min.}} = Gesamtproduktion_{2030_{min.}} * D_{2030} \quad (36)$$

$$Bedarf_{2030_{min.}} = 17,5 \text{ TWh} * 0,4 = 7 \text{ TWh}$$

$$Bedarf_{2030_{max.}} = Gesamtproduktion_{2030_{max.}} * D_{2030} \quad (37)$$

$$Bedarf_{2030_{max.}} = 140 \text{ TWh} * 0,4 = 56 \text{ TWh}$$

$$mögliche Exportmenge_{2030_{min.}} = Gesamtproduktion_{2030_{min.}} * E_{2030} \quad (38)$$

$$mögliche Exportmenge_{2030_{min.}} = 17,5 \text{ TWh} * 0,6 = 10,5 \text{ TWh}$$

$$mögliche Exportmenge_{2030_{max.}} = Gesamtproduktion_{2030_{max.}} * E_{2030} \quad (39)$$

$$mögliche Exportmenge_{2030_{max.}} = 140 \text{ TWh} * 0,6 = 84 \text{ TWh}$$

Alle ermittelten Werte, sowie die bereits gegebenen Elektrolysekapazitäten sind in der Tabelle 17 dargestellt.

voraussichtliche Exporteure	Chile					
Jahr	2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	7,00	56,00	27,30	218,40	35,91	287,28
Bedarf [Mt]	0,21	1,68	0,82	6,56	1,08	8,63
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	25		130		190	
mögliche Exportmengen [TWh]	10,50	84,00	63,70	509,60	97,09	776,72
mögliche Exportmengen [Mt]	0,32	2,52	1,91	15,30	2,92	23,32
Volllaststunden [h]	1000	8000	1000	8000	1000	8000
Gesamtproduktion [TWh]	17,50	140,00	91,00	728,00	133,00	1064,00

Tabelle 17 Anwendungsbeispiel2: Länderübersicht: Szenario-CHL voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Chile)

3.4.3 Anwendung des Szenarios-CHL

Wie anfangs erwähnt, basiert das Szenario-CHL auf den Angaben Chiles, welche in den vorherigen Abschnitten ermittelt wurden. Bei der Anwendung des Szenarios auf andere Länder spielen die ebenfalls zuvor ermittelten Basisfaktoren eine zentrale Rolle. Mit ihnen lassen sich aus verschiedenen Konstellationen aus gegeben und nicht gegebenen Werten, Bedarfs- sowie mögliche Exportmengen errechnen.

3.4.3.1 Beispielanwendung der Basisfaktoren und des Gesamtproduktionsverfahrens

voraussichtliche Exporteure	Norwegen			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	0,56	4,48	99,86	133,15
Bedarf [Mt]	0,02	0,13	3,00	4,00
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	2		70	
mögliche Exportmengen [TWh]	0,84	6,72	270,00	360,00
mögliche Exportmengen [Mt]	0,03	0,2	8,11	10,81

Tabelle 18 Länderübersicht: Szenario-CHL voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Norwegen)

Für dieses Beispiel wurden die Werte Norwegens gewählt, da hier beide Basisfaktoren zur Ermittlung der fehlenden Werte verwendet wurden. Hierbei wurden folgende Rechnungen durchgeführt:

3.4.3.1.1 Bedarfs- und mögliche Exportmengen für 2030

Die Ermittlung der Bedarfs- und möglichen Exportmengen für das Jahr 2030 geschahen analog zu der Ermittlung der Werte Chiles, mit Hilfe der Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (Siehe Anhang).

Mittels Gesamtproduktionsverfahren wurden für die angegebenen Elektrolysekapazitäten folgende Werte aus der Tabelle abgelesen:

voraussichtliche Exporteure	Norwegen			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	2		70	
Volllaststunden [h]	1000	8000	1000	8000
Gesamtproduktion [TWh]	1,40	11,20	49,00	392,00

Tabelle 19 Anwendungsbeispiel: Länderübersicht: Szenario-CHL voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Norwegen)

Die ausschlaggebenden Werte sind in Tabelle 19 gelb hinterlegt.

Mit Hilfe der ermittelten Gesamtproduktion und den Basisfaktoren konnten die Bedarfswerte, sowie die möglichen Exportmengen bestimmt werden.

Allgemein:

$$Bedarf = Gesamtproduktion * D \quad (40)$$

$$mögliche Exportmenge = Gesamtproduktion * E \quad (41)$$

Beispiel:

$$Bedarf_{2030_{min.}} = Gesamtproduktion_{2030_{min.}} * D_{2030} \quad (42)$$

$$Bedarf_{2030_{min.}} = 1,4 \text{ TWh} * 0,4 = 0,56 \text{ TWh}$$

$$Bedarf_{2030_{max.}} = Gesamtproduktion_{2030_{max.}} * D_{2030} \quad (43)$$

$$Bedarf_{2030_{max.}} = 11,2 \text{ TWh} * 0,4 = 4,48 \text{ TWh}$$

$$mögliche Exportmenge_{2030_{min.}} = Gesamtproduktion_{2030_{min.}} * E_{2030} \quad (44)$$

$$mögliche Exportmenge_{2030_{min.}} = 1,4 \text{ TWh} * 0,6 = 0,84 \text{ TWh}$$

$$mögliche Exportmenge_{2030_{max.}} = Gesamtproduktion_{2030_{max.}} * E_{2030} \quad (45)$$

$$mögliche Exportmenge_{2030_{max.}} = 11,2 \text{ TWh} * 0,6 = 6,72 \text{ TWh}$$

3.4.3.1.2 Bedarfsmengen für 2050

Die Bedarfswerte für das Jahr 2050 wurden ebenfalls mit Hilfe der Bedarfsfaktoren ermittelt. Jedoch besteht im Jahr 2050 der Unterschied, dass die möglichen Exportmengen bereits bekannt sind und somit die Verwendung des Gesamtproduktionsverfahrens entfällt.

Mit Hilfe der Exportfaktoren und den gegebenen Exportmengen, konnte die Gesamtproduktion bestimmt werden. Durch Anwendung der Bedarfsfaktoren auf die Gesamtproduktion konnten so die Bedarfsmengen des Jahres 2050 errechnet werden. In den folgenden Rechnungen wurden beide Schritte in einer Rechnung durchgeführt.

Allgemein:

$$Bedarf = \frac{\text{mögliche Exportmengen}}{E} * D \quad (46)$$

Bzw.:

$$\text{mögliche Exportmengen} = \frac{Bedarf}{D} * E \quad (47)$$

Beispiel:

$$Bedarf_{2050_{min.}} = \frac{\text{mögliche Exportmenge}_{2050_{min.}}}{E_{2050}} * D_{2050} \quad (48)$$

$$Bedarf_{2050_{min.}} = \frac{270 \text{ TWh}}{0,73} * 0,27 = 99,86 \text{ TWh}$$

$$Bedarf_{2050_{max.}} = \frac{\text{mögliche Exportmenge}_{2050_{max.}}}{E_{2050}} * D_{2050} \quad (49)$$

$$Bedarf_{2050_{max.}} = \frac{360 \text{ TWh}}{0,73} * 0,27 = 133,15 \text{ TWh}$$

3.4.3.2 Beispielanwendung des Summenverfahrens

voraussichtliche Exporteure	Kanada			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	22,20	55,50	30,79	682,65
Bedarf [Mt]	0,67	1,67	0,92	20,50
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	25		335	
mögliche Exportmengen [TWh]	33,30	83,25	83,25	1165,50
mögliche Exportmengen [Mt]	1,00	2,50	2,50	35,00
Gesamtproduktion [TWh]	55,50	138,75	114,04	1848,15
Gesamtproduktion [Mt]	1,67	4,17	3,42	55,50
Volllaststunden [h]	1000	8000	1000	8000
Gesamtproduktion [TWh]	17,50	140,00	234,50	1876,00

Tabelle 20 Anwendungsbeispiel1: Länderübersicht: Szenario-CHL voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Kanada)

Zur Veranschaulichung des Summenverfahrens wurden die Werte Kanadas gewählt, da die Elektrolysekapazitäten der Jahre 2030 und 2050 nicht gegeben sind.

3.4.3.2.1 Anwendung der Basisfaktoren

Bevor das Summenverfahren eingesetzt werden kann, müssen die fehlenden Bedarfswerte ermittelt werden. Diese werden analog zu der Ermittlung der Bedarfswerte Norwegens für das Jahr 2050 durchgeführt (Siehe Abschnitt: Bedarfs- und mögliche Exportmengen für 2030).

3.4.3.2.2 Ermittlung der Gesamtproduktion

Nach Ermittlung der fehlenden Bedarfswerte können nun die Summen der jeweiligen min. und max. Werte der Kategorien Bedarf und mögliche Exportmengen der Jahre 2030 und 2050 bestimmt werden.

Allgemein:

$$\text{Gesamtproduktion} = \text{Bedarf} + \text{mögliche Exportmenge} \quad (50)$$

Beispiel:

$$\text{Gesamtproduktion}_{2030_{\min.}} = \text{Bedarf}_{2030_{\min.}} + \text{mögliche Exportmenge}_{2030_{\min.}} \quad (51)$$

$$\text{Gesamtproduktion}_{2030_{\min.}} = 22,2 \text{ TWh} + 33,3 \text{ TWh} = 55,5 \text{ TWh}$$

$$\text{Gesamtproduktion}_{2030_{\max.}} = \text{Bedarf}_{2030_{\max.}} + \text{mögliche Exportmenge}_{2030_{\max.}} \quad (52)$$

$$\text{Gesamtproduktion}_{2030_{\max.}} = 55,5 \text{ TWh} + 83,25 \text{ TWh} = 138,75 \text{ TWh}$$

$$\text{Gesamtproduktion}_{2050_{\min.}} = \text{Bedarf}_{2050_{\min.}} + \text{mögliche Exportmenge}_{2050_{\min.}} \quad (53)$$

$$\text{Gesamtproduktion}_{2050_{\min.}} = 30,79 \text{ TWh} + 83,25 \text{ TWh} = 114,04 \text{ TWh}$$

$$\text{Gesamtproduktion}_{2050_{\max.}} = \text{Bedarf}_{2050_{\max.}} + \text{mögliche Exportmenge}_{2050_{\max.}} \quad (54)$$

$$\text{Gesamtproduktion}_{2050_{\max.}} = 682,65 \text{ TWh} + 1165,5 \text{ TWh} = 1848,15 \text{ TWh}$$

voraussichtliche Exporteure	Kanada			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Gesamtproduktion [TWh]	55,50	138,75	114,04	1848,15
Gesamtproduktion [Mt]	1,67	4,17	3,42	55,50

Tabelle 21 Anwendungsbeispiel2: Länderübersicht: Szenario-CHL voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Kanada)

Nach Berechnung der Summen, werden anschließend die größten Gesamtproduktionswerte eines Jahres bestimmt. Diese sind in Tabelle 21 gelb hinterlegt.

3.4.3.2.3 Bestimmung der voraussichtlichen Elektrolysekapazitäten

Mit Hilfe der ermittelten Gesamtproduktion und der Tabelle 92 „Produktionspotentiale durch Elektrolyse“ (Siehe Anhang), können nun die voraussichtlichen Elektrolysekapazitäten bestimmt werden. Diese werden aus der genannten Tabelle abgelesen, in dem erfasst wird, welche Kapazitäten die ermittelten Gesamtproduktionsmengen mit einer Volllaststundenzahl von 8000 erreichen können.

Produktionspotentiale durch Elektrolyse [TWh]								
Wirkungsgrad	0,7							
Volllaststunden	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
GW	TWh							
25	17,5	35	52,5	70	87,5	105	122,5	140
335	234,5	469	703,5	938	1172,5	1407	1641,5	1876

Tabelle 22 Ausschnitt 3 der Tabelle 92: Produktionspotentiale durch Elektrolyse [TWh]

Die relevanten Werte sind in Tabelle 22 gelb hinterlegt.

3.5 Korrektur der Szenarien

Betrachtet man die durch die Szenarien ermittelten Werte (Siehe Abschnitt 4.4 Szenarien der Länderübersicht), so fällt auf, dass einige dieser Werte deutliche Abweichungen zu gegebenen Quellenwerten aufweisen. Teilweise kommt es sogar zu logisch nicht nachvollziehbaren Angaben, in denen der Maximalwert geringer ausfällt als der Minimalwert eines bestimmten Jahres. Um diese Unstimmigkeiten zu beheben, wurden Korrekturen an den Szenarien vorgenommen, welche im weiteren Verlauf genauer erläutert werden.

3.5.1 Korrektur des Szenarios-DEU

Im Szenario-DEU ist auffällig, dass der Bedarfsquotient für 2050 mit 7,27 zu einer großen Spanne der min. und max. Werte des Jahres 2050 führt. Ein Vergleich mit den anderen Bedarfsquotienten zeigt ebenfalls, dass der Wert 7,27 mehr als doppelt so groß ist wie der nächsthöchste Wert von 3,33 (Vgl. Tabelle 23). Um den Bedarfsquotienten für das Jahr 2050 anzupassen, wurden weitere Bedarfsquotienten anderer Länder ermittelt und der Mittelwert aller bestimmt. Voraussetzung zur Ermittlung weiterer Bedarfsquotienten waren Literaturwerte für den min. und max. Bedarf eines Landes für das Jahr 2050. Die Berechnung der Bedarfsquotienten wurde, wie im Abschnitt: „3.3.2 Berechnung der Basisfaktoren“ beschrieben, mittels Gleichung 7 durchgeführt. Der so bestimmte Mittelwert wurde anschließend als Korrekturwert verwendet.

Land	Bedarfsquotient 2050 [B_2050]:
Deutschland	7,27
Japan	1,06
Frankreich	2,83
UK	1,84
USA	1,48
China	3,33
Mittelwert/ Korrekturfaktor [K]:	2,97

Tabelle 23 Korrektur des Szenarios-DEU: Übersicht der Bedarfsquotienten

Die neuen Basisfaktoren des Szenarios-DEU, sind in Tabelle 24 dargestellt.

Korrektur: Basisfaktoren des Szenarios-DEU				
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarfsquotient [B]/ Korrekturfaktor [K]:	1,37		2,97	
Bedarf-Import-Faktor [F]:	0,50	0,70	0,50	0,50

Tabelle 24 Korrektur des Szenarios-DEU: Basisfaktoren des Szenarios-DEU

Die Farbskala wurde um den Korrekturfaktor [K] erweitert.

Korrektur: Farbskala des Szenario-DEU	
Literatur Wert	
Differenzverfahren	
Kapazitätsverfahren	
Bedarfsquotient [B]	
Bedarf-Import-Faktor [F]	
Korrekturfaktor [K]:	

Tabelle 25 Korrektur des Szenarios-DEU: Farbskala des Szenario-DEU

Die Ergebnisse der Szenario Korrektur sind in Tabelle 65 dargestellt. Die Berechnung der korrigierten Bedarfswerte geschah analog zu der im Abschnitt: „3.3.3.1 Anwendung des Bedarfsquotienten [B]“ beschriebenen Berechnung. Durch die Berechnung neuer Bedarfswerte, kam es im Fall Süd-Korea zu einer Anpassung der Elektrolysekapazität, durch Verwendung des Differenzverfahrens (siehe Tabelle 65).

3.5.2 Korrektur des Szenarios-CHL

voraussichtliche Exporteure	UAE					
	2031		2040		2050	
Jahr	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	69,93	39,96	166,50	78,49	336,33	118,24
Bedarf [Mt]	2,10	1,20	5,00	2,36	10,10	3,55
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	20		50		145	
mögliche Exportmengen [TWh]	19,98	59,94	83,25	183,15	159,84	319,68
mögliche Exportmengen [Mt]	0,60	1,80	2,50	5,50	4,80	9,60

Tabelle 26 Länderübersicht: Szenario-CHL: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: UAE)

Das Szenario-CHL weist einige Unstimmigkeiten in den ermittelten Angaben auf. So kommt es an mehreren Stellen dazu, dass der Minimalwert den Maximalwert eines Jahres übersteigt. Diese Unstimmigkeiten traten ausschließlich bei Ländern auf, in denen entweder der min. oder der max. Wert mit einem Literaturwert angegeben werden konnte. Die jeweils andere Spalte wurde teilweise oder ganz mittels Szenario errechnet und widersprach anschließend den Literaturwerten. Um diese Werte zu korrigieren, wurden für die betroffenen Länder individuelle Korrekturfaktoren ermittelt. Diese sind in Tabelle 27 dargestellt. Ein Beispiel für einen Fall, in dem die min. Werte die max. Werte überstiegen, ist in Tabelle 26 dargestellt.

Korrektur: Basisfaktoren des Szenarios-CHL						
voraussichtliche Exporteure	Niederlande	Argentinien		UAE		
Jahr	2050	2030	2050	2031	2040	2050
Korrekturbedarfsfaktor [B_K]	0,96	0,07	0,20	0,78	0,67	0,68
Korrekturexportfaktor [E_K]	0,04	0,93	0,80	0,22	0,33	0,32

Tabelle 27 Korrektur des Szenarios-CHL: Basisfaktoren des Szenarios-CHL

Die Farbskala wurde um die Korrekturfaktoren erweitert.

Korrektur: Farbskala des Szenario-CHL	
Literatur Wert	
Bedarfsfaktor [D]	
Exportfaktor [E]	
Gesamtproduktionsverfahren/ Wert aus der Tabelle XXX	
Summenverfahren	
Korrekturbedarfsfaktor [B_K]	
Korrekturexportfaktor [E_K]	

Tabelle 28 Korrektur des Szenarios-CHL: Farbskala des Szenario-CHL

Die Ermittlung der Korrekturwerte geschah auf Basis der jeweils gegebenen Werte eines Jahres in den Kategorien Bedarf und mögliche Exportmenge. Im Folgenden wird am Beispiel Argentiniens die Berechnung der Korrekturwerte dargestellt. Die Kategorien und die entsprechenden Werte Argentiniens sind in Tabelle 29 dargestellt.

voraussichtliche Exporteure	Argentinien			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	0,67	0,78	33,30	33,60
Bedarf [Mt]	0,02	0,02	1,00	1,01
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	2		30	
mögliche Exportmengen [TWh]	9,32	10,42	133,20	134,40
mögliche Exportmengen [Mt]	0,28	0,3	4,00	4,04

Tabelle 29 Korrektur des Szenarios-CHL: Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Argentinien)

3.5.2.1 Berechnung der Korrekturwerte

Der Korrekturbedarfsfaktor $[B_K]$ bildet den Quotienten aus dem Bedarfswert und der Summe aus Bedarf und möglicher Exportmenge.

Der Korrektorexportfaktor $[E_K]$ bildet den Quotienten aus der möglichen Exportmenge und der Summe aus Bedarf und möglicher Exportmenge.

Die Korrekturwerte werden exemplarisch am Beispiel Argentinien für das Jahr 2050 berechnet.

Allgemein:

$$\text{Korrekturbedarfsfaktor} = \frac{\text{Bedarf}}{\text{Bedarf} + \text{mögliche Exportmenge}} \quad (55)$$

$$\text{Korrektorexportfaktor} = \frac{\text{Bedarf} \cdot \text{mögliche Exportmenge}}{\text{Bedarf} + \text{mögliche Exportmenge}} \quad (56)$$

Beispiel:

$$\text{Korrekturbedarfsfaktor}_{2050} = \frac{\text{Bedarf}_{2050 \min.}}{\text{Bedarf}_{2050 \min.} + \text{mögliche Exportmenge}_{2050 \min.}} \quad (57)$$

$$\text{Korrekturbedarfsfaktor}_{2050} = \frac{33,3 \text{ TWh}}{33,3 \text{ TWh} + 133,2 \text{ TWh}} = 0,2$$

$$\text{Korrektorexportfaktor}_{2050} = \frac{\text{mögliche Exportmenge}_{2050 \min.}}{\text{Bedarf}_{2050 \min.} + \text{mögliche Exportmenge}_{2050 \min.}} \quad (58)$$

$$\text{Korrektorexportfaktor}_{2050} = \frac{133,2 \text{ TWh}}{33,3 \text{ TWh} + 133,2 \text{ TWh}} = 0,8$$

Alle ermittelten Korrekturwerte sind in Tabelle 27 dargestellt.

3.5.2.2 Berechnung der korrigierten Bedarfs- und möglichen Exportmengen

Zur Berechnung der korrigierten Bedarfswerte im Fallbeispiel Argentinien, musste vor der Verwendung der Korrekturwerte, das Gesamtproduktionsverfahren angewandt werden. Nach Ermittlung der maximalen Gesamtproduktion für die angegebenen Kapazitäten, konnten die Korrekturwerte analog zu den im Szenario-CHL verwendeten Basisfaktoren genutzt werden (siehe Abschnitt: „Beispielanwendung der Basisfaktoren und des Gesamtproduktionsverfahrens“).

voraussichtliche Exporteure	Argentinien			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	2		30	
Volllaststunden [h]	1000	8000	1000	8000
Gesamtproduktion [TWh]	1,40	11,20	21,00	168,00

Tabelle 30 Anwendungsbeispiel: Korrektur des Szenarios-CHL: Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Argentinien)

In Tabelle 30 sind die mittels Gesamtproduktionsverfahren ermittelten Gesamtproduktionswerte dargestellt. Die für dieses Beispiel relevanten Werten sind gelb hinterlegt. Die korrigierten Bedarfs- und möglichen Exportmengen sind in Tabelle 29 dargestellt.

Die Berechnung der maximalen Bedarfswerte der Jahre 2031, 2040 und 2050 in den Vereinigte Arabische Emiraten (UAE) und die minimal mögliche Exportmenge der Niederlande im Jahr 2050 konnten aufgrund gegebener Daten ohne Gesamtproduktionsverfahren ermittelt werden. Für die Berechnung dieser Werte wurden folgende Formeln verwendet. Die Beispielberechnung wird exemplarisch für die Werte aus 2050 der Niederlande und die Werte aus 2031 der Vereinigten Arabischen Emiraten (UAE) dargestellt.

Allgemein:

$$Bedarf_{Korrektur} = \frac{\text{mögliche Exportmengen}}{K_E} * K_D \quad (59)$$

Bzw.:

$$\text{mögliche Exportmengen}_{Korrektur} = \frac{Bedarf}{K_D} * K_E \quad (60)$$

Beispiel (UAE):

$$Bedarf_{Korrektur2031_{max.}} = \frac{mögliche\ Exportmenge_{2031_{max.}}}{K_{E_{2031}}} * K_{D_{2031}} \quad (61)$$

$$Bedarf_{Korrektur2031_{max.}} = \frac{59,94\ TWh}{0,22} * 0,78 = 212,51\ TWh$$

Beispiel (Niederlande):

$$mögliche\ Exportmenge_{Korrektur2050_{max.}} = \frac{Bedarf_{2050_{min.}}}{K_{D_{2050}}} * K_{E_{2050}} \quad (62)$$

$$mögliche\ Exportmenge_{Korrektur2050_{max.}} = \frac{64,72\ TWh}{0,96} * 0,04 = 2,70\ TWh$$

3.5.2.3 Korrektur der voraussichtlichen Elektrolysekapazitäten

Aufgrund der geänderten Bedarfsmengen kam es im Fall der UAE für das Jahr 2031 dazu, dass die voraussichtliche Elektrolysekapazität neu bestimmt werden musste. Diese wurde nach dem bereits beschriebenen Summenverfahren ermittelt (siehe Abschnitt: „Beispielanwendung des Summenverfahrens“). Die korrigierten Werte der Länder Niederlande und UAE sind in Tabelle 31 und 32 dargestellt.

voraussichtliche Exporteure	Niederlande			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	42,00	70,00	64,72	128,61
Bedarf [Mt]	1,26	2,10	1,94	3,86
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	4		25	
mögliche Exportmengen [TWh]	63,00	105,00	2,70	5,55
mögliche Exportmengen [Mt]	1,89	3,15	0,08	0,17

Tabelle 31 Korrektur des Szenarios-CHL: Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Niederlande)

voraussichtliche Exporteure	UAE					
Jahr	2031		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	69,93	212,51	166,50	371,85	336,33	679,32
Bedarf [Mt]	2,10	6,38	5,00	11,17	10,10	20,40
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	50		50		145	
mögliche Exportmengen [TWh]	19,98	59,94	83,25	183,15	159,84	319,68
mögliche Exportmengen [Mt]	0,60	1,80	2,50	5,50	4,80	9,60

Tabelle 32 Korrektur des Szenarios-CHL: Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: UAE)

3.6 Bestimmung des Einflusses auf Wasserhaushalte:

voraussichtlicher Importeur	Deutschland			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Importbedarf [TWh]	47,50	91,00	55,00	400,00
Importbedarf [Mt]	1,43	2,73	1,65	12,01

Tabelle 33 Importbedarf nach Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Deutschland)

Die Bestimmung des Einflusses vom Wasserstoffhandel auf regionale Wasserhaushalte wurde am Fallbeispiel Chile – Deutschland genauer untersucht. Basierend auf den zuvor ermittelten Wasserverbräuchen nach eingesetzter Technologie wurde für die Ermittlung der nachfolgenden Wasserbedarfsmengen folgende Berechnungen durchgeführt:

Formelzeichen	Ermittlung der Wasserbedarfsmenge			Einheit
X_T	Theoretischer Wasserbedarf	8,94		[L/Kg _{H2}]
X_R	Realer Wasserbedarf (min./max.)	min.	max.	
	PEM + 20 %	14,28	18,6	[L/Kg _{H2}]
	AEL + 20 %	12,12	14,28	[L/Kg _{H2}]
	HTEL + 20 %	19,20	k.A.	[L/Kg _{H2}]
X_{H2}	Wasserstoffmengen	-		[Mt]
W_T	Theoretische Wasserbedarfsmenge	-		[L]
W_R	Reale Wasserbedarfsmenge	-		[L]

Tabelle 34 Übersicht der Ermittlung der Wasserbedarfsmenge

Wasserbedarfswerte nach Technologie [L/Kg _{H2}]		
$X_{Rmin.}$	$X_{Rmax.}$	X_T
12,14	19,53	8,94

Tabelle 35 Übersicht der Wasserbedarfswerte nach Technologie

Für die Berechnung der realen Wassermengen wurden die minimal und maximal nötigen Wassermengen nach eingesetzter Technologie verwendet (siehe Tabelle 35). Die Berechnung wird im Folgenden exemplarisch für das Jahr 2030 durchgeführt:

Allgemein:

$$\begin{aligned} & \text{Theoretische Wasserbedarfsmenge} \\ & = \text{Theoretischer Wasserbedarf} * \text{Wasserstoffmenge} \end{aligned} \quad (63)$$

$$\text{Reale Wasserbedarfsmenge} = \text{Realer Wasserbedarf} * \text{Wasserstoffmenge} \quad (64)$$

Beispiel:

$$W_{T_{2030min.}} = X_T * X_{H2_{2030min.}} \quad (65)$$

$$W_{T_{2030min.}} = 8,94 \frac{L}{Kg_{H2}} * 1,43 Mt * 10^9 = 1,28 * 10^{10} L$$

$$W_{T_{2030max.}} = X_T * X_{H2_{2030max.}} \quad (66)$$

$$W_{T_{2030max.}} = 8,94 \frac{L}{Kg_{H2}} * 2,73 Mt * 10^9 = 2,44 * 10^{10} L$$

$$W_{R_{2030min.}} = X_{Rmin.} * X_{H2_{2030min.}} \quad (67)$$

$$1,74 * 10^{10} L = 12,4 \frac{L}{Kg_{H2}} * 1,43 Mt * 10^9$$

$$W_{T_{2030max.}} = X_{Rmax.} * X_{H2_{2030max.}} \quad (68)$$

$$W_{T_{2030max.}} = 19,53 \frac{L}{Kg_{H2}} * 2,73 Mt * 10^9 = 5,33 * 10^{10} L$$

Für dieses Fallbeispiel wird angenommen, dass Chile den gesamten Wasserstoffbedarf Deutschlands deckt. Basierend auf dieser Annahme wurden die Wassermengen bestimmt, die für dieses Vorhaben benötigt werden. Ebenfalls wurden die Wassermengen eruiert, welche Deutschland durch den Import von Wasserstoff importiert.

Ermittelte Wassermengen [L]				
Jahr	$W_{Tmin.}$	$W_{Tmax.}$	$W_{Rmin.}$	$W_{Rmax.}$
2030	1,28E+10	2,44E+10	1,73E+10	5,34E+10
2050	1,48E+10	1,07E+11	2,01E+10	2,35E+11

Tabelle 36 Übersicht der ermittelten Wassermengen

Die zu betrachtenden Wassermengen für die Produktion sind die realen Wasserbedarfsmengen (W_R). Die Wassermengen, die importiert werden, sind die theoretischen Wasserbedarfsmengen (W_T) (siehe Tabelle 36).

Um die Auswirkungen auf die jeweiligen Wasserhaushalte einordnen zu können, wurden die Wassermengen in relevante Verhältnisse gesetzt. Für eine tiefgehende Beurteilung der Auswirkungen auf regionale Wasserhaushalte, müsste eine Standortanalyse der lokalen Nutzungs- und Produktionsstandorte durchgeführt werden und das jeweilige Dargebot mit der lokal importierten oder aufgewendeten Menge an Wasser verglichen werden.

Da dies jedoch den Umfang dieser Arbeit übersteigt, wurde im Folgenden eine grobe Abschätzung möglicher Auswirkungen durchgeführt. Diese basiert größtenteils auf der Betrachtung ganzer Länder als ein Wasserhaushalt.

Im ersten Schritt wurden die Mengen des Wasserdargebots der jeweiligen Länder bestimmt und mit den realen bzw. theoretischen Wassermengen verglichen. Im zweiten Schritt wurden Wasserverbraucher der jeweiligen Länder identifiziert und deren Wasserverbräuche mit den jeweils relevanten Produktions- oder Importwassermengen verglichen. Diese beiden Gegenüberstellungen dienen der ersten Einordnung der Mengenverhältnisse und sollen erste Vermutungen über den Einfluss der jeweiligen Wasserhaushalte ermöglichen.

Die Ergebnisse der Gegenüberstellung der Wassermengen sind im Abschnitt: „4.5 Bestimmung der Beeinflussung des Wasserhaushaltes u.a. auch durch die örtliche Verschiebung“ zu finden.

3.6.1 Einfluss auf den Wasserhaushalt in Deutschland

Um genauere Aussagen über den Einfluss des importierten Wassers auf den deutschen Wasserhaushalt treffen zu können, wurde der voraussichtliche Wasserstoffverbrauch auf verschiedene Bereiche aufgeteilt.

Wasserstoff wird voraussichtlich in den Bereichen Verkehr, Gebäude, Industrie (als Brennstoff) und Industrie (als Rohstoff) verwendet werden [60]. Basierend darauf wurden folgende Annahmen getroffen:

- Der Verbrauch von Wasserstoff in den Bereichen Verkehr und Gebäude, wird voraussichtlich über ganz Deutschland verteilt stattfinden und ist somit stark von der jeweiligen Bevölkerungsdichte abhängig.
- Der lokale industrielle Wasserstoffverbrauch ist von der lokalen Dichte an Industrieunternehmen abhängig und stellt insgesamt den größten Anteil am Wasserstoffverbrauch dar.

Im weiteren Verlauf wurde der Wasserstoffverbrauch der Bereiche Verkehr und Gebäude vernachlässigt und der Fokus auf den Verbrauch der Industrie gelegt. Grund hierfür ist der nur schwer identifizier- und lokalisierbare Verbrauch des Verkehrs und die Annahme, dass der Verbrauch der Industrie den größten Anteil ausmachen wird.

Basierend auf diesen Annahmen wurden die deutschen Bundesländer nach ihrer Industriedichte sowie ihren jeweiligen Wasserverbräuchen untersucht. Um die importierten Wassermengen (min./max. für 2030 und 2050) in weitere Verhältnisse zu setzen, wurden unterschiedliche Aufteilungen der gesamtimportierten Wassermengen durchgeführt.

Die Aufteilung der importierten Wassermengen basiert auf folgende Kriterien:

- **Anteil am gesamten Wasserverbrauch in Deutschland pro Bundesland.**
Hierbei wurde die importierte Wassermenge den jeweiligen Bundesländern je nach Anteil am gesamten Wasserverbrauch in Deutschland zugeteilt.
- **Anteil an der Gesamtanzahl der Industrieunternehmen pro Bundesland.**
Hierbei wurde die importierte Wassermenge den jeweiligen Bundesländern je nach Anteil an der Gesamtanzahl an Industrieunternehmen in Deutschland zugeteilt.
- Des Weiteren wurde ein Vergleich angestellt, in dem jedes Bundesland die gesamtimportierte Wassermenge zur Verfügung gestellt bekommt.

Nach Aufteilung der Wassermengen, wurden diese anschließend mit den jeweiligen Wasserverbräuchen im Bundesland verglichen und ermittelt, wie viel Prozent mit der jeweiligen Wassermenge abgedeckt werden könnte.

Diese Gegenüberstellungen sollen eine grobe Abschätzung der möglichen Einflüsse auf den deutschen Wasserhaushalt visualisieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind tabellarisch im Anhang dargestellt (siehe Tabellen 96 bis 107)

3.6.2 Einfluss auf den Wasserhaushalt in Chile

Um genauere Aussagen über den Einfluss der Wasserstoffproduktion auf den chilenischen Wasserhaushalt treffen zu können, mussten vorerst die Wasserquellen der Produktion identifiziert werden. Da die chilenische Regierung aufgrund der bereits belasteten Wassersituation im Land plant, die Wasserversorgung der Wasserstoffproduktion durch Meerwasserentsalzung sicherzustellen, wurden weitere Wasserquellen in der folgenden Betrachtung vernachlässigt.

Zur Einordnung des Meerwasserbedarfs und der aufzuwendenden Energiemenge zur Erzeugung der untersuchten Wassermengen, wurde exemplarisch das Verfahren der Umkehrosmose gewählt, da es das meistgenutzte Verfahren zu Meerwasserentsalzung weltweit ist [38].

Übersicht der Umkehrosmose		
Recovery Ratio [%]; [38]	42	
min./max.	min.	max.
Energiebedarf [KWh/m ³]; [70]	2,00	3,00

Tabelle 37 Übersicht der Umkehrosmose

Das „Recovery Ratio“ gibt an, wie viel Prozent des verwendeten Meerwassers mithilfe der Meerwasserentsalzung zu Reinwasser verarbeitet werden kann [38].

Basierend auf diesen Angaben wurden Meerwassermengen ermittelt, welche benötigt werden, um die untersuchten Exportmengen an Wasserstoff zu produzieren.

Da angenommen werden kann, dass Meerwasser in Chile unbegrenzt zur Verfügung steht, ist der Energiebedarf der Entsalzungsanlagen der limitierende Faktor bei der Wasserbereitstellung. Mit Hilfe der Angaben aus Tabelle 37 wurden die jeweiligen Energiemengen ermittelt, die benötigt werden, um die erforderlichen Wassermengen zu produzieren. Diese wurden zur Visualisierung der Größenordnung mit Daten der chilenischen Stromerzeugung verglichen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Abschnitt: „4.5.1.2.1 Betrachtung der Wasserbereitstellung durch Meerwasserentsalzung“ zu finden.

4 Ergebnisse

Im vorliegenden Kapitel werden die herausgearbeiteten Ergebnisse der Länderanalysen, sowie die Ergebnisse der Wasserhaushaltsbetrachtung präsentiert. Hierbei werden zuerst die perspektivischen Wasserstoffbedarfsmengen der zuvor ausgewählten Importländer genauer beschrieben und tabellarisch dargestellt. Anschließend werden die Wasserstoffproduktionspotentiale der ausgewählten Exportländer präsentiert und ebenfalls visualisiert. Die Gesamtübersicht aller betrachteten Länder, sowie die Ergebnisse der erstellten Szenarien, sind in den Tabellen 46 bis 76 zu finden.

Mit Hilfe der ermittelten Importbedarfsmengen und Exportpotentialen, werden die Auswirkungen des Wasserstoffhandel anhand des Fallbeispiels Chile – Deutschland genauer betrachtet und in Tabellen visualisiert.

4.1 Untersuchung der perspektivischen Wasserstoffbedarfsmengen in Importländer

4.1.1 Deutschland

voraussichtliche Importeure	Deutschland			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	95,00	130,00	110,00	800,00
Bedarf [Mt]	2,85	3,90	3,30	24,02
Importbedarf [TWh]	47,50	91,00	55,00	400,00
Importbedarf [Mt]	1,43	2,73	1,65	12,01
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	10		50	80

Tabelle 38 Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Deutschland)

„Deutschland wird zur Wasserstoff-Wirtschaft.“ [15] So beginnt der Artikel zum Update der Nationalen Wasserstoffstrategie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung vom 26.07.2023.

Die Bundesregierung veröffentlichte im Juni 2022 die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) und präsentierte somit einen weiteren Baustein hin zur Dekarbonisierung der deutschen Wirtschaft.

Deutschland verfolgt langfristig das Ziel der Klimaneutralität im Einklang mit den Zielen des Pariser Abkommens von 2015 und den Zielen der Treibhausgasneutralität bis 2050, zu welchen sich die Staaten der Europäischen Union bekannt haben. Um diese Ziele erreichen und insbesondere die schwer zu vermindernenden Emissionen aus der Industrie verringern zu können, hat die Bundesregierung Wasserstoff als wichtigen Bestandteil der Deutschen Energiewende identifiziert.

Aus Sicht der Bundesregierung ist hierbei nur Wasserstoff, welcher auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt wurde als dauerhaft nachhaltig zu betrachten. Jedoch wird in der

Nationalen Wasserstoffstrategie ebenfalls erwähnt, dass übergangsweise mit dem Einsatz von CO₂-neutralem Wasserstoff (z.B. blauer Wasserstoff) geplant wird. Als Grund hierfür wird der in den nächsten zehn Jahren entstehende globale und europäische Wasserstoffmarkt genannt, in welchen Deutschland aufgrund der europäischen Energieversorgungsinfrastruktur stark eingebunden sein wird. Bis grüner Wasserstoff bedarfsdeckend und wirtschaftlich konkurrenzfähig zur Verfügung steht, wird eine vorübergehende Nutzung von CO₂-neutralem Wasserstoff unumgänglich sein [10].

Die geplante Nutzung von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten (PtX) in Deutschland ist hierbei vielfältig. Geplant wird der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger für wasserstoffbasierte Mobilität, als ergänzender Energiespeicher für die fluktuierende Energiegewinnung durch erneuerbare Energiesysteme, sowie als wesentliches Element der Sektor Kopplung, in Bereichen in denen Strom aus erneuerbaren Quellen nicht direkt eingesetzt werden kann. Des Weiteren soll „grüner“ Wasserstoff Anwendung in chemischen und industriellen Prozessen finden, in dem der bereits verwendeter CO₂-haltiger Wasserstoff durch den „grünen“ Wasserstoff ersetzt wird. Aber auch die Umwandlung von CO₂-Emissionen mittels Carbon Capture and Utilization (CCU) Verfahren in verwertbare Chemikalien, soll durch die Nutzung von Wasserstoff realisiert werden [10].

In der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie vom Juli 2023, wird der gesamte deutsche Wasserstoffbedarf im Jahr 2030 auf ca. 95-130 TWh geschätzt. Diese Prognose beinhaltet ebenfalls den Bedarf an Wasserstoffderivaten wie Ammoniak, Methanol oder synthetischen Kraftstoffen. Dem bereits bestehenden Bedarf von ca. 55 TWh, der aktuell durch „grauen“ Wasserstoff gedeckt wird, soll bis 2030 ein weiterer Bedarf von 40-75 TWh hinzukommen.

Für das Jahr 2050 wird in der nationalen Wasserstoffstrategie ein Bedarf von 110-380 TWh an Wasserstoff erwartet [11].

Eine Metastudie zum Thema Wasserstoff des Fraunhofer-Instituts hat für den zukünftigen Bedarf an Wasserstoff in Deutschland abweichende Erkenntnisse gewonnen. Die Bandbreite des Bedarfs an Wasserstoff und seinen Derivaten für das Jahr 2030 lag hierbei zwischen „sehr geringer Nachfrage“ und ca. 80 TWh, wobei in vielen Studien der prognostizierte zusätzliche Bedarf bei unter 50 TWh lag. Für das Jahr 2050 lag die Bandbreite des Bedarfs bei 400-800 TWh [105].

Betrachtet man nun die geplanten Produktionskapazitäten in Deutschland, so wird schnell ersichtlich, dass Deutschland seinen Eigenbedarf durch inländische Produktion nicht decken werden kann (vgl. mit Tabelle 92 im Anhang). Die geplanten Produktionskapazitäten liegen bei 10 GW bis 2030 [11] und 50-80 GW bis 2050 [16].

Nach Einschätzungen der Bundesregierung, sollen bei einem prognostizierten Bedarf von 95-130 TWh im Jahr 2030 ca. 50 bis 70 Prozent durch Importe gedeckt werden. In den Jahren nach 2030 soll der Importanteil weiter ansteigen [11].

Auch die Metastudie des Fraunhofer-Instituts kommt zu dem Ergebnis, dass der Bedarf ab ca. 2030 zu über 50 Prozent durch ausländische Quellen gedeckt wird [105]. Zusätzlich wird erwähnt, dass die Importquote von Syntheseprodukten i.d.R. höher sein wird als bei reinem Wasserstoff. Bei Szenarien mit höheren Bedarfen wurden ebenfalls höhere Importquoten festgestellt [105]. Diese Importe können aus der EU oder durch internationale Partnerschaften bereitgestellt werden.

4.1.2 Japan

voraussichtliche Importeure	Japan					
Jahr	2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	100,00	k.A.	400,00	k.A.	666,00	706,00
Bedarf [Mt]	3,00	k.A.	12,00	k.A.	20,00	21,20
Importbedarf [TWh]	10,00	k.A.	68,00	k.A.	k.A.	353,00
Importbedarf [Mt]	0,30	k.A.	2,04	k.A.	k.A.	10,60
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 39 Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Japan)

Japan war 2017 das erste Land weltweit, welches mit der Veröffentlichung der „Basic Hydrogen Strategy“ seine nationale Wasserstoffstrategie präsentierte [20]. Sechs Jahre später, im Juni 2023, veröffentlichte die japanische Regierung eine überarbeitete Version dieser Wasserstoffstrategie [82]. In dieser wird nicht nur der Einsatz von Wasserstoff, sondern auch die Nutzung von Ammoniak, synthetischem Methan und synthetischen Kraftstoffen behandelt. Der geplante Gebrauch von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten bezieht sich hierbei nicht auf ausschließlich „grünen“ Wasserstoff, sondern ebenfalls auf die Nutzung von „blauem“ Wasserstoff.

In der japanischen Wasserstoffstrategie wurden mehrere Ziele formuliert, welche im Folgenden in den vier Hauptzielen wiedergegeben werden [82]:

- Japan möchte das Dargebot an Wasserstoff und Ammoniak bis 2030 auf 3 Millionen Tonnen erhöhen. 2040 sollen es 12 Millionen und 2050 20 Millionen Tonnen werden
- Die Wasserstoffkosten sollen bis 2030 auf 30 JPY pro Nm³ reduziert werden. Bis 2050 soll der Preis für einen Nm³ bei 20 JPY liegen.
- Japan möchte die Anzahl an Wasserelektrolyseanlagen, die Teile aus japanischer Produktion enthalten, bis 2030 weltweit auf etwa 15 GW erhöhen.
- In den nächsten 15 Jahren sollen Investitionen in Höhe von mehr als 15 Billionen JPY durch öffentliche und private Investoren, in den Wasserstoff- und Ammoniaksektor getätigt werden.

Mit einem Wasserstoff Heizwert von 33,3 kWh/Kg [79] ergibt sich ein zukünftiger Bedarf an Wasserstoff und Ammoniak von ca. 100 TWh bis 2030, 400 TWh bis 2040 und 666 TWh bis 2050.

Zur geplanten heimischen Produktion an Wasserstoff wurden im Strategiepapier keine Zahlen genannt. Jedoch wird von einem überwiegenden Import von Wasserstoff und seinen Derivaten ausgegangen. Aktuell plant die japanische Regierung einen Import von 0,3 Mt H₂ /Jahr emissionsarmem Wasserstoff bis 2030 [46].

In einer Analyse der japanischen Wasserstoffstrategie, vom Renewable Energy Institute (REI) in Tokyo, wird der japanischen Regierung empfohlen, seine Produktionskapazitäten von grünem Wasserstoff zukünftig deutlich zu erhöhen. Als Grund hierfür wurde die Steigerung in der Energiesicherheit genannt. Nach Berechnungen der Regierung liegt der aktuelle Selbstversorgungsgrad im Energiebereich in Japan bei 12 % [81]. Durch eine Erhöhung der Produktionskapazitäten im Bereich der erneuerbaren Energien, sowie der Produktion von Wasserstoff und seinen Derivaten, könnte die Selbstversorgungsquote im Energiebereich erheblich gesteigert werden [81].

In der Veröffentlichung: „Renewable pathways to climate-neutral Japan“, vom REI, wurden für das Ziel eines klimaneutralen Japans bis 2050, genauere Produktionszahlen für grünen Wasserstoff und seine Derivate genannt. Laut REI wird für dieses Szenario eine Produktion von 3 TWh bis 2030 erwartet. 2040 sollen es bereits 68 TWh und 2050 353 TWh sein, wobei ab 2035 ebenso viel importiert werden soll [13].

Ein Vergleich zwischen den erwarteten Produktions- und Importzahlen des REI und dem erwarteten Bedarf aus der japanischen Wasserstoffstrategie ist, aufgrund der unterschiedlichen Szenarien, die zur Ermittlung dieser Zahlen verwendet wurden, nicht anzustellen. Jedoch können grobe Annahmen aus beiden Veröffentlichungen gezogen werden. So wird voraussichtlich ein Großteil des Bedarf 2030 durch Importe gedeckt werden.

Ab 2035 könnte die inländische Produktion die Hälfte des japanischen Bedarfs decken. Dies wird stark davon abhängig sein, ob Japan in der Lage sein wird Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen zu produzieren.

Laut Angaben des „Hydrogen Factsheet - Japan“ sind die japanischen Kapazitäten für die eigene Wasserstoffproduktion, insbesondere für „grünen“ Wasserstoff, aufgrund geringer Flächenverfügbarkeiten im Land jedoch stark limitiert [91]. Durch diesen Umstand könnte die wettbewerbsfähige Produktion von Wasserstoff in der Zukunft schwer umsetzbar sein.

Es bleibt festzuhalten, dass Japan, wie bereits in der eigenen Strategie geplant, zukünftig Importeur von Wasserstoff und seinen Derivaten sein wird, da sie ihren eigenen Bedarf voraussichtlich nicht vollständig decken werden können.

4.1.3 Süd-Korea

voraussichtliche Importeure	Süd-Korea			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	129,87	k.A.	899,10	k.A.
Bedarf [Mt]	3,90	k.A.	27,00	k.A.
Importbedarf [TWh]	66,60	k.A.	762,57	k.A.
Importbedarf [Mt]	2,00	k.A.	22,90	k.A.
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 40 Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Süd-Korea)

Im Jahr 2019 veröffentlichte die Süd-Koreanische Regierung die „Hydrogen Economy Roadmap of Korea“ [92], in der langfristige Ziele zum Umgang mit Wasserstoff und seinen Derivaten formuliert wurden. So plant die koreanische Regierung zukünftig eine weltweite Führungsposition im Bereich der Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV), sowie der Produktion und Nutzung von Brennstoffzellen, für die Stromerzeugung im großen Maßstab, einzunehmen. Bis 2040 sollen bis zu 6,2 Millionen Brennstoffzellenfahrzeuge produziert werden, wobei 2,9 Millionen Einheiten für den eigenen Markt und 3,3 Millionen für den Export produziert werden sollen.

Um diese Vorhaben umzusetzen, werden große Mengen an Wasserstoff benötigt. Der zukünftige Bedarf wurde 2019 auf 1,94 Millionen Tonnen für das Jahr 2030 und 5,26 Millionen Tonnen für das Jahr 2040 geschätzt [57]. Dies entspricht ca. 64,6 TWh für 2030 und 175 TWh für 2040. Die Zahlen aus der Wasserstoffstrategie von 2019 wurden bereits aktualisiert. So plant Süd-Korea mittlerweile eine eigene Produktion von 1,9 Mt und einen Import von ca. 2 Mt bis 2030. Bis 2050 soll der Bedarf auf 27 Millionen Tonnen steigen mit einem Importanteil von 22,9 Mt [51]; [62].

Wie die aktuellen Zahlen erkennen lassen, plant die koreanische Regierung ihre eigenen Produktionskapazitäten hochzufahren, aber ihren Bedarf größtenteils durch Importe sicherzustellen. Der Fokus der inländischen Produktion liegt hierbei auf der Herstellung von überwiegend „grauem“ Wasserstoff. Bis 2040 plant die Regierung jedoch 70 % ihres Bedarf durch Co2 neutralen Wasserstoff zu decken. Dieser soll sowohl durch die eigene Produktion, aber auch durch Importe bereitgestellt werden [57]. Bis 2030 plant die koreanische Regierung einen Import von 2 Mt H₂/Jahr emissionsarmem Wasserstoff [46].

Süd-Korea wird langfristig auf den Import von Co₂-neutralem Wasserstoff angewiesen sein. Grund hierfür sind die voraussichtlichen Produktionskosten von Wasserstoff in Süd-Korea, die laut eigenen Aussagen nicht wettbewerbsfähig sein werden. Grund für diese Annahme sind die von der koreanischen Regierung angegebenen Produktionskosten für Solar und Wind (onshore). So lagen diese bei 10-12 USD Cent/ kWh für die Energiegewinnung durch Solar (im Jahr 2018) und bei 12 USD Cent/kWh für die Energiegewinnung durch Windenergie (im Jahr 2017) [57].

Laut IEA (International Energy Agency), werden für die Produktion von Wasserstoff Strompreise von 1-4 USD Cent/kWh benötigt um gegenüber dem, aus Erdgas (mit CCS) erzeugtem Wasserstoff, wettbewerbsfähig zu sein [48].

4.1.4 EU

voraussichtliche Importeure	EU			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	666,00	k.A.	2000,00	k.A.
Bedarf [Mt]	20,00	k.A.	60,06	k.A.
Importbedarf [TWh]	333,00	k.A.	1000,00	k.A.
Importbedarf [Mt]	10,00	k.A.	30,03	k.A.
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	40		500	

Tabelle 41 Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: EU)

Am 18.05.2022 präsentierte die Europäische Union den REPowerEU-Plan, welcher als Reaktion auf den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine und der daraus resultierenden Störung des globalen Energiesystems entstanden ist. In diesem werden neben anderen energiepolitischen Themen, auch die Nutzung, Produktion und Versorgung von Wasserstoff und seinen Derivaten behandelt. Im REPowerEU-Plan wird das Ziel formuliert bis 2030, den erwarteten Bedarf von 20 Millionen Tonnen an erneuerbarem Wasserstoff, durch eine heimische Produktion von 10 Millionen Tonnen und dem Import von 10 Millionen Tonnen sicherzustellen [32]. In dem Wasserstoffstrategiepapier für ein klimaneutrales Europa, vom 08.07.2020, wird geplant, dass kurz- und mittelfristig jedoch auch andere Arten an Co₂-armem Wasserstoff verwendet werden. Begründet wird dies mit der raschen Co₂ Minderung der bereits bestehenden Wasserstoffproduktion, sowie der Unterstützung der Verbreitung von erneuerbarem Wasserstoff. Konkrete Zahlenwerte für den Bedarf, die Erzeugung und den

Import von nicht erneuerbarem Wasserstoff werden jedoch nicht genannt [34]. Ebenso wurden direkte Angaben zum voraussichtlichen Bedarf an Wasserstoff im Jahr 2050 ausgelassen. Für die Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff plant die EU den Ausbau von 40 GW an Elektrolyseurleistung bis 2030. Hinzukommt die geplante Installation von weiteren 40 GW in den EU-Nachbarländern. Diese dienen dem Export in die EU. Bis 2050 sollen die Kapazitäten in der EU bis auf ca. 500 GW erhöht werden [33].

Ein Bericht des European Hydrogen Backbone geht von einem Bedarf, im Jahr 2050, von 2300 TWh aus [36]. Allerdings wird hierbei ebenfalls der Bedarf des Vereinigten Königreichs mitberücksichtigt. Laut einer Studie des World Energy Council, soll der EU-Bedarf 2050 bei etwa 60Mt (ca. 2000TWh) mit einer Importquote von 50 % [80] liegen.

4.2 Untersuchung der perspektivischen Wasserstoffproduktionspotentiale in Exportländern

4.2.1 Chile

voraussichtliche Exporteure	Chile					
Jahr	2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Bedarf [Mt]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	25		130		190	
mögliche Exportmengen [TWh]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
mögliche Exportmengen [Mt]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 42 Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Chile)

Mit der Veröffentlichung der „National Green Hydrogen Strategy“ im November 2020 präsentierte die chilenische Regierung Ihre zukünftigen Ambitionen eine führende Rolle als Exporteur von grünem Wasserstoff auf dem Weltmarkt einzunehmen. Grund für dieses Vorhaben ist das enorme Potential an kostengünstiger Erzeugung von erneuerbaren Energien, sowie dem damit verbundenen Potential zur wettbewerbsfähigen Produktion von erneuerbarem Wasserstoff [65].

Mit der Atacama Wüste im Norden des Landes besitzt Chile einen der Orte mit der nachweislich höchsten Langzeit-Sonneneinstrahlung der Welt [67]. In Kombination mit der großen Flächenverfügbarkeit innerhalb der Wüste, weist Chile großes Potential an erneuerbarer Energie durch Solarkraft auf. Auch für die Energiegewinnung durch Windenergieanlagen ist Chile gut geeignet.

Im Süden des Landes können beispielsweise 120 Meter hohe Windturbinen an Land Kapazitätsfaktoren von über 60 % erreichen, was der Leistung von Offshore-Anlagen in anderen Ländern entspricht. In einigen Orten des Landes ist die Energieerzeugung durch Solarenergie bereits kostengünstiger als die Stromerzeugung durch fossile Energieträger. Laut Angaben des chilenischen Energieministeriums hat das Land ein Potential an erneuerbaren Energien von über 1800 GW, wobei ein Großteil durch Solarkraftwerke bereitgestellt wird [65].

Im Strategiepapier werden bezüglich der Wasserstoffproduktion konkrete Ziele für die kommenden Jahre genannt. Bis 2025 sollen 5 GW an Elektrolyseleistung in Betrieb und in Entwicklung sein, sowie eine Produktion von 0,2 Mt H₂ pro Jahr realisiert werden. Bis 2030 sollen es bereits 25 GW an installierter Elektrolyseleistung sein. Des Weiteren will Chile zu einem weltweit führendem Exporteur von grünem Wasserstoff und seinen Derivaten aufsteigen, mit einem Preis von weniger als 1,5 USD/Kg [65].

Laut Untersuchungen der McKinsey & Company Unternehmensberatung, sind Produktionskosten für grünen Wasserstoff von unter 1,5 USD/Kg bis 2030, je nach Produktionsstandort, durchaus möglich. Auf lange Sicht können diese sogar bei bis zu unter 1 USD/Kg liegen [63]. (Siehe Abb.2)

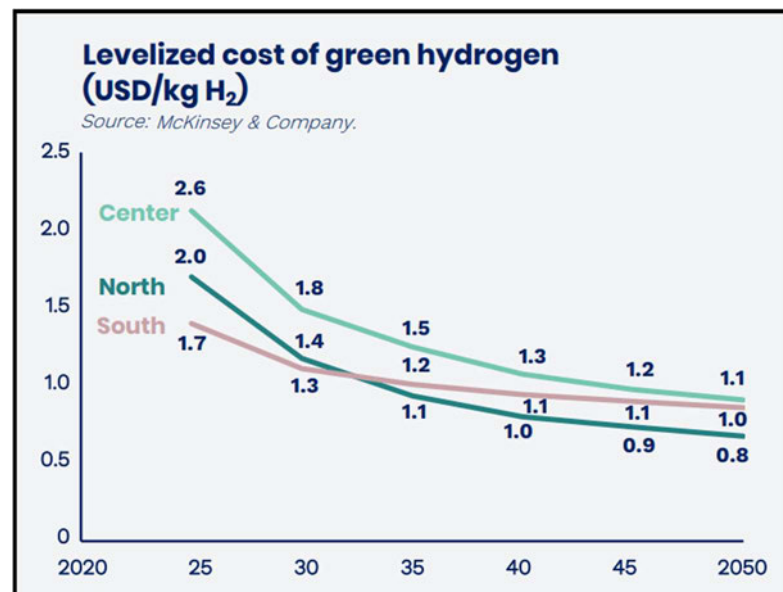


Abbildung 2 Levelized cost of green hydrogen (USD/Kg H₂) [63]

Ein Vergleich mit anderen Standorten (Siehe Abb.3) zeigt, dass Chiles Wasserstoffproduktionskosten im Jahr 2030 deutlich günstiger sind als an anderen Standorten dieser Erde. Die Kosten für die weitere Verarbeitung, sowie Transport und Vertrieb variieren ja nach Verwendungszweck und wurden hierbei nicht berücksichtigt.

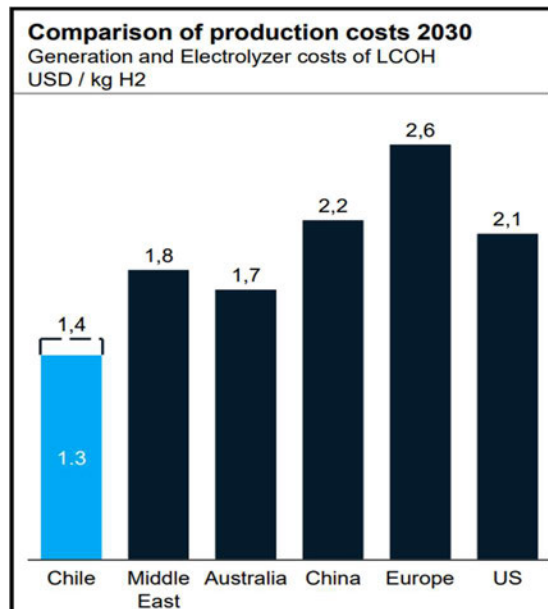


Abbildung 3 Comparison of production costs 2030 [63]

Die beiden Abbildungen 2 und 3 zeigen, dass die Produktionskosten von grünem Wasserstoff in Chile mit den Jahren deutlich sinken werden, und dass diese weltweit wettbewerbsfähig sind.

Ein Blick auf die Prognosen für den chilenischen Wasserstoff- und Derivatemarkt, für die Jahre 2025 bis 2050, von McKinsey & Company (siehe Abb.4), zeigt, dass Wasserstoff und seine Derivate in Chile zu ca. 70% für den Export produziert werden. Laut dieser Prognose werden Produktionskapazitäten von 190 GW bis 2050 benötigt.

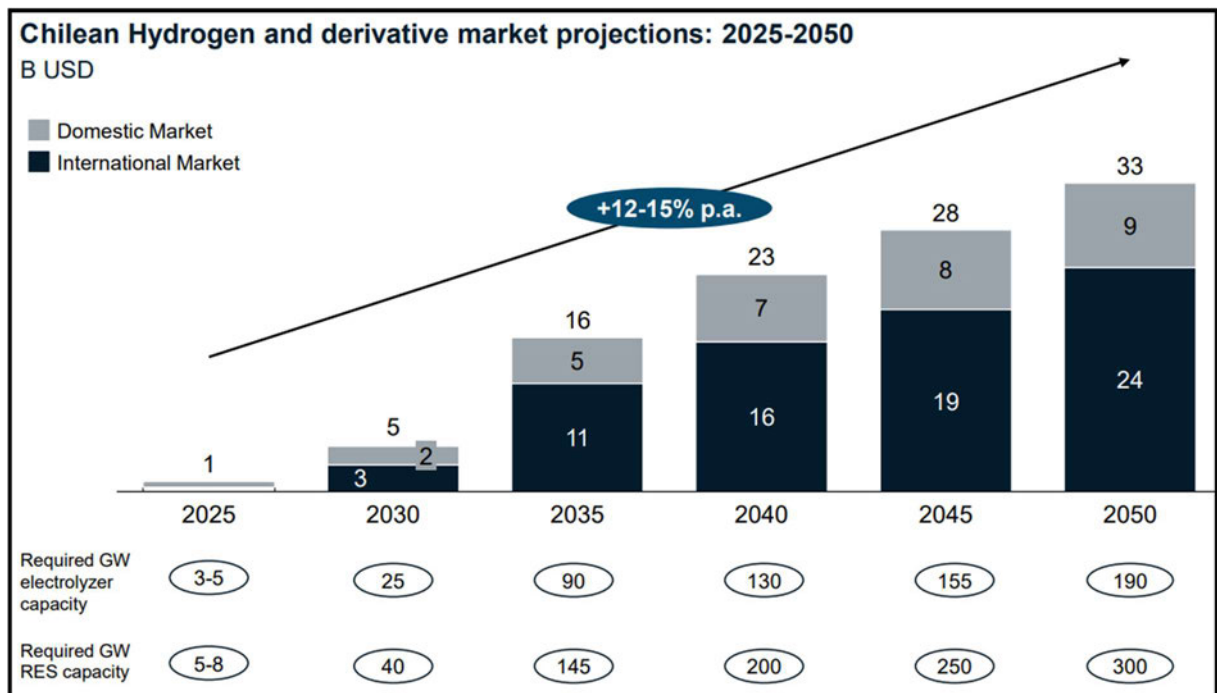


Abbildung 4 Chilean Hydrogen and derivate market projections: 2025-2050 [63]

Betrachtet man die untersuchten Faktoren, so bleibt festzuhalten, dass Chile ein großes Potential an erneuerbaren Energien hat, genügend Fläche in den Wüstengebieten besitzt, um diese zu nutzen, zu einem wettbewerbsfähigen Preis grünen Wasserstoff produzieren kann und ambitionierte Ziele besitzt, diese Potentiale auszuschöpfen. Die Versorgung mit ausreichend Wasser zur Elektrolyse, ist durch den direkten Meereszugang ebenfalls gegeben. Chile besitzt damit herausragende Voraussetzungen um eine zentrale Rolle als Exporteur auf dem zukünftigen Wasserstoffmarkt einzunehmen.

Laut der Internationalen Energieagentur IEA besitzt Chile das Potential bis zu 160 Mt H₂ pro Jahr für unter 2 USD/KgH₂ zu produzieren [48]. Dies entspricht über 5300 TWh an Wasserstoff. Diese Menge würde ausreichen, um mehr als das 2,5 fache des prognostizierten EU-Bedarfs für 2050 zu decken.

4.2.2 Australien

voraussichtliche Exporteure	Australien			
Jahr	2030		2040	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	9,99	k.A	k.A	k.A
Bedarf [Mt]	0,30	k.A	k.A	k.A
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	50		k.A	k.A
mögliche Exportmengen [TWh]	89,91	k.A	500,00	k.A
mögliche Exportmengen [Mt]	2,70	k.A	15,02	k.A

Tabelle 43 Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Australien)

Australien veröffentlichte 2019 als drittes Land weltweit ihre nationale Wasserstoffstrategie, in der bereits ehrgeizige Ziele für die Nutzung, Produktion und dem Export von Wasserstoff formuliert wurden. In dem Strategiepapier ist davon die Rede, die weltweit zunehmende Nachfrage an sauberem Wasserstoff zu nutzen und zu einem weltweit agierenden Exporteur von Wasserstoff und seinen Derivaten zu werden. Laut australischer Regierung bietet der zukünftige Wasserstoffmarkt das Potential für tausende von regionalen Arbeitsplätzen und einem Wirtschaftswachstum in Milliardenhöhe bis 2050 [19].

Ausgangspunkt zur Realisierung der australischen Ziele, ist das hohe Produktionspotential von erneuerbaren Energien. Laut Angaben der australischen Botschaft wurden von Geoscience Australia 873.000 km² an Landfläche identifiziert, welche für die Erzeugung von erneuerbaren Energien geeignet ist. Hinzu kommen gute Kapazitäten an Sonnenenergie, mit einer jährlichen Sonneneinstrahlung von 58 Millionen PJ und exzellenten Windressourcen. Die Sonnenenergie der aussichtsreichsten Regionen Australiens, welche ca. 3% der Landesfläche entsprechen, könnte genutzt werden um jährlich mehr als 600 Mt an grünem Wasserstoff zu produzieren [7].

Das Potential zur Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff scheint grenzenlos und lediglich durch die Ambitionen der australischen Regierung limitiert zu sein, was Australien zum weltweit größten Exporteur von Wasserstoff aufsteigen lassen könnte.

Laut des REN21 RENEWABLES 2023 GLOBAL STATUS REPORT, hatte Australien 2022 die größte Anzahl an angekündigten Anlagen zur Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff. Ebenfalls wurde prognostiziert, dass das Land durch seine reichhaltigen Solar- und Windressourcen bis 2050 voraussichtlich mit die niedrigsten Kosten zur Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff erreichen wird [83].

Diese Prognose deckt sich mit dem australischen „H2 under 2“ Vorhaben, wobei Wasserstoff für einen Preis von unter 2\$ (AUD)/ Kg produziert werden soll [7].

Trotz meistgeplanter Projekte wurde 2022 für lediglich ein Projekt mit einer ungefähren Kapazität von 10 MW, eine endgültige Investitionsentscheidung getroffen [8].

Die International Energy Agency prognostiziert, basierend auf den geplanten Projekten, eine Wasserstoffproduktion mittels erneuerbarer Elektrizität von 3 Mt bis 2030. Hierfür sollen Elektrolysekapazitäten von 50 GW benötigt werden. Von den erwarteten 12 Mt emissionsarmen Wasserstoffs bis 2030, welche weltweit exportiert werden sollen, soll der australische Anteil etwa 2,7 Mt H₂/Jahr betragen [46].

Konkrete Angaben zu Produktions- und Exportzahlen von Wasserstoff nach 2030 werden im australischen Strategiepapier nicht genannt. Jedoch wurde im Zuge einer deutsch-australischen Wasserstoffpartnerschaft eine potenzielle Exportmenge von 500 TWh/Jahr bis 2040 genannt, welche Deutschland zur Verfügung gestellt werden könnte [6].

Es bleibt festzuhalten, dass Australien das Ziel besitzt, zukünftig Top Exporteur von erneuerbarem Wasserstoff zu werden und dass Ihnen alle benötigten Ressourcen dafür zur Verfügung stehen. Welche Mengen zu welchem Zeitpunkt produziert und exportiert werden, hängt von der Umsetzung der Ausbaumaßnahmen, sowie den vereinbarten Energiepartnerschaften ab. Mit einem erwarteten Preis von unter 2\$ (AUD)/Kg H₂, sollte es den Australiern möglich sein, eine wettbewerbsfähige Wasserstoffexportwirtschaft aufzubauen.

4.2.3 Kanada

voraussichtliche Exporteure	Kanada			
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	k.A.	k.A.	k.A.	682,65
Bedarf [Mt]	k.A.	k.A.	k.A.	20,50
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
mögliche Exportmengen [TWh]	33,30	83,25	83,25	1165,50
mögliche Exportmengen [Mt]	1,00	2,50	2,50	35,00

Tabelle 44 Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Kanada)

Ende 2020 veröffentlichte Kanada seine Wasserstoffstrategie, in der klare Ziele zur Nutzung, Produktion, sowie zum Export von Wasserstoff formuliert werden.

Laut eigenen Angaben besitzt Kanada hervorragende Ressourcen zur Produktion von Wasserstoff. Es besitzt eines der kohlenstoffärmsten Stromversorgungssysteme der Welt, reichlich fossile Brennstoffreserven, erstklassige geologische Gegebenheiten für die Speicherung von CO₂, ein großes Vorkommen an Biomasse und große Süßwasserressourcen [108]. 81 % der kanadischen Stromerzeugung stammt aus emissionsarmen oder emissionsfreien Quellen [17]. Bereits heute zählt Kanada zu den größten Wasserstoffherzeugern der Welt mit einer ungefähren Produktion von 3 Millionen Tonnen pro Jahr. Jedoch wird das meiste davon mittels fossiler Brennstoffe erzeugt [108].

In einem Bericht des Canada Energy Regulator von 2023 wurde die Produktion von Wasserstoff für den Export genauer untersucht. Hierbei wurden mehrere Szenarien aufgestellt, in denen unterschiedliche Nutzungsgrade von Wasserstoff und fossilen Energieträgern angenommen wurden. Ergebnis dieser Untersuchung ist eine voraussichtliche Produktion von Wasserstoff für den Export von 1 bis 2,5 Mt bis 2030 und 2,5 bis 8 Mt bis 2050, je nach Szenario. Ebenfalls wird erwähnt, dass die voraussichtliche Herstellung des exportierten Wasserstoffs einerseits durch Elektrolyse, andererseits durch Erdgas in Kombination mit CCS bzw. CCU geschehen wird. Dies ist abhängig von den jeweiligen Produktionsstandorten und den dort verfügbaren Ressourcen [17].

Für die Szenarien wurden ebenfalls Produktionskosten ermittelt, welche zwischen 1,50 bis 10,50 \$/Kg für 2030 und 1 bis 7 \$/Kg für 2050 liegen (Kanadische Dollar). Auch diese sind stark abhängig von Produktionsstandort, verfügbaren Ressourcen und eingesetzten Technologien [17].

Eine andere Studie hat für das Exportpotenzial von grünem Wasserstoff, deutlich größere Mengen ermittelt. So liegt die voraussichtliche Menge im Jahr 2050 bei 25 bis 35 Mt H₂ / Jahr [98]. Das entspricht einer Energiemenge von 832,5 bis 1165,5 TWh/a. Voraussetzung ist hier, dass Kanada das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 erreicht und sowohl für die Stromerzeugung als auch für die Wasserstoffproduktion ausschließlich erneuerbare Quellen verwendet [98].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Kanada durch ihren Ressourcenreichtum, ihre Ziele eine Exportnation zu werden, sowie den bereits vorhandenen Technologien und ihren Erfahrungen bei der Produktion von Wasserstoff, gute Voraussetzungen vorweist zukünftig zu den größten Exporteuren von Wasserstoff zu werden. Ebenfalls besitzt Kanada bereits gut ausgebaute Versorgungsnetze in die USA und hat durch Ihre gute Hafeninfrastruktur Zugang zu Märkten in Asien und Europa.

Bis 2050 will Kanada einer der drei größten Produzenten von Wasserstoff weltweit werden, bis zu 20,5 Millionen Tonnen heimischen Wasserstoff verbrauchen und große Mengen exportieren [98].

4.2.4 Marokko

voraussichtliche Exporteure	Marokko					
Jahr	2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	3,60	8,40	22,00	41,00	39,20	77,60
Bedarf [Mt]	0,11	0,25	0,66	1,23	1,18	2,33
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	3		14		k.A	k.A
mögliche Exportmengen [TWh]	10,30	21,70	45,90	91,80	114,70	229,50
mögliche Exportmengen [Mt]	0,31	0,65	1,38	2,76	3,44	6,89

Tabelle 45 Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Marokko)

Das marokkanische Energieministerium veröffentlichte 2021 Ihr Wasserstoffstrategiepapier „Feuille de route de hydrogène vert“, zu Deutsch Grüner Wasserstoff Fahrplan.

Die Strategie umfasst einen Zeitraum bis 2050 und sieht drei konkrete Phasen vor. In der ersten Phase bis zum Jahr 2030 soll Wasserstoff verstärkt in der Produktion marokkanischer Industrieunternehmen eingesetzt werden. In der zweiten Phase im Zeitraum von 2030 bis 2040 sollen die ersten wirtschaftlich tragfähigen Projekte im Bereich Power-to-X beginnen, wobei die Ausfuhren von synthetischen Flüssigkraftstoffen im Fokus stehen soll. In der letzten Phase von 2040 bis 2050 wird damit gerechnet grünen Wasserstoff in der Industrie, bei der Wärmeerzeugung der urbanen Mobilität oder auch im Luftverkehr zu nutzen [87].

Aufgrund des hohen Potential an erneuerbaren Energien [66], sowie den ambitionierten Zielen diese auszubauen, möchte sich Marokko als Exporteur auf dem Wasserstoffmarkt der Zukunft etablieren. Hierzu wurden konkrete Zahlenwerte genannt.

So schätzt die marokkanische Regierung die Mindestexportnachfrage nach grünem Wasserstoff auf 10 TWh für das Jahr 2030. 2040 sollen diese dann auf 46 TWh und 2050 auf 115 TWh steigen. Ebenfalls rechnen Sie mit einer inländischen Nachfrage von 4 TWh im Jahr 2030, 22 TWh bis 2040 und 40 TWh bis 2050 [88].

Die nötigen Kapazitäten an erneuerbaren Energien liegen, laut eigenen Angaben, bei 8 GW bis 2030, 37 GW bis 2040 und 78 GW bis 2050, um die Nachfrage im In- und Ausland zu decken [88].

Nachfrageszenario für grünen Wasserstoff (inkl. Derivate) in Marokko nach Kategorie (Bandbreite zwischen Referenzwert und optimistischen Erwartungen; in TWh)			
Anwendung/Sektor	2030	2040	2050
Exporte	10,3 - 21,7	45,9 - 91,8	114,7 - 229,5
Primärverbrauch Industrie	3,1 - 6,8	14,1 - 19,8	20,7 - 21,4
Energieverbrauch Transport	0,5 - 1,4	5,0 - 13,9	11,2 - 37,7
Energieverbrauch Industrie	-	2,7 - 6,7	5,4 - 14,4
Energieverbrauch Privathaushalte	-	-	1,3 - 3,1
Energiespeicherung	0,0 - 0,2	0,2 - 0,6	0,6 - 1,0
Insgesamt	13,9 - 30,1	67,9 - 132,8	153,9 - 307,1
Quelle: Ministère de la Transition Énergétique et de Développement Durable			

Abbildung 5 Nachfrageszenario für grünen Wasserstoff (inkl. Derivate) in Marokko nach Kategorie; in TWh [88]

Laut Pressemitteilung der John Cockerill Unternehmensgruppe, wird von einer Elektrolysekapazität in Marokko bis 2030 von 3 GW ausgegangen. Bis 2040 sollen es 14 GW sein [56].

4.3 Länderübersichten und Szenarien

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Länderübersicht und der Erstellten Szenarien tabellarisch dargestellt.

4.3.1 Länderübersicht

Die Länderübersicht stellt eine Werteübersicht der untersuchten Länder dar.

voraussichtliche Importeure	Deutschland				Japan					
Jahr	2030		2050		2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	95 ^[11]	130 ^[11]	110 ^[11]	800 ^[105]	100 ^[82]	k.A.	400 ^[82]	k.A.	666 ^[82]	706 ^[13]
Bedarf [Mt]	2,85 ^[11]	3,9 ^[11]	3,3 ^[11]	24,02 ^[105]	3 ^[82]	k.A.	12 ^[82]	k.A.	20 ^[82]	21,2 ^[13]
Importbedarf [TWh]	47,5 ^[11]	91 ^[11]	55 ^[105]	400 ^[105]	10 ^[46]	k.A.	68 ^[13]	k.A.	k.A.	353 ^[13]
Importbedarf [Mt]	1,43 ^[11]	2,73 ^[11]	1,65 ^[105]	12,01 ^[105]	0,3 ^[46]	k.A.	2,04 ^[13]	k.A.	k.A.	10,6 ^[13]
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	10 ^[11]		50 ^[16]	80 ^[16]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 46 Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Deutschland und Japan)

voraussichtliche Importeure	Süd-Korea				EU			
Jahr	2030		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	129,87 ^[51]	k.A.	899,1 ^[51]	k.A.	666 ^[32]	k.A.	2000 ^[80]	k.A.
Bedarf [Mt]	3,9 ^[51]	k.A.	27 ^[51]	k.A.	20 ^[32]	k.A.	60,06 ^[80]	k.A.
Importbedarf [TWh]	66,6 ^[62]	k.A.	762,57 ^[62]	k.A.	333 ^[32]	k.A.	1000 ^[80]	k.A.
Importbedarf [Mt]	2 ^[62]	k.A.	22,9 ^[62]	k.A.	10 ^[32]	k.A.	30,03 ^[80]	k.A.
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	40 ^[33]		500 ^[33]	

Tabelle 47 Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Süd-Korea und EU)

voraussichtliche Importeure	Frankreich				UK					
Jahr	2030		2050		2030		2035		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	22,64 [95]	k.A	63 [78]	178,00 [78]	k.A	k.A	80 [23]	140 [23]	250 [43]	460 [43]
Bedarf [Mt]	0,68 [95]	k.A	1,89 [78]	5,35 [78]	k.A	k.A	2,4 [23]	4,2 [23]	7,51 [43]	13,81 [43]
Importbedarf [TWh]	k.A	k.A	16,65 [95]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A
Importbedarf [Mt]	k.A	k.A	0,5 [95]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	6,5 [41]		130 [35]		10 [24]		7 [43]	20 [43]	77 [35]	

Tabelle 48 Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Frankreich und UK)

voraussichtliche Importeure	USA						Italien			
Jahr	2030		2040		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	333 [74]	k.A	666 [74]	k.A	1665 [74]	2468 [72]	23,31 [39]	k.A	316,35 [44]	k.A
Bedarf [Mt]	10 [74]	k.A	20 [74]	k.A	50 [74]	74,11 [72]	0,7 [39]	k.A	9,5 [44]	k.A
Importbedarf [TWh]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	83,25 [106]	382,95 [106]
Importbedarf [Mt]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	2,5 [106]	11,5 [106]
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	5 [39]		k.A	k.A

Tabelle 49 Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: USA und Italien)

voraussichtliche Importeure	Türkei						China			
Jahr	2030		2035		2053		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	3,33 [84]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	1165,5 [52]	1332 [45]	1998 [52]	6660 [45]
Bedarf [Mt]	0,1 [84]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	35 [52]	40 [45]	60 [52]	200 [45]
Importbedarf [TWh]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A
Importbedarf [Mt]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	2 [84]		5 [84]		70 [84]		100 [4]	258 [1]	1248 [96]	

Tabelle 50 Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Türkei und China)

voraussichtliche Exporteure	Chile						Marokko					
Jahr	2030		2040		2050		2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	3,6 [88]	8,4 [88]	22 [88]	41 [88]	39,2 [88]	77,6 [88]
Bedarf [Mt]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	0,11 [88]	0,25 [88]	0,66 [88]	1,23 [88]	1,18 [88]	2,33 [88]
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	25 [65]		130 [65]		190 [65]		3 [56]		14 [56]		k.A	k.A
mögliche Exportmengen [TWh]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	10,3 [88]	21,7 [88]	45,9 [88]	91,8 [88]	114,7 [88]	229,5 [88]
mögliche Exportmengen [Mt]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	0,31 [88]	0,65 [88]	1,38 [88]	2,76 [88]	3,44 [88]	6,89 [88]

Tabelle 51 Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Chile und Marokko)

voraussichtliche Exporteure	Australien				Kanada			
Jahr	2030		2040		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	9,99 [46]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	682,65 [98]
Bedarf [Mt]	0,3 [46]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	20,5 [98]
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	50 [46]		k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A
mögliche Exportmengen [TWh]	89,91 [46]	k.A	500 [6]	k.A	33,3 [17]	83,25 [17]	83,25 [17]	1165,5 [98]
mögliche Exportmengen [Mt]	2,7 [46]	k.A	15,02 [6]	k.A	1 [17]	2,5 [17]	2,5 [17]	35 [98]

Tabelle 52 Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Australien und Kanada)

voraussichtliche Exporteure	Niederlande				Norwegen			
Jahr	2030		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	42 [61]	70 [61]	64,72 [55]	128,61 [55]	k.A	k.A	k.A	k.A
Bedarf [Mt]	1,26 [61]	2,1 [61]	1,94 [55]	3,86 [55]	k.A	k.A	k.A	k.A
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	3 [40]	4 [40]	k.A	k.A	2 [59]		70 [35]	
mögliche Exportmengen [TWh]	k.A	k.A	k.A	5,55 [55]	k.A	k.A	270 [35]	360 [35]
mögliche Exportmengen [Mt]	k.A	k.A	k.A	0,17 [55]	k.A	k.A	8,11 [35]	10,81 [35]

Tabelle 53 Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Niederlande und Norwegen)

voraussichtliche Exporteure	Argentinien				Spanien			
Jahr	2030		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	0,67 ^[5]	k.A	33,3 ^[90]	k.A	4,33 ^[27]	k.A	k.A	k.A
Bedarf [Mt]	0,02 ^[5]	k.A	1 ^[90]	k.A	0,13 ^[27]	k.A	k.A	k.A
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	1 ^[5]	2 ^[5]	30 ^[5]		11 ^[22]		120 ^[35]	
mögliche Exportmengen [TWh]	9,32 ^[5]	k.A	133,2 ^[90]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A
mögliche Exportmengen [Mt]	0,28 ^[5]	k.A	4 ^[90]	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A

Tabelle 54 Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Argentinien und Spanien)

voraussichtliche Exporteure	UAE						Süd Afrika			
Jahr	2031		2040		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	69,93 ^[64]	k.A	166,5 ^[64]	k.A	336,33 ^[64]	k.A	33,3 ^[42]	66,6 ^[42]	126,54 ^[42]	233,1 ^[42]
Bedarf [Mt]	2,1 ^[64]	k.A	5 ^[64]	k.A	10,1 ^[64]	k.A	1 ^[42]	2 ^[42]	3,8 ^[42]	7 ^[42]
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	k.A	k.A	50 ^[64]		145 ^[64]		10 ^[69]		15 ^[69]	
mögliche Exportmengen [TWh]	19,98 ^[64]	59,94 ^[64]	83,25 ^[64]	183,15 ^[64]	159,84 ^[64]	319,68 ^[64]	k.A	k.A	66,6 ^[42]	233,1 ^[42]
mögliche Exportmengen [Mt]	0,6 ^[64]	1,8 ^[64]	2,5 ^[64]	5,5 ^[64]	4,8 ^[64]	9,6 ^[64]	k.A	k.A	2 ^[42]	7 ^[42]

Tabelle 55 Länderübersicht: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: UAE und Süd Afrika)

4.4 Szenarien der Länderübersicht

Die folgenden Tabellen bilden die Ergebnisse der erzeugten Szenarien tabellarisch ab. Die Quellen der Literaturwerte sind in den Tabellen der Länderübersicht dargestellt. Die Farbskala gibt den zur Berechnung der Werte verwendeten Basisfaktor oder das jeweilige Verfahren an.

4.4.1 Länderübersicht: Szenario-DEU

Basisfaktoren des Szenarios-DEU				
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarfsquotient [B]:	1,37		7,27	
Bedarf-Import-Faktor [F]:	0,50	0,70	0,50	0,50

Tabelle 56 Basisfaktoren des Szenario-DEU

Farbskala des Szenario-DEU	
Literaturwert	
Differenzverfahren	
Kapazitätsverfahren	
Bedarfsquotient [B]	
Bedarf-Import-Faktor [F]	

Tabelle 57 Farbskala des Szenario-DEU

voraussichtliche Importeure	Deutschland				Japan					
Jahr	2030		2050		2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	95,00	130,00	110,00	800,00	100,00	137,00	400,00	548,00	666,00	706,00
Bedarf [Mt]	2,85	3,90	3,30	24,02	3,00	4,11	12,00	16,46	20,00	21,20
Importbedarf [TWh]	47,50	91,00	55,00	400,00	10,00	95,90	68,00	383,60	333,00	353,00
Importbedarf [Mt]	1,43	2,73	1,65	12,01	0,30	2,88	2,04	11,52	10,00	10,60
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	10		50	80	20		60		65	

Tabelle 58 Länderübersicht: Szenario-DEU: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Deutschland und Japan)

voraussichtliche Importeure	Süd-Korea				EU			
Jahr	2030		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	129,87	177,92	899,10	6536,46	666,00	912,42	2000,00	14540,00
Bedarf [Mt]	3,90	5,34	27,00	196,29	20,00	27,40	60,06	436,64
Importbedarf [TWh]	66,60	124,54	762,57	3268,23	333,00	638,69	1000,00	7270,00
Importbedarf [Mt]	2,00	3,74	22,90	98,15	10,00	19,18	30,03	218,32
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	15		590		40		500	

Tabelle 59 Länderübersicht: Szenario-DEU: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Süd-Korea und EU)

voraussichtliche Importeure	Frankreich				UK					
Jahr	2030		2050		2030		2035		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	22,64	31,02	63,00	178,00	14,00	186,67	80,00	140,00	250,00	460,00
Bedarf [Mt]	0,68	0,93	1,89	5,35	0,42	5,61	2,40	4,20	7,51	13,81
Importbedarf [TWh]	11,32	21,71	16,65	89,00	7,00	130,67	40,00	98,00	125,00	230,00
Importbedarf [Mt]	0,34	0,65	0,50	2,67	0,21	3,92	1,20	2,94	3,75	6,91
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	6,5		130		10		7	20	77	

Tabelle 60 Länderübersicht: Szenario-DEU: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Frankreich und UK)

voraussichtliche Importeure	USA						Italien			
Jahr	2030		2040		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	333,00	456,21	666,00	912,42	1665,00	2468,00	23,31	31,93	316,35	765,90
Bedarf [Mt]	10,00	13,70	20,00	27,40	50,00	74,11	0,70	0,96	9,50	23,00
Importbedarf [TWh]	166,50	319,35	333,00	638,69	832,50	1234,00	11,66	22,35	83,25	382,95
Importbedarf [Mt]	5,00	9,59	10,00	19,18	25,00	37,06	0,35	0,67	2,50	11,50
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	30		60		225		5		70	

Tabelle 61 Länderübersicht: Szenario-DEU: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: USA und Italien)

voraussichtliche Importeure	Türkei						China			
Jahr	2030		2035		2053		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	3,33	4,56	7,00	93,33	98,00	784,00	1165,50	1332,00	1998,00	6660,00
Bedarf [Mt]	0,10	0,14	0,21	2,80	2,94	23,54	35,00	40,00	60,00	200,00
Importbedarf [TWh]	1,67	3,19	3,50	65,33	49,00	392,00	582,75	932,40	999,00	3330,00
Importbedarf [Mt]	0,05	0,10	0,11	1,96	1,47	11,77	17,50	28,00	30,00	100,00
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	2		5		70		100	258	1248	

Tabelle 62 Länderübersicht: Szenario-DEU: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Türkei und China)

4.4.2 Korrektur der Länderübersicht: Szenario-DEU

Im Folgenden werden Werte der Länder tabellarisch dargestellt, welche durch die Korrektur des Szenario-DEU verändert wurden.

Korrektur: Basisfaktoren des Szenarios-DEU				
Jahr	2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.
Bedarfsquotient [B]:	1,37		2,97	
Bedarf-Import-Faktor [F]:	0,50	0,70	0,50	0,50

Tabelle 63 Korrektur des Szenarios-DEU: Basisfaktoren des Szenarios-DEU

Korrektur: Farbskala des Szenario-DEU	
Literatur Wert	
Differenzverfahren	
Kapazitätsverfahren	
Bedarfsquotient [B]	
Bedarf-Import-Faktor [F]	
Korrekturfaktor [K]:	

Tabelle 64 Korrektur des Szenarios-DEU: Farbskala des Szenario-DEU

voraussichtlicher Importeur	Süd-Korea				EU			
Jahr	2030		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	129,87	177,92	899,10	2670,33	666,00	912,42	2000,00	5940,00
Bedarf [Mt]	3,90	5,34	27,00	80,19	20,00	27,40	60,06	178,38
Importbedarf [TWh]	66,60	124,54	762,57	1335,17	333,00	638,69	1000,00	2970,00
Importbedarf [Mt]	2,00	3,74	22,90	40,10	10,00	19,18	30,03	89,19
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	15		210		40		500	

Tabelle 65 Korrektur des Szenarios-DEU: Länderübersicht: voraussichtliche Importeure (Ausschnitt: Süd-Korea und EU)

4.4.3 Länderübersicht: Szenario-CHL

Basisfaktoren des Szenarios-CHL			
Jahr	2030	2040	2050
Bedarfsfaktor [D]	0,40	0,30	0,27
Exportfaktor [E]	0,60	0,70	0,73

Tabelle 66 Basisfaktoren des Szenarios-CHL

Farbskala des Szenario-CHL	
Literatur Wert	
Bedarfsfaktor [D]	
Exportfaktor [E]	
Gesamtproduktionsverfahren/ Wert aus der Tabelle XXX	
Summenverfahren	

Tabelle 67 Farbskala des Szenarios-CHL

voraussichtliche Exporteure	Chile						Marokko					
	2030		2040		2050		2030		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	7,00	56,00	27,30	218,40	35,91	287,28	3,60	8,40	22,00	41,00	39,20	77,60
Bedarf [Mt]	0,21	1,68	0,82	6,56	1,08	8,63	0,11	0,25	0,66	1,23	1,18	2,33
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	25,00		130,00		190,00		3,00		14,00		55,00	
mögliche Exportmengen [TWh]	10,50	84,00	63,70	509,60	97,09	776,72	10,30	21,70	45,90	91,80	114,70	229,50
mögliche Exportmengen [Mt]	0,32	2,52	1,91	15,30	2,92	23,32	0,31	0,650	1,38	2,76	3,44	6,89

Tabelle 68 Länderübersicht: Szenario-CHL: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Chile und Marokko)

voraussichtliche Exporteure	Australien				Kanada			
Jahr	2030		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	9,99	112,00	184,93	1496,88	22,20	55,50	30,79	682,65
Bedarf [Mt]	0,30	3,36	5,55	44,95	0,67	1,67	0,92	20,50
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	50,00		990,00		25,00		335,00	
mögliche Exportmengen [TWh]	89,91	168,00	500,00	4047,12	33,30	83,25	83,25	1165,50
mögliche Exportmengen [Mt]	2,70	5,05	15,02	121,54	1,00	2,50	2,50	35,00

Tabelle 69 Länderübersicht: Szenario-CHL: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Australien und Kanada)

voraussichtliche Exporteure	Niederlande				Norwegen			
Jahr	2030		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	42,00	70,00	64,72	128,61	0,56	4,48	99,86	133,15
Bedarf [Mt]	1,26	2,10	1,94	3,86	0,02	0,13	3,00	4,00
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	4,00		25,00		2,00		70,00	
mögliche Exportmengen [TWh]	63,00	105,00	174,98	5,55	0,84	6,72	270,00	360,00
mögliche Exportmengen [Mt]	1,89	3,15	5,25	0,17	0,03	0,2	8,11	10,81

Tabelle 70 Länderübersicht: Szenario-CHL: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Niederlande und Norwegen)

voraussichtliche Exporteure	Argentinien				Spanien			
Jahr	2030		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	0,67	4,48	33,30	45,36	4,33	24,64	22,68	181,44
Bedarf [Mt]	0,02	0,13	1,00	1,36	0,13	0,74	0,68	5,45
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	2,00		30,00		11,00		120,00	
mögliche Exportmengen [TWh]	9,32	6,72	133,20	122,64	6,50	36,96	61,32	490,56
mögliche Exportmengen [Mt]	0,28	0,2	4,00	3,68	0,20	1,1	1,84	14,73

Tabelle 71 Länderübersicht: Szenario-CHL: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Argentinien und Spanien)

voraussichtliche Exporteure	UAE						Süd Afrika			
Jahr	2031		2040		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	69,93	39,96	166,50	78,49	336,33	118,24	33,30	66,60	126,54	233,10
Bedarf [Mt]	2,10	1,20	5,00	2,36	10,10	3,55	1,00	2,00	3,80	7,00
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	20,00		50,00		145,00		10,00		15,00	
mögliche Exportmengen [TWh]	19,98	59,94	83,25	183,15	159,84	319,68	49,95	99,90	66,60	233,10
mögliche Exportmengen [Mt]	0,60	1,80	2,50	5,50	4,80	9,60	1,50	3,00	2,00	7,00

Tabelle 72 Länderübersicht: Szenario-CHL: voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: UAE und Süd Afrika)

4.4.4 Korrektur der Länderübersicht: Szenario-CHL

Im Folgenden werden Werte der Länder tabellarisch dargestellt, welche durch die Korrektur des Szenario-CHL verändert wurden. Die Farbskala gibt den zur Berechnung der Werte verwendeten Basisfaktor oder das jeweilige Verfahren an.

Korrektur: Basisfaktoren des Szenarios-CHL						
voraussichtliche Exporteure	Niederlande	Argentinien		UAE		
Jahr	2050	2030	2050	2031	2040	2050
Korrekturbedarfsfaktor [B _K]	0,96	0,07	0,20	0,78	0,67	0,68
Korrekturexportfaktor [E _K]	0,04	0,93	0,80	0,22	0,33	0,32

Tabelle 73 Korrektur des Szenarios-CHL: Basisfaktoren des Szenarios-CHL

Korrektur: Farbskala des Szenario-CHL	
Literatur Wert	
Bedarfsfaktor [D]	
Exportfaktor [E]	
Gesamtproduktionsverfahren/ Wert aus der Tabelle XXX	
Summenverfahren	
Korrekturbedarfsfaktor [B _K]	
Korrekturexportfaktor [E _K]	

Tabelle 74 Farbskala nach Korrektur des Szenarios-CHL

voraussichtliche Exporteure	Niederlande				Argentinien			
Jahr	2030		2050		2030		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	42,00	70,00	64,72	128,61	0,67	0,78	33,30	33,60
Bedarf [Mt]	1,26	2,10	1,94	3,86	0,02	0,02	1,00	1,01
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	4		25		2		30	
mögliche Exportmengen [TWh]	63,00	105,00	2,70	5,55	9,32	10,42	133,20	134,40
mögliche Exportmengen [Mt]	1,89	3,15	0,08	0,17	0,28	0,3	4,00	4,04

Tabelle 75 Korrektur der Länderübersicht: Szenario-CHL voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: Niederlande und Argentinien)

voraussichtliche Exporteure	UAE					
Jahr	2031		2040		2050	
min./max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bedarf [TWh]	69,93	212,51	166,50	371,85	336,33	679,32
Bedarf [Mt]	2,10	6,38	5,00	11,17	10,10	20,40
voraussichtliche Elektrolysekapazitäten [GW]	50		50		145	
mögliche Exportmengen [TWh]	19,98	59,94	83,25	183,15	159,84	319,68
mögliche Exportmengen [Mt]	0,60	1,80	2,50	5,50	4,80	9,60

Tabelle 76 Korrektur der Länderübersicht: Szenario-CHL voraussichtliche Exporteure (Ausschnitt: UAE)

4.5 Bestimmung der Beeinflussung des Wasserhaushaltes u.a. auch durch die örtliche Verschiebung

Wasser spielt eine zentrale Rolle bei der Herstellung und Nutzung von Wasserstoff und seinen Derivaten. Beim Herstellungsprozess von Wasserstoff, mittels Elektrolyse, wird Wasser als Reaktant eingesetzt und durch die Aufspaltung der Sauerstoff – Wasserstoff Verbindung (H_2O) verbraucht. Bei der energetischen Nutzung von Wasserstoff wird eine Reaktion mit Sauerstoff verursacht, wodurch Wasser als Produkt der Reaktion entsteht.

Dies bedeutet, dass für den Herstellungsprozess mittels Elektrolyse, Wasser aufgewendet werden muss und die energetische Nutzung von Wasserstoff zu einer Gewinnung von Wasser führt. Im Umkehrschluss wird somit bei einem Handel mit Wasserstoff und seinen Derivaten ein indirekter Handel mit Wasser durchgeführt, da es zu einer örtlichen Verschiebung der aufgewendeten Wassermengen kommt.

Die ökologischen und sozialen Auswirkungen der Wasserentnahme, zur Herstellung von Wasserstoff, hängen davon ab, welcher Quelle das Wasser entstammt, sowie dem Verhältnis der verbrauchten Menge zu der zur Verfügung stehenden Menge an Wasser. In Ländern und Regionen, die bereits von Wasserknappheit betroffen sind oder aber infolge des Klimawandels davon betroffen sein werden, könnte ein zusätzlicher Wasserverbrauch durch die Wasserstoffherstellung problematisch werden. Gerade die Länder, welche zu den Vorzugsregionen für eine Wasserstoffproduktion gehören, leiden bereits heute unter Wassermangel. Ebenfalls ist davon auszugehen, dass sich diese Lage in Zukunft verschärfen wird. Gründe hierfür sind beispielsweise steigende Bevölkerungszahlen, sowie zunehmender Verzehr tierischer Produkte. Es ist schwer abzuschätzen, in welcher Form die Produktion grünen Wasserstoffs negative Auswirkungen auf die allgemeine Wasserversorgung in einer Region haben wird, da es ebenfalls denkbar ist, dass durch die Wasserstoffproduktion getriebenen Investitionen in die Wasserinfrastruktur zu einer Verbesserung der regionalen Versorgungssituation führen kann [86]; [58].

Des Weiteren könnte die in Zukunft zurückgekehrte Nutzung fossiler Energieträger in einigen Ländern, zu einem insgesamt sinkenden Wasserbedarf führen, wodurch der Wasserverbrauch der Wasserstoffherstellung keine erheblichen Auswirkungen auf den jeweiligen Wasserhaushalt haben könnte [54].

Die Wasserbereitstellung durch Meerwasserentsalzung ist ein Lösungsansatz, welcher bereits in Regionen mit Wasserarmut genutzt wird, um dieser entgegenzuwirken. Weltweit sind mehr als 20.000 Entsalzungsanlagen in mehr als 170 Ländern in Betrieb [14]. Das durch die Meerwasserentsalzung gewonnene Wasser erweitert das Dargebot an nutzbarem Wasser in einer Region und hat somit das Potential andere Wasserquellen zu entlasten. Aber auch diese Art der Wassergewinnung bringt aktuell Umweltbelastungen mit sich. So ist das Verfahren der

Meerwasserentsalzung energieintensiv, was je nach Energiequelle zu weiteren Treibhausgasen führen kann. Aber auch die Sole, ein hochkonzentrierter salzhaltiger Meerwasserrest, welcher durch die Entsalzung des Meerwassers entsteht, kann je nach Verwendung zu erheblichen Umweltauswirkungen führen [21].

Bei der Nutzung von Wasserstoff und der damit verbundenen Gewinnung von Wasser, müssen unterschiedliche Gesichtspunkte betrachtet werden. So kann das gewonnene Wasser beispielsweise als Abgas in die Atmosphäre abgegeben werden, oder in weiteren industriellen Prozessen genutzt werden.

Im UN-Bericht zur menschlichen Entwicklung von 2006 wird geschrieben:

„Die Knappheit, die den Kern der globalen Wasserkrise ausmacht, hat ihre Grundursachen jedoch in den Machtverhältnissen, in Armut und Ungleichheit, nicht in der tatsächlichen Verfügbarkeit von Wasser“ [25].

Diese Aussage zeigt, dass nicht die verfügbare Menge an Wasser das Problem ist, sondern viel mehr die ungerechte Verteilung der Ressource Wasser. Daher ist ein Handel mit Wasserstoff, welcher bereits als indirekter Wasserhandel identifiziert wurde, kritisch zu betrachten. Der Handel hat das Potential diese ungerechte Verteilung weiter zu verschärfen.

Im weiteren Verlauf wird anhand eines Fallbeispiels untersucht, welche Wassermengen im Zuge einer Handelskette aufgewendet oder gewonnen werden, wie diese im Verhältnis zu anderen Verbrauchern stehen und welche Auswirkungen diese auf die jeweiligen Regionen haben könnten.

Es werden lediglich die Wassermengen berücksichtigt, welche für den Herstellungsprozess von Wasserstoff mittels Elektrolyse aufgewendet werden und die Mengen, welche durch die energetische Nutzung des Wasserstoffs entstehen. Die Wassermengen, die beispielsweise für die Bereitstellung der Prozessenergie aufgewendet werden, werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

4.5.1 Fallbeispiel: Wasserstoffhandel zwischen Chile und Deutschland

Für die Ermittlung der nachfolgenden Wasserbedarfsmengen wurden folgende Werte verwendet.

Formelzeichen	Ermittlung der Wasserbedarfsmenge		Einheit
X_T	Theoretischer Wasserbedarf	8,94	[L/Kg _{H2}]
X_R	Realer Wasserbedarf (min./max.)	min.	max.
	PEM + 20 %	14,28	18,6 [L/Kg _{H2}]
	AEL + 20 %	12,12	14,28 [L/Kg _{H2}]
	HTEL + 20 %	19,20	k.A. [L/Kg _{H2}]
X_{H2}	Wasserstoffmengen	-	[Mt]
W_T	Theoretische Wasserbedarfsmenge	-	[L]
W_R	Reale Wasserbedarfsmenge	-	[L]

Tabelle 77 Übersicht der Ermittlung der Wasserbedarfsmenge

Wasserbedarfswerte nach Technologie [L/Kg _{H2}]		
$X_{Rmin.}$	$X_{Rmax.}$	X_T
12,14	19,53	8,94

Tabelle 78 Übersicht der Wasserbedarfswerte nach Technologie

Wie im vorherigen Abschnitt: „Untersuchung der perspektivischen Wasserstoffbedarfsmengen in Importländer“ bereits erarbeitet, hat Deutschland in den Jahren 2030 und 2050 einen Wasserstoffbedarf, welcher durch eine inländische Produktion nicht mehr gedeckt werden kann. Für das Jahr 2030 wurde daher eine potenzielle Importbedarfsmenge von 1,43 bis 2,73 Mt H₂ ermittelt. Für das Jahr 2050 lag diese Menge bei 1,65 bis 12,01 Mt H₂.

Im Abschnitt: „4.2 Untersuchung der perspektivischen Wasserstoffproduktionspotentiale in Exportländern“ wurde Chile als möglicher Exporteur von Wasserstoff und seinen Derivaten identifiziert. Mit einer geplanten Verteilung der Wasserstoffproduktion von ca. 30 % für den eigenen Bedarf, ca. 70 % für den Export [65] und einem prognostiziertem Gesamt-Produktionspotential von bis zu 160 Mt H₂/Jahr laut IEA [48], besitzt Chile genügend Potential, um den gesamten Importbedarf Deutschlands decken zu können.

Für dieses Fallbeispiel wird angenommen, dass Chile Deutschland mit der gesamten Importbedarfsmenge, der Jahre 2030 und 2050, versorgt.

Mithilfe des ermittelten Wasserbedarfs nach eingesetzter Technologie wurden die Wassermenge bestimmt, welche Chile aufwenden muss, um die geforderten Mengen an Wasserstoff zu produzieren, sowie die Menge an Wasser, welche Deutschland durch die Wasserstoff Nutzung gewinnt (siehe Tabelle 79).

Ermittelte Wassermengen [L]				
Jahr	$W_{T_{min.}}$	$W_{T_{max.}}$	$W_{R_{min.}}$	$W_{R_{max.}}$
2030	1,28E+10	2,44E+10	1,73E+10	5,34E+10
2050	1,48E+10	1,07E+11	2,01E+10	2,35E+11

Tabelle 79 Übersicht der ermittelten Wassermengen

Die zu betrachtenden Wassermengen für die Produktion, sind die realen Wasserbedarfsmengen (W_R). Die Wassermengen, die durch die Nutzung entstehen, sind die theoretischen Wasserbedarfsmengen (W_T).

Wie bereits zuvor erwähnt, müssen die Wassermengen in ein Verhältnis gesetzt werden, um ihre Auswirkungen auf die regionalen Wasserhaushalte zu beurteilen.

Die folgenden Abbildungen 80 und 81 zeigen das Wasserdargebot, sowie die prozentualen Anteile der aufgewendeten oder gewonnenen Wassermenge am jeweiligen Wasserdargebot in Chile und Deutschland. Hierbei wurden die Dargebotsmengen von 2020 verwendet. Auch für die Folgejahre 2030 und 2050 wurden diese Werte, aus Mangel an Daten, verwendet.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich die dargebotenen Wassermengen im Zuge des Klimawandels in den nächsten Jahren verändern werden. Diese Veränderungen weisen regionale Unterschiede auf, welche im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet werden [29].

Prozentualer Anteil der untersuchten Wassermengen am Wasserdargebot in Deutschland	
Wasserdargebot in Deutschland [L]	
1,76E+14 [102]	
2030	2050
prozentualer Anteil am Dargebot (Real min.) [%]	
0,0098%	0,0114%
prozentualer Anteil am Dargebot (Real max.) [%]	
0,0303%	0,1333%
prozentualer Anteil am Dargebot (Theoretisch min.) [%]	
0,0072%	0,0084%
prozentualer Anteil am Dargebot (Theoretisch max.) [%]	
0,0139%	0,0610%

Tabelle 80 Prozentualer Anteil der untersuchten Wassermengen am Wasserdargebot in Deutschland

Prozentualer Anteil der untersuchten Wassermengen am Wasserdargebot in Chile	
Wasserdargebot in Chile [L]	
9,23E+14 [77]	
2030	2050
prozentualer Anteil am Dargebot (Real min.) [%]	
0,0019%	0,0022%
prozentualer Anteil am Dargebot (Real max.) [%]	
0,0058%	0,0254%
prozentualer Anteil am Dargebot (Theoretisch min.) [%]	
0,0014%	0,0016%
prozentualer Anteil am Dargebot (Theoretisch max.) [%]	
0,0026%	0,0116%

Tabelle 81 Prozentualer Anteil der untersuchten Wassermengen am Wasserdargebot in Chile

4.5.1.1 Deutschland

In Tabelle 80 ist zu erkennen, dass das durch den Handel von Wasserstoff importierte Wasser in Deutschland einen minimalen Anteil von 0,0072 % und einen maximalen Anteil von 0,061 % des deutschen Wasserdargebotes aufweist. Dies ist ein erster Indikator dafür, dass der Einfluss der importierten Wassermenge auf den gesamten deutschen Wasserhaushalt vermutlich gering ist. Die Betrachtung des Wasserverbrauchs nach Sektoren, sowie der jeweilige prozentuale Anteil am Wasserdargebot, ermöglicht ein Mengenvergleich mit der, durch die energetische Nutzung von Wasserstoff, gewonnene Wassermenge. (Siehe Tabellen 82 und 83). Hier ist zu erkennen, dass die gewonnene Wassermenge zwar im Verhältnis zum Dargebot gering, jedoch nicht zu vernachlässigen ist. Im Jahr 2030 könnte die theoretische Maximalmenge an importiertem Wasser bis zu 6,1 % des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs in Deutschland decken. Im Jahr 2050 wären sogar bis zu 26,85 % möglich.

Wasserverbrauch nach Sektoren in Deutschland [102]			
Sektoren	[L]	[%]	Prozentualer Anteil am Dargebot [%]
Energieversorger	8,80E+12	44,20%	5,00%
Bergbau und verarbeitendes Gewerbe	5,40E+12	26,80%	3,07%
Öffentliche Wasserversorgung	5,40E+12	26,80%	3,07%
Landwirtschaft	4,00E+11	2,20%	0,23%

Tabelle 82 Wasserverbrauch nach Sektoren in Deutschland

Prozentualer Anteil der importierten Wassermengen an Verbrauchermengen				
Sektoren	2030		2050	
	Theoretisch (min.)	Theoretisch (max.)	Theoretisch (min.)	Theoretisch (max.)
Energieversorger	0,145%	0,278%	0,17%	1,22%
Bergbau und verarbeitendes Gewerbe	0,236%	0,452%	0,27%	1,99%
Öffentliche Wasserversorgung	0,236%	0,452%	0,27%	1,99%
Landwirtschaft	3,188%	6,108%	3,69%	26,85%

Tabelle 83 Prozentualer Anteil der importierten Wassermengen an Verbrauchermengen

Die Auswirkungen auf den deutschen Wasserhaushalt sind von vielen Faktoren abhängig. Da davon auszugehen ist, dass die gewonnenen Mengen über den Zeitraum eines Jahres und über mehrere Standorte verteilt gewonnen werden, ist anzunehmen, dass der Einfluss auf den gesamten Wasserhaushalt Deutschlands als eher gering einzuschätzen ist. Ebenfalls ist die Nutzung des importierten Wassers zu berücksichtigen.

Diese obliegt den jeweiligen Wasserstoffverbrauchern und ist aller Voraussicht nach von Standort und Industrie abhängig. So ist die weitere Nutzung der Ressource Wasser in industriellen Prozessen, aber auch die bloße Abscheidung des Wassers möglich.

4.5.1.1.1 Wassermengenbetrachtung auf Bundesländerebene

Basierend auf der Annahme, dass der industrielle Wasserstoffverbrauch den größten Anteil am Gesamtverbrauch Deutschlands darstellt und der daraus resultierenden Schlussfolgerung, dass die importierten Wassermengen, abhängig von der Industriedichte, zur Verfügung stehen, wird im Folgenden die Industriedichte auf Bundesländerebene genauer untersucht.

Betrachtet man die Anzahl an Industrieunternehmen nach Bundesländern, welche in Abb.6 dargestellt werden, so lassen sich bereits erste Abschätzungen darüber treffen, welche Bundesländer den größten Wasserimport durch Wasserstoffnutzung haben werden. Die Länder Bayern und Nordrhein-Westfalen weisen mit ca. 70.000 und ca. 62.000 Industrieunternehmen die meisten Unternehmen pro Bundesland auf, gefolgt von Baden-Württemberg mit ca. 52.000 und Niedersachsen mit ca. 28.000 Industrieunternehmen. Die anderen Bundesländer weisen verhältnismäßig wenig Industrieunternehmen auf und liegen größtenteils unter 10.000 Industrieunternehmen pro Bundesland. Basierend auf den in Abb.6 angegebenen Zahlen, kann davon ausgegangen werden, dass die zuvor genannten Bundesländer den größten Teil der importierten Wassermenge, zur Verfügung haben werden.

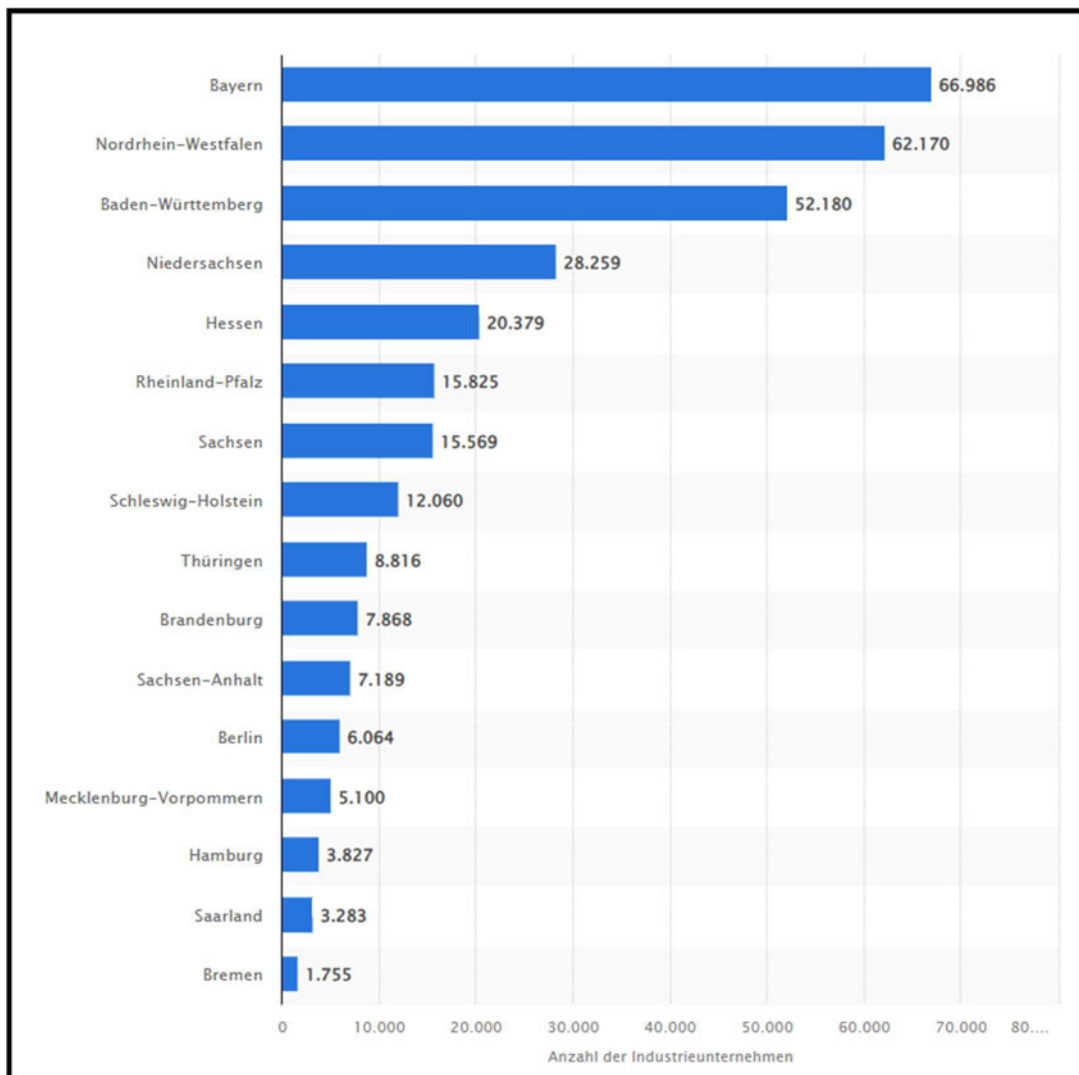


Abbildung 6 Anzahl der Industrieunternehmen in Deutschland nach Bundesländern im Jahr 2022 [94]

Betrachtet man den Wassereinsatz der Wirtschaftszweige und privaten Haushalte nach Bundesländern (siehe Anhang: Tabelle 95), so ist zu erkennen, dass die zuvor identifizierten Bundesländer nicht nur die meisten Industrieunternehmen vorweisen, sondern ebenfalls die höchsten Wasserverbräuche pro Bundesland aufzeigen.

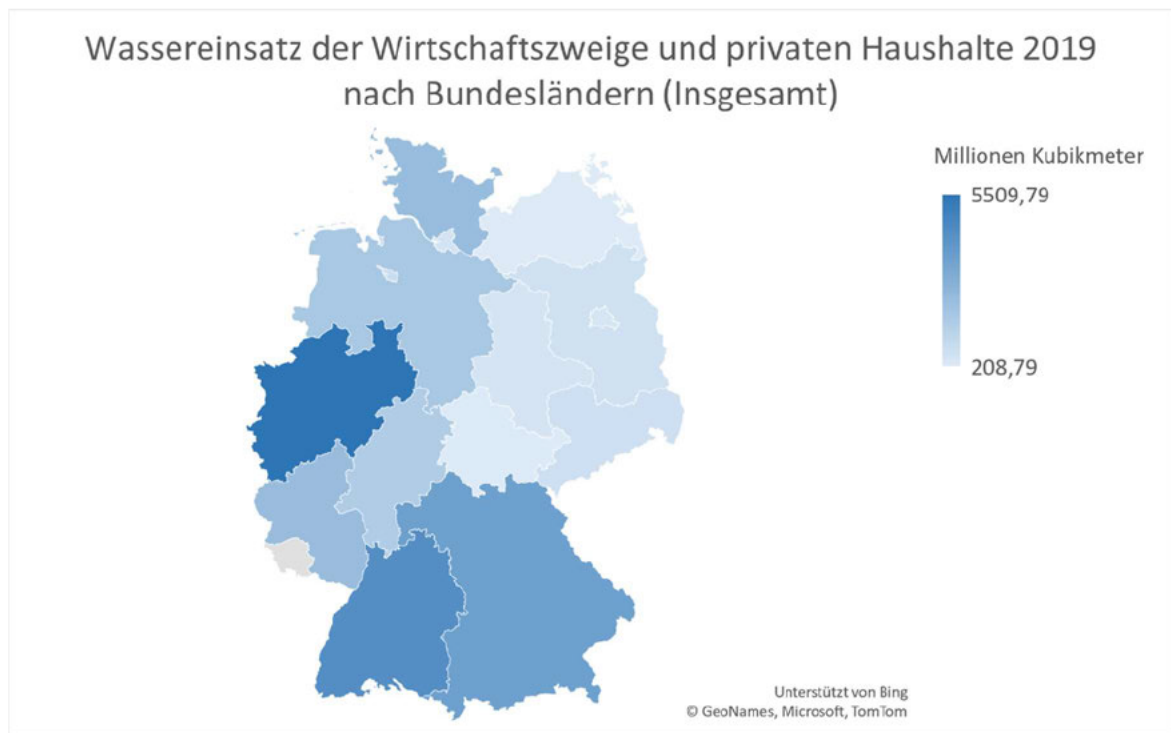


Abbildung 7 Grafische Darstellung der Daten aus Abb.6; Eigene Darstellung

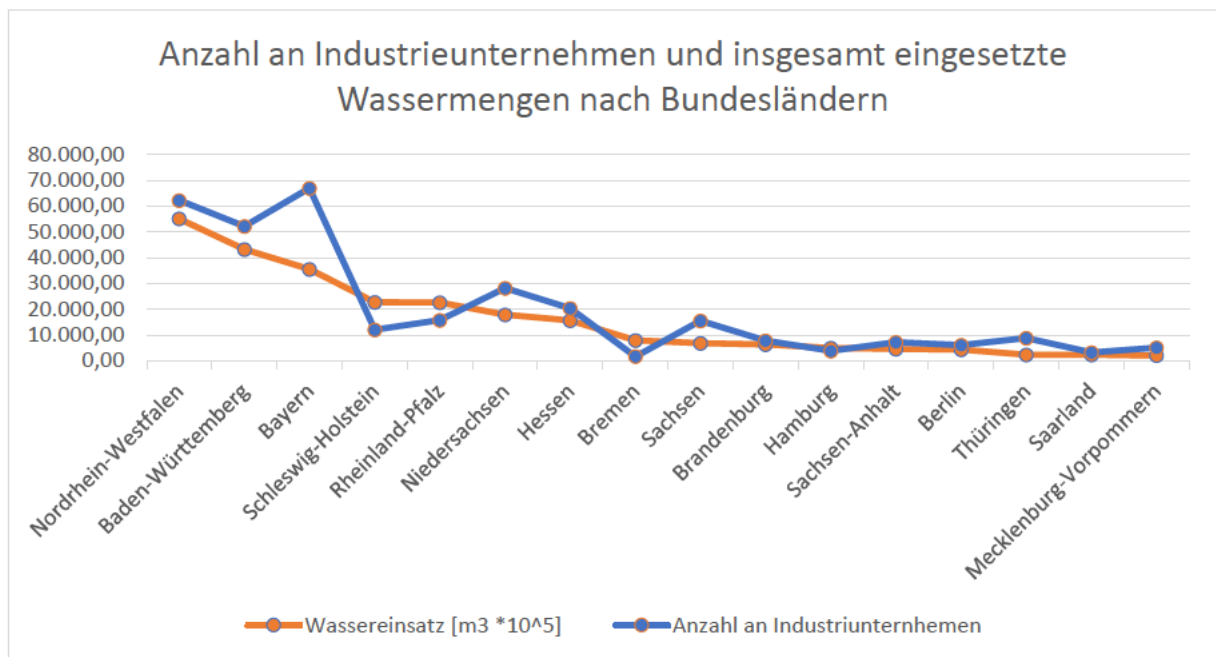


Abbildung 8 Anzahl an Industrieunternehmen und insgesamt eingesetzte Wassermengen nach Bundesländern; Eigene Darstellung

In Abbildung 8 ist ein klarer Zusammenhang zwischen der Anzahl an Industrieunternehmen und dem Wassereinsatz nach Bundesländern zu erkennen.

Zur weiteren Visualisierung und Einschätzung der Wassermengen, diese auf drei Arten auf die jeweiligen Bundesländer aufgeteilt.

Bei der ersten Aufteilung wurden die gesamtimportierten Wassermengen jedem Bundesland zur Verfügung gestellt und mit den lokalen Wasserverbräuchen verglichen. Die maximal importierten Wassermengen von 2030 konnten bei dieser Aufteilung von 0,44 bis zu 11,7 % des Gesamt-Wasserverbrauchs einiger Bundesländer decken. Die maximale Wassermenge von 2050 sogar von 1,95 bis zu 51,43 %. Da es sich hierbei jedoch um eine unrealistische Aufteilung der importierten Wassermenge handelt, wurden weitere Aufteilungen durchgeführt.

Bei der zweiten Aufteilung wurde die importierte Wassermenge, abhängig vom Anteil an der Gesamtanzahl an Industrieunternehmen auf die jeweiligen Bundesländer aufgeteilt. Der Anteil der importierten Wassermenge am Gesamtwasserverbrauch fiel hierbei deutlich geringer aus als bei der ersten Aufteilung. So deckt die maximale Wassermenge für 2030 von 0,03 bis zu 0,3 % des gesamten Wasserverbrauchs der Bundesländer. Bei der maximalen Wassermenge für 2050 sind es 0,13 bis 1,34 %.

Bei der dritten Aufteilung wurden die importierten Wassermengen, abhängig vom Anteil am Gesamtwasserverbrauch auf die jeweiligen Bundesländer aufgeteilt. Die maximale Wassermenge von 2030 stellt hierbei 0,08 bis 0,11 % des gesamten Wasserverbrauchs der Bundesländer dar. Die maximale Wassermenge für 2050, 0,34 bis 0,51 %

Die Daten der Wasserverbräuche innerhalb der Bundesländer stammen hierbei aus dem Jahr 2019 [97]. Alle Ergebnisse dieser Aufteilungen sind in tabellarischer Form im Anhang zu finden (Siehe Tabelle 96-107).

Die Aufteilungen der Wassermengen hat gezeigt, dass es sich bei den importierten Wassermengen insgesamt um große Mengen handelt, diese jedoch bei einer Verteilung in ganz Deutschland, nur noch einen kleinen Anteil am lokalen Gesamtverbrauch darstellen.

Basierend auf der gewonnenen Erkenntnis, dass die industriestärksten Bundesländer voraussichtlich die größten Mengen an Wasser durch die Wasserstoffnutzung importieren werden und der Erkenntnis, dass diese Bundesländer ebenfalls die höchsten Wasserverbräuche aufweisen, lässt sich behaupten, dass die importierten Wassermengen keinen negativen, sondern eher einen positiven Effekt auf die jeweiligen Wasserhaushalte haben werden, da diese lokal zur Verfügung stehen und voraussichtlich auf kurzem Wege zu den Verbrauchern befördert werden können.

Betrachtet man zusätzlich die prognostizierten Folgen des Klimawandels auf lokale Wasserhaushalte, wie z.B. potenziell entstehende Wasserkonkurrenzen durch saisonale Dürren oder abnehmende Wasserqualität, so bekräftigt dies die Annahme, dass die durch die Wasserstoffnutzung importierten Wassermengen positive Effekte auf die jeweiligen Wasserhaushalte haben wird [101].

Letztendlich lassen sich jedoch keine genauen Aussagen über die Auswirkungen des importierten Wassers auf den Wasserhaushalt Deutschlands treffen. Der Mengenvergleich hat jedoch gezeigt, dass es sich um eine geringe, aber nicht unbedeutenden Menge an Wasser handelt. Für genauere Aussagen müssten einzelne Wasserstoffnutzer und Standorte identifiziert und genauer analysiert werden.

4.5.1.2 Chile

In Tabelle 81 ist zu erkennen, dass der Anteil des aufgewendeten Wassers, welches für die Produktion von Wasserstoff und seinen Derivaten aufgewendet werden muss, bei einem minimalen Anteil von 0,0019 % und einem maximalen Anteil von 0,0254 % des chilenischen Wasserdargebotes liegt. Bei Betrachtung dieser Anteile am Wasserdargebot ist zu erkennen, dass die betrachteten Wassermengen eine geringe Menge am Dargebot darstellen. Ein Vergleich mit den in den Tabellen 84 und 85 aufgeführten Verbrauchern und deren Wasserverbräuchen, zeigt jedoch, dass es sich bei der aufgewendeten Wassermenge um einen teilweise hohen Anteil der einzelnen Verbraucher handelt.

So könnte die maximal aufgewendete Wassermenge im Jahr 2050 ca. 18 % des kommunalen oder ca. 14 % des industriellen Wasserverbrauchs darstellen.

Wasserverbrauch nach Sektoren in Chile [76]			
Sektoren	[L]	[%]	Prozentualer Anteil am Dargebot [%]
Landwirtschaft	2,94E+13	91%	3,19%
Industrie	1,66E+12	5%	0,18%
Kommunal	1,29E+12	4%	0,14%

Tabelle 84 Wasserverbrauch nach Sektoren in Chile

Prozentualer Anteil der aufgewendeten Wassermengen an Verbrauchermengen				
Sektoren	2030		2050	
	Real (min.)	Real (max.)	Real (min.)	Real (max.)
Landwirtschaft	0,059%	0,181%	0,07%	0,80%
Industrie	1,043%	3,215%	1,21%	14,13%
Kommunal	1,342%	4,137%	1,55%	18,19%

Tabelle 85 Prozentualer Anteil der aufgewendeten Wassermengen an Verbrauchermengen

Chile weist einerseits ein hohes Dargebot an Wasser auf, andererseits ist es laut Water Stress Index des World Resources Institute auf Platz 18 aller Länder [107].

Ein Grund hierfür sind die politischen Rahmenbedingungen und die damit verbundene Verteilung der Ressource Wasser. Die Wasserversorgung in Chile ist beinahe zu hundert Prozent privatisiert, was weltweit einen einzigartigen Fall darstellt. Das verantwortliche Wasser-Gesetz ermöglicht die Vergabe von Nutzungsrechten auf unbegrenzte Dauer, wodurch sich die Ressource Wasser als frei handelbare Ware, unabhängig vom Landbesitz, in Besitz weniger Großunternehmer befindet. Diese ungerechte Verteilung ist ein Grund für die aktuelle Wassersituation in Chile [12]. Ein weiterer Grund ist der Klimawandel, durch den es in Chile zu einem Temperaturanstieg sowie eines drastischen Rückgangs der Niederschlagsmenge kam [47]. Es ist zu erwarten, dass sich die klimabedingten Auswirkungen auf den Wasserhaushalt weiter verschärfen werden.

Um die bereits belastete Wassersituation im Land nicht weiter zu verschärfen, sie im besten Fall sogar zu entlasten, plant die chilenische Regierung die Wasserversorgung zur Wasserstoffproduktion durch Meerwasserentsalzungsanlagen sicherzustellen [103]. Im weiteren Verlauf wird daher davon ausgegangen, dass der komplette Wasserbedarf an Wasser durch Meerwasserentsalzung gedeckt wird.

4.5.1.2.1 Betrachtung der Wasserbereitstellung durch Meerwasserentsalzung

Der Prozess der Meerwasserentsalzung ist ein energieintensiver Prozess, der weitere Energiekapazitäten beanspruchen wird, wodurch der Gesamtwasserverbrauch der Wasserstoffherstellung weiter steigen wird [70].

In Tabelle 86 sind die benötigten Meerwassermengen dargestellt.

Meerwasserbedarf zur Erzeugung der untersuchten Wassermengen durch Umkehrosmose				
Jahr	Theoretisch min.	Theoretisch max.	Real min.	Real max.
Wassermengen [m3]				
2030	1,28E+07	2,44E+07	1,73E+07	5,34E+07
2050	1,48E+07	1,07E+08	2,01E+07	2,35E+08
Meerwassermenge [m3]				
2030	3,04E+07	5,82E+07	4,12E+07	1,27E+08
2050	3,52E+07	2,56E+08	4,77E+07	5,59E+08
Meerwassermenge [L]				
2030	3,04E+10	5,82E+10	4,12E+10	1,27E+11
2050	3,52E+10	2,56E+11	4,77E+10	5,59E+11

Tabelle 86 Meerwasserbedarf zur Erzeugung der untersuchten Wassermengen durch Umkehrosmose

Stand März 2023 betrug die Anzahl an operierenden Meerwasserentsalzungsanlagen in Chile 22 Anlagen, mit einer Gesamtproduktionsleistung von 8200 Litern pro Sekunde [49]. Ermittelt man basierend darauf die durchschnittliche Leistung einer Anlage, so kommt man auf eine Leistung von 372,73 Litern pro Sekunde. Um den maximalen Wasserbedarf von 2030, zur Herstellung der untersuchten Wasserstoffmengen zu decken, müsste die bereits bestehenden Anlagen 179,4 Tage am Stück laufen. Für den maximalen Wasserbedarf von 2050 wären es 790,51 Tage. In den Tabellen 87 und 88 ist die Produktionsdauer der untersuchten Wassermengen für die theoretisch ermittelte Anlage und für die bestehenden Anlagen dargestellt. In den Tabellen ist deutlich zu erkennen, dass es sich um große Wassermengen handelt, für die es einen deutlichen Zubau an Entsalzungsanlagen benötigt, um diese in einem realistischen Zeitraum zu produzieren.

Produktionsdauer zur Produktion der untersuchten Wassermengen durch die vorhandenen Anlagen Chiles				
Anlagen Anzahl: 22				
Leistung [L/Sek.]: 8200				
Produktionsdauer [Sek.]				
betrachtete Wassermenge	Theoretisch min.	Theoretisch max.	Real min.	Real max.
2030	3,72E+06	7,09E+06	5,02E+06	1,55E+07
2050	4,29E+06	3,11E+07	5,84E+06	6,83E+07
Produktionsdauer [Tagen]				
betrachtete Wassermenge	Theoretisch min.	Theoretisch max.	Real min.	Real max.
2030	43,06	82,06	58,10	179,40
2050	49,65	359,95	67,59	790,51
Produktionsdauer [Jahre]				
betrachtete Wassermenge	Theoretisch min.	Theoretisch max.	Real min.	Real max.
2030	0,12	0,22	0,16	0,49
2050	0,14	0,99	0,19	2,17

Tabelle 87 Produktionsdauer zur Produktion der untersuchten Wassermengen durch die vorhandenen Anlagen Chiles

Produktionsdauer zur Produktion der untersuchten Wassermengen durch eine theoretische Anlage				
Anlagen Anzahl: 1				
Leistung [L/Sek.]: 372,73				
Produktionsdauer [Sek.]				
betrachtete Wassermenge	Theoretisch min.	Theoretisch max.	Real min.	Real max.
2030	8,18E+07	1,56E+08	1,11E+08	3,41E+08
2050	9,44E+07	6,84E+08	1,29E+08	1,50E+09
Produktionsdauer [Tagen]				
betrachtete Wassermenge	Theoretisch min.	Theoretisch max.	Real min.	Real max.
2030	946,76	1805,56	1284,72	3946,76
2050	1092,59	7916,67	1493,06	17361,11
Produktionsdauer [Jahre]				
betrachtete Wassermenge	Theoretisch min.	Theoretisch max.	Real min.	Real max.
2030	2,59	4,95	3,52	10,81
2050	2,99	21,69	4,09	47,56

Tabelle 88 Produktionsdauer zur Produktion der untersuchten Wassermengen durch eine theoretische Anlage

Da anzunehmen ist, dass Meerwasser in Chile unbegrenzt zur Verfügung steht, ist neben der Entsalzungskapazität die notwendige Energiemenge der limitierende Faktor. Die notwendigen Energiemengen zur Herstellung der untersuchten Wassermengen mittels Meerwasserentsalzung sind in Tabelle 89 dargestellt. Die für Chile relevanten Größen sind gelb hinterlegt.

Energiebedarf zur Erzeugung der Wassermengen durch Umkehrosmose								
Wassermenge [m3]	Theoretisch min.		Theoretisch max.		Real min.		Real max.	
2030	1,28E+07		2,44E+07		1,73E+07		5,34E+07	
2050	1,48E+07		1,07E+08		2,01E+07		2,35E+08	
Energiebedarf [KWh]	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
2030	2,55E+07	3,83E+07	4,89E+07	7,33E+07	3,46E+07	5,20E+07	1,07E+08	1,60E+08
2050	2,95E+07	4,43E+07	2,15E+08	3,22E+08	4,01E+07	6,02E+07	4,69E+08	7,04E+08
Energiebedarf [GWh]	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
2030	25,50	38,26	48,86	73,29	34,63	51,95	106,74	160,11
2050	29,53	44,30	214,77	322,16	40,10	60,15	469,19	703,78

Tabelle 89 Energiebedarf zur Erzeugung der Wassermengen durch Umkehrosmose

Es ist zu erkennen, dass zur Erzeugung der benötigten Wassermengen durch Meerwasserentsalzung große Mengen an Energie aufgewendet werden müssen. Um die ermittelten Werte in ein Verhältnis zu setzen, wurde sie in Tabelle 91 mit den erzeugten Strommengen Chiles im Jahr 2021 verglichen.

In Chile erzeugter Strom nach Energieträgern [GWh];[89]	
Fossile Energiequellen	44.264
Erneuerbare Energiequellen	35.892
Insgesamt	80.156

Tabelle 90 In Chile erzeugter Strom nach Energieträgern

Verhältnis der Energiemengen zur Stromerzeugung 2021		
min./max.	min.	max.
Energiemenge von 2030 [GWh]	34,63	160,11
Fossile Energiequellen	0,08%	0,36%
Erneuerbare Energiequellen	0,10%	0,45%
Insgesamt	0,04%	0,20%
Energiemenge von 2050 [GWh]	40,10	703,78
Fossile Energiequellen	0,09%	1,59%
Erneuerbare Energiequellen	0,11%	1,96%
Insgesamt	0,05%	0,88%

Tabelle 91 Verhältnis der Energiemengen zur Stromerzeugung 2021

Es stellt sich heraus, dass die zur Meerwasserentsalzung benötigte Energiemenge von 2030 maximal 0,2 % der gesamten Stromerzeugung von 2021 entspricht. Die maximale Energiemenge von 2050 entspricht 0,88 % der gesamten Stromerzeugung von 2021. Berücksichtigt man die Zunahme der Energieerzeugung bis 2030 und 2050, so lässt sich vermuten, dass die zur Meerwasserentsalzung benötigte Energiemenge in den jeweiligen Jahren einen weitaus geringeren Anteil an der gesamten Stromerzeugung haben wird.

Zusammenfassend lässt sich annehmen, dass die technische Bereitstellung der Ressource Wasser in Chile durch die Nutzung der Meerwasserentsalzung wahrscheinlich keine negativen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt haben wird. Es ist sogar denkbar, dass das Errichten von Meerwasserentsalzungsanlagen zu einer Verbesserung der lokalen Wasserversorgung führen kann. Dennoch sollte nicht vernachlässigt werden, dass große Wasser- und Energiemengen benötigt werden, um die geforderte Wasserstoffproduktion zu gewährleisten. Diese können bei unzureichender Planung zu Wasser- und Energiekonkurrenzen mit anderen Verbrauchern führen. Des Weiteren sollte auch bei ausreichender Energie- und Entsalzungskapazitäten nicht vernachlässigt werden, welche Umweltauswirkungen die Entsalzung von Meerwasser mit sich bringt.

Die Umweltauswirkungen der Nutzung einer Meerwasserentsalzungsanlage ist für jeden Standort individuell zu betrachten. Je nach Art und Betrieb der Anlage, werden maritime Organismen, beispielsweise kleine Fische, Fischeier, oder Mikroorganismen, durch die Meerwasseraufnahme verletzt oder getötet. Des Weiteren entstehen bei der Entsalzung von Meerwasser zwei Abfallströme, die Brine und eine mit Chemikalien belastete Reinigungslösung, welche, je nach Weiterverarbeitung, ebenfalls negative Umweltauswirkungen aufweisen können [21].

5 Diskussion

Im folgenden Abschnitt werden die zuvor erarbeiteten Ergebnisse kritisch reflektiert, um ein tiefgehendes Verständnis für Ihre Bedeutung im Kontext der Aufgabenstellung darzustellen. Hierbei werden die Ergebnisse der Länderübersicht, die der erstellten Szenarien (inkl. Korrektur der Szenarien), sowie die erarbeiteten Auswirkungen auf die jeweiligen Wasserhaushalte diskutiert.

5.1 Die Länderübersicht

Bei der Länderübersicht handelt es sich um eine reine Datenübersicht basierend auf Literaturwerten zu den Kategorien Bedarf, Importbedarf, mögliche Exportmengen und voraussichtlicher Elektrolysekapazitäten für die Jahre 2030 und 2050. Diese wurde für voraussichtliche Importeure, sowie Exporteure erstellt. Die Aufteilung der ausgewählten Länder in die zwei Kategorien Importeure und Exporteure, stellt eine grobe Vereinfachung der Realität dar und dient ausschließlich der vereinfachten Übersicht. Die einzelnen Rollen der Akteure auf dem Wasserstoffmarkt sind dynamisch und werden sich im Laufe des Zeitraumes 2030 bis 2050 ändern. So dienen einige Länder als Umschlagpunkt des Wasserstoffhandels, wodurch sie sowohl Wasserstoff importieren und anschließend exportieren. Andere Länder werden als Selbstversorger gesehen, die ihren eigenen Bedarf entweder durchgehend decken werden, oder dies so lange tun, bis der Import von Wasserstoff wirtschaftlicher ist als die eigene Produktion.

Da es sich bei den angegebenen Wasserstoffmengen insgesamt um Co₂-armen Wasserstoff und seine Derivate handelt, die Produktionsweise von einigen Ländern jedoch nicht genauer beschrieben wurden, ist ein Vergleich von Länderdaten eher kritisch zu betrachten. So können Bedarfsangaben von einigen Ländern auf grünen Wasserstoff bezogen sein, während andere Länder ihren zukünftigen Bedarf auf eine Mischung von grünem und blauem Wasserstoff beziehen. Das Gleiche gilt für die Import- und Exportmengen. Ebenfalls wird in den meisten Strategien nicht zwischen reinen Wasserstoffmengen oder Mengen an Derivaten unterschieden, wodurch es dazu kommen kann, dass angegebene Werte einen Teil des realen Gesamtbedarfs nicht berücksichtigen. Auch die Unterteilung von Minimal- und Maximalwerten eines Jahres, ist nicht in jeder Länderstrategie gegeben. Die Grundannahme, den ersten Literaturwert eines Landes als Minimalwert anzunehmen, stellt zwar eine einheitliche Erfassung der Werte dar, erschwert jedoch den nachträglichen Vergleich der Länderdaten ebenfalls. So könnten die als Minimalwerte eines Landes eingetragenen Mengen eigentlich den Maximalwert eines Landes wiedergeben. Ohne Kommentar oder weitere Hinweise in der Literatur war eine andere Erfassung der Werte nicht möglich.

Des Weiteren werden von vielen Ländern geplante Elektrolysekapazitäten angegeben, jedoch keine geplanten Volllaststunden oder geplante Produktionsmengen. Es ist somit nicht eindeutig, wie und zu welchem Zweck diese Kapazitäten eingesetzt werden. Es ist denkbar, dass zumindest Teile der geplanten Kapazitäten lediglich zur Speicherung von überschüssigem Strom dienen und nicht zur allgemeinen Bedarfsdeckung auf Volllast produzieren.

Die genannten Punkte sollten bei der Betrachtung und Nutzung der Länderübersicht berücksichtigt werden. Ziel der Länderübersicht ist lediglich die Visualisierung gegebener Daten zu den zuvor genannten Kategorien.

5.2 Die Szenarien

Die erstellten Szenarien dienen dazu fehlende Daten der Länderübersicht zu ergänzen und, basierend auf gegebenen Daten, Prognosen zu erstellen.

Die Szenarien weisen grundlegende Schwächen auf. So ist die Grundannahme, Werte eines Landes auf andere Länder anzuwenden, bereits kritisch zu hinterfragen. Wie im Abschnitt der Länderübersicht zuvor erwähnt, ist ein Vergleich der Länderwerte, aus den genannten Gründen, problematisch. Dementsprechend ist auch die Anwendung länderspezifischer Daten auf andere, als kritisch zu betrachten.

Ein weiterer Punkt ist die in den Szenarien getroffene Annahme, dass die Elektrolysekapazitäten die Summe aus Bedarfs- und Import- oder Exportmenge decken muss (Grundannahme der verwendeten Verfahren). Diese Annahme diene lediglich der Ermittlung fehlender Angaben, sie gibt jedoch nicht die Realität wieder. So ist es möglich, dass Bedarfs-, Import- oder Exportmengen auch ohne Elektrolyseverfahren bereitgestellt werden (z.B. Produktion von blauem Wasserstoff). Dies sorgt dafür, dass bei erster Betrachtung, Literaturwerte zur Elektrolysekapazität nicht zu den ermittelten Wasserstoffmengen passen. Es muss jedoch die Möglichkeit der blauen Wasserstoffproduktion berücksichtigt werden. Aufgrund der zuvor genannten Gründe stellen die mittels Szenarien ermittelten Elektrolysekapazitäten höhere Werte dar, als voraussichtlich installiert werden.

Obgleich der genannten Problematiken war es durch die Erstellung und Anwendung der Szenarien möglich, fehlende Werte zu ermitteln. Diese bilden trotz grundlegender Schwächen einen groben Überblick über mögliche Mengenangaben ab und sollten somit in der Lage sein eine Grundlage für tiefere Untersuchungen einzelner Länder zu bilden.

5.2.1 Szenario-DEU

Das Szenario-DEU ist ein Szenario, in dem fehlende Daten der voraussichtlichen Importeure in der Länderübersicht basierend auf den Daten Deutschlands ermittelt wurden. Mit Hilfe der Literaturwerte Deutschlands wurden sogenannte Basisfaktoren bestimmt und Verfahren ausgewählt, auf Grundlage derer fehlende Werte anderer Länder berechnet wurden.

Wie zuvor erwähnt, besitzt das Szenario das grundlegende Problem der Vergleichbarkeit der angegebenen Werte. So weist Deutschland beispielsweise ein großes Spektrum, mit 110 – 800 TWh, an möglichen Bedarfen für das Jahr 2050 auf. Der Vergleich in Tabelle 23 hat gezeigt, dass der daraus resultierende Bedarfsquotient deutlich größer ist als der der anderen Länder. Die Anwendung des deutschen Bedarfsquotienten auf andere Länder sorgt somit dafür, dass diesen Ländern unverhältnismäßig hohe maximale Bedarfsmengen für das Jahr 2050 prognostiziert werden.

Um die mittels deutschem Bedarfsquotienten errechneten Werte auf realistischere Werte zu korrigieren, wurde ein Korrekturfaktor ermittelt (Siehe Tabelle 24). Durch Verwendung des neuen Korrekturfaktors, konnten Werte prognostiziert werden, die deutlich geringere Unterschiede zwischen Minimal- und Maximalwert aufweisen. Resultierend daraus konnte ebenfalls der voraussichtliche Elektrolysewert Südkoreas für das Jahr 2050 zu einem realistischeren Wert angepasst werden. Ein Beispiel für die Anpassung der Bedarfswerte ist in Tabelle 65 dargestellt.

5.2.2 Szenario-CHL

Das Szenario-CHL ist ein Szenario, in dem fehlenden Daten der voraussichtlichen Importeure in der Länderübersicht, basierend auf den Daten Chiles ermittelt wurden. Mit Hilfe der Literaturangabe zur Marktaufteilung der Wasserstoffproduktion in Chile und der Anwendung des Gesamtproduktionsverfahrens wurden sogenannte Basisfaktoren bestimmt und, auf Grundlage derer, fehlende Werte anderer Länder berechnet wurden.

Auch das Szenario-CHL weist die grundlegenden Probleme der Länderübersicht auf. Hinzu kam, dass in diesem Szenario Werte ermittelt wurden, die der minimalen und maximalen Bezeichnung widersprachen. So wurden beispielsweise für Argentinien mögliche maximale Exportmengen errechnet, die geringer waren als die Minimalwerte, welche aus der Literatur stammen (Siehe Tabelle 71). Grund hierfür ist, dass die ermittelten Werte auf Angaben Chiles basieren, Argentinien jedoch andere Verhältnisse zwischen Bedarf und Exportmenge aufweist. Ebenfalls wurden die maximal möglichen Exportmengen basierend auf der Produktion der angegebenen Elektrolysekapazität bei einer Volllaststunden Zahl von 8000 Stunden ermittelt. Wie bei der Länderübersicht bereits erwähnt, ist diese Art der Werteermittlung praktisch, um grobe Anhaltspunkte zu liefern, sie widerspricht jedoch der Realität und stimmt somit nicht mit gegebenen Literaturwerten überein.

Da diese Werte logisch nicht nachvollziehbar sind, wurden Korrekturwerte der fehlerhaften Länder ermittelt. Für jedes Land wurde ein individueller Korrekturwert für den Bedarf und für den Export ermittelt. Diese basieren auf den bereits gegebenen Literaturwerten der jeweiligen Länder und bilden somit ein genaueres Verhältnis der länderspezifischen Aufteilung zwischen Bedarf und möglichen Exportmengen ab. Aber auch nach der Korrektur kam es zu Werten, die nicht korrekt sein können. So musste nach Korrektur der Werte der Vereinigten Arabischen Emiraten (UAE), die Elektrolysekapazität für 2031 neu ermittelt werden. Diese weist nach Durchführung der Korrektur 50 GW auf, was dem gleichen Wert entspricht wie für 2040 (siehe Tabelle 76). Dieses Ergebnis widerspricht den gegebenen Literaturwerten und ist somit als Schwäche der durchgeführten Korrektur zu beurteilen.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Szenarien nach den Korrekturen nachvollziehbare Prognosen liefern. Die allgemeinen Problematiken der Länderübersicht bleiben hierbei jedoch weiterhin bestehen, was auf die grundlegende Datenverfügbarkeit und der Auslegung der Übersichtstabelle zurückzuführen ist. Um genauere Prognosen erstellen zu können, müssten individuelle Szenarien für jedes Land ermittelt werden, ähnlich wie bei der Korrektur des Szenario-CHL. Aufgrund fehlender Daten und mangelnder Bearbeitungskapazitäten war eine solche Betrachtung in dieser Bachelorarbeit jedoch nicht möglich. Die Ergebnisse der Szenarien bieten jedoch das Potential eine Grundlage für weiterführende, individuellere und detailliertere Untersuchungen der Länder.

5.3 Auswirkungen des Wasserstoffhandel auf nationale Wasserhaushalte am Fallbeispiel Chile – Deutschland

In Fallbeispiel Chile-Deutschland wurden, basierend auf den zuvor ermittelten Importmengen Deutschlands für die Jahre 2030 und 2050, Wassermengen berechnet, welche Chile aufwenden muss, um die geforderten Mengen an Wasserstoff zu produzieren. Ebenfalls wurden die Mengen an Wasser berechnet, welche Deutschland durch den Handel mit Wasserstoff importiert.

Um die Auswirkungen auf die jeweiligen Haushalte abschätzen zu können, wurden die ermittelten Wassermengen mit dem Wasserdargebot und Wasserverbrauchern der jeweiligen Länder verglichen.

5.3.1 Deutschland

Zu Beginn wurde der Zusammenhang zwischen der Anzahl an Industrieunternehmen in einem Bundesland und den jeweiligen Wasserverbräuchen des Bundeslandes festgestellt. Basierend auf dieser Erkenntnis wurden unterschiedliche Vergleiche mit der importierten Wassermenge und den jeweiligen Wasserverbräuchen der Bundesländer angestellt (siehe Tabelle 96 bis 107). Das Ergebnis der Vergleiche war, dass die importierte Wassermenge durch die nutzungsbedingte Verteilung schätzungsweise geringe Auswirkungen auf die jeweiligen lokalen Wasserhaushalte haben wird, da es sich um eine nicht zu vernachlässigende, aber geringe Wassermenge handelt. Es ist am ehesten denkbar, dass das importierte Wasser positive Effekte auf die jeweiligen Wasserhaushalte haben wird, da es dazu führen kann, dass lokale Wasserquellen geringfügig entlastet werden.

Die Vorgehensweise zur Untersuchung der Auswirkungen auf den deutschen Wasserhaushalt ist als eher oberflächlich anzusehen. Zur genaueren Abschätzung der Auswirkungen, müsste eine deutlich umfangreichere Analyse durchgeführt werden. Diese müsste einzelne Standorte genauer auf Wasserquellen und Verbraucher analysieren und Nutzungsstandorte des importierten Wasserstoffs identifizieren. Ebenfalls müssten, bei dem gewählten Zeitraum bis 2050, klimabedingte Änderungen am Wasserhaushalt analysiert und ebenfalls berücksichtigt werden. Die vorliegende Untersuchung ergab trotz mangelnder Tiefe hilfreiche Mengenvergleiche, durch die die Größenordnungen der importierten Wassermengen tabellarisch visualisiert wurde.

5.3.2 Chile

Die Untersuchung der Auswirkungen auf den chilenischen Wasserhaushalt basieren auf dem Vorhaben der chilenischen Regierung, die Wasserbereitstellung durch Meerwasserentsalzung zu realisieren.

Es wurden Meerwassermengen und Energiemengen ermittelt, die benötigt werden, um die Wasserbereitstellung zur Wasserstoffproduktion zu gewährleisten. Da angenommen wurde, dass Meerwasser unbegrenzt zur Verfügung steht, wurde der Energiebedarf der Meerwasserentsalzung als kritischer Faktor identifiziert. Die Energiemengen wurden daher mit erzeugten Strommengen Chiles aus dem Jahr 2021 verglichen, um so ihre Größenordnung zu visualisieren. Um die Wassermengen zu visualisieren, wurden bestehende Entsalzungsanlagen untersucht und angegeben wie viele Betriebsstunden die bereits existierenden und, im Vergleich, eine fiktive durchschnittliche Anlage laufen müssten, um die benötigten Wassermengen zu produzieren.

Da bestehende Wasserquellen durch die Wasserbereitstellung durch Meerwasserentsalzung jedoch nicht zusätzlich für die Wasserstoffproduktion belastet werden, ist davon auszugehen, dass der Einfluss der Produktion auf den chilenischen Wasserhaushalt nicht negativ sein wird.

Es ist sogar denkbar, dass durch die Installierung neuer Entsalzungsanlagen die lokale Wasserversorgungssituation verbessert werden kann.

Die Vorgehensweise dieser Untersuchung liefert wenig Daten darüber, wie groß der Einfluss der Wasserstoffproduktion auf den chilenischen Wasserhaushalt sein wird. Grund hierfür ist einerseits die Annahme, dass die gesamten Wassermengen durch Meerwasserentsalzung bereitgestellt werden. Andererseits die mangelnde Tiefe der Analyse. Für genauere Ergebnisse müssten Wasserstoffproduktionsstandorte, sowie Bauvorhaben von Entsalzungsanlagen identifiziert und analysiert werden. Es ist denkbar, dass übergangsweise auch lokale Wasserquellen für die schnelle Realisierung der Wasserstoffproduktion genutzt werden, bis ausreichend Entsalzungsanlagen zur Verfügung stehen. Daher wäre eine Betrachtung der Bauzeiträume und der damit verbundenen Deckungszeiträume zur Wasserbereitstellung durch Entsalzungsanlagen, ebenfalls notwendig. Des Weiteren wurden mögliche klimabedingte Entwicklungen des Wasserhaushaltes nicht berücksichtigt. Diese spielen am Standort Chiles und im betrachteten Zeitraum bis 2050 eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

6 Fazit

Die vorliegende Bachelorarbeit ging dem Ziel nach, perspektivische Importeure und Exporteure von Wasserstoff und seinen Derivaten zu identifizieren und zu analysieren. Hierbei wurden die der Zeitraum von 2030 bis 2050 untersucht. Ebenfalls wurde mittels Literaturrecherche, die Produktion von Wasserstoff und die damit verbundene Abhängigkeit der Ressource Wasser untersucht. Basierend auf den Ergebnissen wurden anhand eines Fallbeispiels die Auswirkungen des Wasserstoffhandels auf die nationale Wasserhaushalte Chiles und Deutschlands untersucht und visualisiert.

Die Ergebnisse der durchgeführten Arbeit sind überwiegend tabellarisch und stellen einen Mehrwert in der Zusammenführung sowie Übersicht der untersuchten Daten dar. Die Erstellung der Szenarien, lieferte fehlende Daten zu den untersuchten Kategorien. Jedoch ist die Genauigkeit der Ergebnisse, aufgrund der mangelnden Individualisierung einzelner Länder, sowie der allgemeinen Auslegung der Szenarien, kritisch zu betrachten.

Die Untersuchung der Auswirkungen des Wasserstoffhandels auf nationale Wasserhaushalte am Fallbeispiel Chile-Deutschland, lieferte wenig konkrete Aussagen über den eigentlich untersuchten Sachverhalt. Vielmehr wurden hier Mengenverhältnisse visualisiert und durch Gegenüberstellungen vergleichbar gemacht. Grund hierfür ist die mangelnde Tiefe der Analyse, welche größtenteils auf mangelnde Umfangskapazitäten dieser Arbeit zurückzuführen sind.

Letztendlich konnte gezeigt werden welche Länder im untersuchten Zeitraum perspektivisch als Importeure oder Exporteure auf dem Wasserstoffmarkt agieren werden, sowie welche Elektrolysekapazitäten, Bedarfs-, Import-, oder Exportmengen diese Länder voraussichtlich vorweisen werden. Des Weiteren hilft diese Arbeit bei der Visualisierung, im Zuge des Wasserstoffhandels, importierter oder aufgewendeter Wassermengen. Diese Bachelorarbeit bietet das Potential die Grundlage weiterführender, sowie individuellerer Betrachtungen einzelner Länder, darzustellen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Alvik, Sverre: Hydrogen Forecast to 2050. Energy Transition Outlook 2022 2022. Online verfügbar unter https://aben.com.br/wp-content/uploads/2022/06/DNV_Hydrogen_Report_2022_Highres_single1.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2023.
- [2] Anouti, Yahya; et al. (2020): The Dawn of green Hydrogen. Maintaining the GCC's edge in a decarbonized world. Online verfügbar unter <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/reports/2020/the-dawn-of-green-hydrogen/the-dawn-of-green-hydrogen.pdf>, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- [3] Ansari, Dawud; Grinschgl, Julian; Pepe, Jacopo Maria (2022): Elektrolyseure für die Wasserstoffrevolution. Herausforderungen, Abhängigkeiten und Lösungsansätze. Herausforderungen, Abhängigkeiten und Lösungsansätze. Online verfügbar unter https://www.swp-berlin.org/publications/products/aktuell/2022A58_Wasserstoffrevolution.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2023.
- [4] ARC Group (2022): China's Hydrogen Strategy: Present & Future State - ARC Group. In: *ARC Group*, 29.11.2022. Online verfügbar unter <https://arc-group.com/china-hydrogen-energy/>, zuletzt geprüft am 06.11.2023.
- [5] Argentina Presidencia: Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economia del Hidrogeno 2023. Online verfügbar unter https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/07/estrategia_nacional_de_hidrogeno_-_sae.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2023.
- [6] Australian Embassy Germany: Australia has some of the best natural resources to produce green hydrogen. Online verfügbar unter https://germany.embassy.gov.au/files/beln/220324_Storyboards_all.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2023.
- [7] Australian Embassy Germany: Australiens Sonnenschein für Europa. Die australisch-deutsche Wasserstoff-Partnerschaft. Online verfügbar unter https://germany.embassy.gov.au/files/beln/210303_Flyer_hydrogen-strategy_digital.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2023.
- [8] Australian Government | Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water (2023): National Hydrogen Strategy Review. Consultation Paper July 2023. Online verfügbar unter https://storage.googleapis.com/files-au-climate/climate-au/p/prj277759bb48cda6df2c230/public_assets/National%20Hydrogen%20Strategy%20Review%20-%20Consultation%20Paper%20-%20July%202023.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2023.
- [9] Bärbel, Egenolf-Jonkmanns; et al. (2021): Wasserstoffimporte. Bewertung der Realisierbarkeit von Wasserstoffimporten gemäß den Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030. Hg. v. SCI4climate.NRW. Online verfügbar unter <https://www.iwkoeln.de/studien/bewertung-der-realisierbarkeit-von-wasserstoffimporten-gemaess-den-zielvorgaben-der-nationalen-wasserstoffstrategie-bis-zum-jahr-2030.html>, zuletzt geprüft am 03.12.2023.
- [10] BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- [11] BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023): Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. NWS 2023. Online verfügbar unter

https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 21.11.2023.

[12] Boddenberg, Sophia (2020): Der chilenische Wasser-Krieg. Bischöfliche Aktion Adveniat e.V. Online verfügbar unter <https://www.blickpunkt-lateinamerika.de/artikel/der-chilenische-wasser-krieg/>, zuletzt geprüft am 01.11.2023.

[13] Bogdanov, Dmitrii; et al.: Renewable pathways to climate-neutral Japan. Reaching zero emissions by 2050 in the Japanese energy system EXECUTIVE SUMMARY 2021. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_03_JP_2050_study/2021_LUT-Agora-REI_Renewable_pathways_Summary.pdf, zuletzt geprüft am 30.11.2023.

[14] Braun, Stuart (2023): Trinkwasser aus dem Meer? In: *Deutsche Welle*, 22.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.dw.com/de/trinkwasser-aus-dem-meer/a-65081715>, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

[15] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2023): Update der Nationalen Wasserstoffstrategie: Turbo für die H₂-Wirtschaft. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html, zuletzt geprüft am 31.12.2023.

[16] C. Hebling; et al.: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland 2019. Online verfügbar unter https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/pressemitteilungen/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf, zuletzt geprüft am 31.10.2023.

[17] Canada Energy Regulator: Canada's Energy Future 2023: Energy Supply and Demand Projections to 2050 2023. Online verfügbar unter <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/canada-energy-future/2023/canada-energy-futures-2023.pdf>, zuletzt geprüft am 13.10.2023.

[18] Center on Global Energy Policy | Columbia University (2023): National Hydrogen Strategies & Roadmaps Tracker. Online verfügbar unter https://www.energypolicy.columbia.edu/wp-content/uploads/2023/10/H2-Strategies_October_v4-1.pdf, zuletzt geprüft am 02.11.2023.

[19] COAG Energy Council (2019): AUSTRALIA'S NATIONAL HYDROGEN STRATEGY. Online verfügbar unter <https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>, zuletzt geprüft am 07.11.2023.

[20] Coca, Nithin (2023): A half-decade after its first plan, Japan's hydrogen goals remain distant. In: *Energy Monitor*, 30.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.energymonitor.ai/hydrogen/a-half-decade-after-its-first-plan-japans-hydrogen-goals-remain-distant/?cf-view&cf-closed>, zuletzt geprüft am 31.12.2023.

[21] Cooley, Heather; Ajami, Newsha; Heberger, Matthew (2013): Key Issues in Seawater Desalination in California. Marine Impacts. Online verfügbar unter <https://pacinst.org/wp-content/uploads/2013/12/desal-marine-impacts-full-report.pdf>, zuletzt geprüft am 01.11.2023.

[22] Dennis, Seifert: DRAFT UPDATE OF THE PLAN INTEGRATED NATIONAL ENERGY AND CLIMATE 2023-2030 2023. Online verfügbar unter https://commission.europa.eu/system/files/2023-07/EN_SPAIN%20DRAFT%20UPDATED%20NECP.pdf, zuletzt geprüft am 07.01.2024.

[23] Department for Business & Trade: Hydrogen. Online verfügbar unter <https://www.great.gov.uk/international/content/investment/sectors/hydrogen/>, zuletzt geprüft am 31.10.2023.

- [24] Department for Business, Energy and Industrial Strategy: Hydrogen Strategy Update to the Market: December 2022 2022. Online verfügbar unter https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1175495/hydrogen-strategy-update-to-the-market-december-2022.pdf, zuletzt geprüft am 04.10.2023.
- [25] Deutsche Gesellschaft für die Vereinten Nationen (2006): Nicht nur eine Frage der Knappheit. Macht, Armut und die globale Wasserkrise. Unter Mitarbeit von Hans-Christoph Neidlein. dt. Ausg. Bonn: UNO-Verl. (Bericht über die menschliche Entwicklung, 2006). Online verfügbar unter https://hdr.undp.org/system/files/documents/2006-hdr-german_1.2006-hdr-german.pdf, zuletzt geprüft am 18.10.2023.
- [26] Deutsche Industrie- und Handelskammern (2020): Wasserstoff DIHK Faktenpapier. Online verfügbar unter <https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf>, zuletzt geprüft am 20.11.2023.
- [27] Djunicic, Sladjana: Spain to revise upwards green H2 targets for 2030. Online verfügbar unter <https://renewablesnow.com/news/spain-to-reverse-upwards-green-h2-targets-for-2030-report-807322/>, zuletzt geprüft am 13.11.2023.
- [28] DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2024): Wasserstoff – Energieträger der Zukunft. Online verfügbar unter <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/wasserstoff-energietraeger-der-zukunft>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2024, zuletzt geprüft am 09.01.2024.
- [29] DVGW (2022): Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot Deutschlands. Überblick zu aktuellen Ergebnissen der deutschen Klimaforschung. Online verfügbar unter <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/wasser/zukunftsprogramm/auswirkung-klimawandel-wasserdargebot-zukunft-wasser-factsheet.pdf>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.
- [30] Eichhorn, Christoph von (2017): Meerwasserentsalzungs-Anlage "Dschabal Ali" in Dubai. In: *Süddeutsche Zeitung*, 22.08.2017. Online verfügbar unter <https://www.sueddeutsche.de/wissen/meerwasserentsalzung-wie-dubai-dem-meer-trinkwasser-abringt-1.3630919>, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- [31] Eichlseder, Helmut; Klell (2012): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Vieweg+Teubner Verlag.
- [32] EUROPÄISCHE KOMMISSION: REPowerEU-Plan. MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN EUROPÄISCHEN RAT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN 2022. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 04.09.2023.
- [33] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2020): Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa. MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301>, zuletzt geprüft am 04.10.2023.
- [34] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2020): Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/865951/EU_Hydrogen_Strategy_DE.pdf.pdf, zuletzt geprüft am 31.12.2023.

- [35] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2023): METIS 3, study S5. The impact of industry transition on a CO₂-neutral European energy system. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/72954c87-327a-11ee-83b8-01aa75ed71a1>, zuletzt geprüft am 04.10.2023.
- [36] EUROPEAN HYDROGEN BACKBONE (2021): Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen. Online verfügbar unter https://oge.net/_Resources/Persistent/2/c/f/9/2cf95bef7e617595ed1bdec9531acb69ef6b4c73/EHB_study_2021_June.pdf, zuletzt geprüft am 31.12.2023.
- [37] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2024): Presseinformation. Online verfügbar unter <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2022/presseinfo-22-wasserstoff-energietaeager-im-globalen-energiesystem.html>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2024, zuletzt geprüft am 09.01.2024.
- [38] Gies, Erica (2019): Slaking the World's Thirst with Seawater Dumps Toxic Brine in Oceans, 07.02.2019. Online verfügbar unter <https://www.scientificamerican.com/article/slaking-the-worlds-thirst-with-seawater-dumps-toxic-brine-in-oceans/>, zuletzt geprüft am 23.11.2023.
- [39] Giuli, Marco: Italy in the International Hydrogen Economy 2022. Online verfügbar unter <https://www.iai.it/sites/default/files/9788893682374.pdf>, zuletzt geprüft am 05.10.2023.
- [40] Government of the Netherlands: Government Strategy on Hydrogen. Online verfügbar unter <https://www.government.nl/documents/publications/2020/04/06/government-strategy-on-hydrogen>, zuletzt geprüft am 08.11.2023.
- [41] Green Hydrogen Organisation: France. Online verfügbar unter <https://gh2.org/countries/france>, zuletzt geprüft am 04.10.2023.
- [42] Hansraj, Tiana (2022): GREEN HYDROGEN COMMERCIALISATION STRATEGY FOR SOUTH AFRICA. EXECUTIVE SUMMARY. Online verfügbar unter <https://www.thedtic.gov.za/wp-content/uploads/Executive-Summary-Green-Hydrogen-Commercialisation-Strategy.pdf>, zuletzt geprüft am 16.11.2023.
- [43] HM Government: UK Hydrogen Strategy 2021. Online verfügbar unter https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1175494/UK-Hydrogen-Strategy_web.pdf, zuletzt geprüft am 04.10.2023.
- [44] Hydrogen Central (2023): By 2050, The Demand for Green Hydrogen in Italy is Likely to Reach 9.5 Million Tonnes Per Year – World Hydrogen Leaders. In: *Hydrogen Central*, 09.03.2023. Online verfügbar unter <https://hydrogen-central.com/by-2050-demgreen-hydrogen-italy-likely-reach-9-5-million-tonnes-per-year-world-hydrogen-leaders/>, zuletzt geprüft am 05.10.2023.
- [45] Hydrogen Council; McKinsey & Company (2022): Global Hydrogen Flows. Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization. Online verfügbar unter <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Hydrogen-Flows.pdf>, zuletzt geprüft am 02.11.2023.
- [46] IEA - International Energy Agency (2022): Global Hydrogen Review 2022. Online verfügbar unter <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>, zuletzt geprüft am 11.11.2023.
- [47] Igini, Martina (2022): Chile Water Crisis: 13 Years and Counting. Hg. v. Earth.Org. Online verfügbar unter <https://earth.org/chile-water-crisis/>, zuletzt geprüft am 01.11.2023.
- [48] International Energy Agency- IEA (2019): The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Online verfügbar unter <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493->

b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf, zuletzt geprüft am 11.09.2023.

[49] InvestChile (2023): Chile has 28 desalination plants in operation and under construction. Online verfügbar unter <https://blog.investchile.gob.cl/chile-desalination-plants>, zuletzt geprüft am 23.11.2023.

[50] IRENA (2022): GLOBAL HYDROGEN TRADE TO MEET THE 1.5°C CLIMATE GOAL. TRADE OUTLOOK FOR 2050 AND WAY FORWARD. Online verfügbar unter https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Global_hydrogen_trade_part_1_2022_.pdf, zuletzt geprüft am 04.11.2023.

[51] Janardhanan, Nandakumar; Tamura, Kentaro; Moinuddin, Mustafa; Zusman, Eric; Jin, Zhen; Takizawa, Hajime (2021): Making Hydrogen Society a Reality in Asia. A Feasibility Assessment. Online verfügbar unter https://www.iges.or.jp/en/publication_documents/pub/discussionpaper/en/11821/Making+Hydrogen+Society+a+Reality+in+Asia.pdf, zuletzt geprüft am 21.10.2023.

[52] Jane Nakano (2022): China Unveils its First Long-Term Hydrogen Plan. Online verfügbar unter <https://www.csis.org/analysis/china-unveils-its-first-long-term-hydrogen-plan>, zuletzt geprüft am 19.11.2023.

[53] Jensterle, Miha; et al. (2020): Grüner Wasserstoff: Internationale Kooperationspotenziale für Deutschland. Kurzanalyse zu ausgewählten Aspekten potenzieller Nicht-EU-Partnerländer. Online verfügbar unter https://adelphi.de/system/files/mediathek/bilder/Gr%C3%BCner%20Wasserstoff_Internationale%20Kooperationspotenziale%20f%C3%BCr%20Deutschland_finale%20Version.pdf, zuletzt geprüft am 02.11.2023.

[54] Jentsch, Sebastian; et al. (2022): Wasser als kritische Ressource für die Wasserstoffherzeugung. In: *Gas Wasserfach Wasser Abwasser* (09), S. 73–88. DOI: 10.17560/gwfw.v162i09.2574.

[55] Jepma, Catrinus J.; Spijker, Eise; Hofman, Erwin: The Dutch Hydrogen Economy in 2050. An exploratory study on the socio-economic impacts of introducing hydrogen into the Netherlands energy system 2019. Online verfügbar unter https://www.vno-ncw.nl/sites/default/files/the_dutch_hydrogen_economy_in_2050_march_2019.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2023.

[56] John Cockerill (2022): John Cockerill contributes to the Kingdom of Morocco's ambitious plan for the sustainable development of its industry. Online verfügbar unter <https://johncockerill.com/wp-content/uploads/2022/11/20221110-communique-de-presse-john-cockerill-contribue-au-plan-ambitieux-de-developpement-durable-de-lindustrie-du-royaume-du-maroc-en-us.pdf>, zuletzt geprüft am 19.11.2023.

[57] Kan, Sichao (2020): South Korea's Hydrogen Strategy and Industrial Perspectives. Online verfügbar unter https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/sichao_kan_hydrogen_korea_2020_1.pdf, zuletzt geprüft am 31.10.2023.

[58] Kasten, Peter; Heinemann, Christoph: Kein Selbstläufer: Klimaschutz und Nachhaltigkeit durch PtX 2019. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Impulspapier-soz-oek-Kriterien-e-fuels.pdf>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

[59] Kilpeläinen, Sarah; Quitzow, Rainer; Tsoumpa, Marina: Hydrogen in the Nordics – Drivers of European Cooperation? Online verfügbar unter <https://library.fes.de/pdf-files/a-p-b/20629.pdf>, zuletzt geprüft am 07.01.2024.

- [60] Kinkartz, Sabine (2019): Grüner Wasserstoff dringend gesucht. In: *Deutsche Welle*, 05.11.2019. Online verfügbar unter <https://www.dw.com/de/gr%C3%BCner-wasserstoff-dringend-gesucht/a-51124354>, zuletzt geprüft am 22.11.2023.
- [61] Küper Malte; Schaefer Thilo (2021): Bewertung der Realisierbarkeit von Wasserstoffimporten gemäß den Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030. In: *Küper Externe Veröffentlichung*. Online verfügbar unter <https://www.iwkoeln.de/studien/bewertung-der-realisierbarkeit-von-wasserstoffimporten-gemaess-den-zielvorgaben-der-nationalen-wasserstoffstrategie-bis-zum-jahr-2030.html>, zuletzt geprüft am 13.11.2023.
- [62] Lee, Charles (2021): S Korea to provide 27.9 mil mt/year of 'clean hydrogen' by 2050. In: *S&P Global Commodity Insights*, 2021. Online verfügbar unter <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/112621-s-korea-to-provide-279-mil-mtyear-of-clean-hydrogen-by-2050>, zuletzt geprüft am 21.10.2023.
- [63] McKinsey & Company (2020): Chilean Hydrogen Pathway. Final Report. Online verfügbar unter https://energia.gob.cl/sites/default/files/estudio_base_para_la_elaboracion_de_la_estrategia_nacional_para_el_desarrollo_de_hidrogeno_verde_en_chile.pdf, zuletzt geprüft am 03.11.2023.
- [64] Ministry of Energy and Infrastructure (MoEI): National Hydrogen Strategy of the United Arab Emirates 2023. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/2023_UAE_National_Hydrogen_Strategy_Fraunhofer_GHD.pdf, zuletzt geprüft am 16.11.2023.
- [65] Ministry of Energy, Government of Chile (2020): NATIONAL NATIONAL GREEN HYDROGEN STRATEGY CHILE. Chile, a clean energy provider for a carbon neutral planet. Online verfügbar unter https://energia.gob.cl/sites/default/files/national_green_hydrogen_strategy_-_chile.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2023.
- [66] Mohamed, Azeroual; et al. (2018): Renewable Energy Potential and Available Capacity for Wind and Solar Power in Morocco Towards 2030. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Azeroual-Mohamed/publication/323890276_Renewable_Energy_Potential_and_Available_Capacity_for_Wind_and_Solar_Power_in_Morocco_Towards_2030/links/5c5324e992851c22a39e3710/Renewable-Energy-Potential-and-Available-Capacity-for-Wind-and-Solar-Power-in-Morocco-Towards-2030.pdf, zuletzt geprüft am 28.11.2023.
- [67] Molina, Alejandra; Falvey, Mark; Rondanelli, Roberto (2017): A solar radiation database for Chile. In: *Scientific reports* 7 (1). DOI: 10.1038/s41598-017-13761-x.
- [68] Müller-Syring, Gert; et al. (2013): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. Online verfügbar unter https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g1_07_10.pdf, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- [69] O. Verf.: Hydrogen society roadmap for South Africa 2021. Online verfügbar unter <https://www.dst.gov.za/index.php/resource-center/reports/strategies-and-reports/3574-hydrogen-society-roadmap-for-south-africa-2021>, zuletzt geprüft am 13.11.2023.
- [70] O. Verf.: Meerwasserentsalzung. Online verfügbar unter https://www.chemie.de/lexikon/Meerwasserentsalzung.html#_note-0/, zuletzt geprüft am 20.04.2023.

- [71] O. Verf.: Meerwasserentsalzungsanlage. Online verfügbar unter <https://www.ksb.com/de-global/kreiselpumpenlexikon/artikel/meerwasserentsalzungsanlage-1075930>, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- [72] O. Verf.: ROAD MAP TO A US HYDROGEN ECONOMY. Reducing emissions and driving growth across the nation. Online verfügbar unter <https://h2fc.org/sites/default/files/Road+Map+to+a+US+Hydrogen+Economy+Full+Report.pdf>, zuletzt geprüft am 04.10.2023.
- [73] O. Verf.: So funktioniert Umkehrosmose. Online verfügbar unter <https://www.filterzentrale.com/so-funktioniert-umkehrosmose>, zuletzt geprüft am 20.10.2023.
- [74] O. Verf.: U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap. Online verfügbar unter <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>, zuletzt geprüft am 04.10.2023.
- [75] O. Verf.: Wasserstoff. Online verfügbar unter <https://www.chemie.de/lexikon/Wasserstoff.html>, zuletzt geprüft am 25.10.2023.
- [76] O. Verf. (2023): Chile Landwirtschaftlicher Wasserverbrauch, 1958-2022. Online verfügbar unter <https://knoema.de/atlas/Chile/topics/Wasser/Wasserverbrauch/Landwirtschaftlicher-Wasserverbrauch>, zuletzt geprüft am 31.12.2023.
- [77] O. Verf. (2023): Chile Wasserressourcen: Gesamte erneuerbare Wasserressourcen (natürlich), 1958-2022. Online verfügbar unter <https://knoema.de/atlas/Chile/topics/Wasser/Erneuerbare-Wasserressourcen-insgesamt/Wasserressourcen-Gesamte-erneuerbare-Wasserressourcen-nat%C3%BCrlich>, zuletzt geprüft am 31.12.2023.
- [78] Oates, Caroline (2021): Market potential for Hydrogen in France and implications on the power market – February 2021. In: *Aurora Energy Research*, 17.02.2021. Online verfügbar unter <https://auroraer.com/insight/market-potential-for-hydrogen-in-france-and-implications-on-the-power-market-february-2021/>, zuletzt geprüft am 07.01.2024.
- [79] Paschotta, Rüdiger: Wasserstoff. RP Photonics AG. Online verfügbar unter <https://www.energie-lexikon.info/wasserstoff.html>, zuletzt geprüft am 03.01.2024.
- [80] Perra, Alexandre: Decarbonised hydrogen imports into the European Union: challenges and opportunities 2021. Online verfügbar unter https://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2021/10/WEC-Europe_Hydrogen-Import-Study.pdf, zuletzt geprüft am 04.10.2023.
- [81] REI - Renewable Energy Institute (2022): Re-examining Japan's Hydrogen Strategy. Moving Beyond the "Hydrogen Society" Fantasy. Online verfügbar unter https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_JapanHydrogenStrategy_EN_202209.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- [82] REI - Renewable Energy Institute (2023): Revised Basic Hydrogen Strategy Offers No Clear Path to Carbon Neutrality. [Position Paper]. Online verfügbar unter https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_Hydrogen_PositionPaper_2023_EN.pdf, zuletzt geprüft am 28.11.2023.
- [83] REN21 (2023): RENEWABLES 2023 GLOBAL STATUS REPORT. Online verfügbar unter https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR-2023_Energy-Supply-Module.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2023.

- [84] Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources: Türkiye Hydrogen Technology Strategy and Roadmap. Online verfügbar unter https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/en/HSP_en/ETKB_Hydrogen_T_Strategies.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2023.
- [85] Ronsiek, Linus; et al. (2022): Potentielle Partnerländer für den Import von grünem Wasserstoff nach Deutschland. Online verfügbar unter https://datapool-bibb.bibb.de/pdfs/Schur-et-al_Kooperationspartner_gruener_Wasserstoff.pdf, zuletzt geprüft am 16.11.2023.
- [86] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2021): Wasserstoff im Klimaschutz. Klasse statt Masse. Berlin: Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Stellungnahme). Online verfügbar unter https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2021_06_stellungnahme_wasserstoff_im_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 12.10.2023.
- [87] Sauermost, Michael (2021): Pläne für Produktion von Wasserstoff konkretisieren sich. In: *GTAI*, 11.10.2021. Online verfügbar unter <https://www.gtai.de/de/trade/marokko/branchen/plaene-fuer-produktion-von-wasserstoff-konkretisieren-sich-720566>, zuletzt geprüft am 31.12.2023.
- [88] Sauermost, Michael (2022): Investitionen in die Wasserstoffindustrie sollen starten. In: *GTAI*, 18.01.2022. Online verfügbar unter <https://www.gtai.de/de/trade/marokko/branchen/investitionen-in-die-wasserstoffindustrie-sollen-starten-782678>, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- [89] Schmitt, Stefanie (2022): Chile treibt die Energiewende voran. In: *GTAI*, 14.04.2022. Online verfügbar unter <https://www.gtai.de/de/trade/chile/branchen/chile-treibt-die-energiewende-voran-827364>, zuletzt geprüft am 31.12.2023.
- [90] Schöttler, Maren (2023): Argentina launches its National Hydrogen Strategy. In: *International PtX Hub Berlin*, 15.09.2023. Online verfügbar unter <https://ptx-hub.org/argentina-launches-its-national-hydrogen-strategy/>, zuletzt geprüft am 13.11.2023.
- [91] Sieler, Roman Eric; et al. (2021): Hydrogen Factsheet - Japan. Online verfügbar unter <https://adelphi.de/system/files/mediathek/bilder/H2%20Factsheet%20Japan.pdf>, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- [92] South Korean Ministry of Trade, Industry and Energy: HYDROGEN ECONOMY Roadmap of Korea. Online verfügbar unter https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_fc2f37727595437590891a3c7ca0d025.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2023.
- [93] Statista: Größte Volkswirtschaften (BIP) weltweit | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157841/umfrage/ranking-der-20-laender-mit-dem-groessten-bruttoinlandsprodukt/>, zuletzt geprüft am 30.10.2023.
- [94] Statista (2023): Industrieunternehmen nach Bundesländern 2022. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/311388/umfrage/industrieunternehmen-in-deutschland-nach-bundeslaendern/>, zuletzt geprüft am 22.11.2023.
- [95] Statista (2023): Projected demand of carbon-free hydrogen in France in 2030, by sector. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/1344432/decarbonized-green-hydrogen-demand-by-sector-projection-france/>, zuletzt geprüft am 31.10.2023.
- [96] Statista Research Department (2022): Forecast capacity of electrolyzers worldwide in 2030 and 2050, by region. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/1320660/worldwide-electrolyzer-capacity-by-region/>, zuletzt aktualisiert am 06.11.2023, zuletzt geprüft am 06.11.2023.

- [97] Statistische Ämter des Bundes und der Länder | Gemeinsames Statistikportal: H2O | Statistikportal.de. Online verfügbar unter <https://www.statistikportal.de/de/ugrdl/ergebnisse/wasser-und-abwasser/h2o#6164>, zuletzt geprüft am 09.01.2024.
- [98] Teichmann, Franziska; et al.: Wasserstoff in Kanada. Status Quo, Debatten und Potenziale 2021. Online verfügbar unter https://adelphi.de/en/system/files/mediathek/bilder/Hintergrundstudie%20Wasserstoff%20in%20Kanada_fv.pdf, zuletzt geprüft am 14.10.2023.
- [99] Tjarks, Geert (2017): PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen. Online verfügbar unter <https://publications.rwth-aachen.de/record/689617/files/689617.pdf>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.
- [100] Tüv Nord: Elektrolyse von Wasser zur Herstellung von Wasserstoff. Online verfügbar unter <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/herstellung/elektrolyse-von-wasser/>, zuletzt geprüft am 20.10.2023.
- [101] Umweltbundesamt: Handlungsfeld Wasser, Hochwasser- und Küstenschutz. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimafolgen-deutschland/klimafolgen-handlungsfeld-wasser-hochwasser>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.
- [102] Umweltbundesamt (2022): Wasserressourcen und ihre Nutzung. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#wassernachfrage>, zuletzt geprüft am 31.12.2023.
- [103] Wahabzada, Farhanja; et al. (2022): H2-Business-Guide. Bilaterale Energiepartnerschaften in Entwicklungs- und Schwellenländern. Online verfügbar unter https://www.energypartnership.cl/fileadmin/user_upload/chile/media_elements/H2-Business-Guide_de.pdf, zuletzt geprüft am 18.11.2023.
- [104] Welker, Nada (2020): Wasserstoff (H2) im Fokus der Industrien. In: *Magility GmbH*, 13.10.2020. Online verfügbar unter <https://www.magility.com/wasserstoff-h2-im-fokus-der-industrien/>, zuletzt geprüft am 25.10.2023.
- [105] Wietschel, Martin; et al.: Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats 2021. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Metastudie_Wasserstoff.pdf, zuletzt geprüft am 25.11.2023.
- [106] World Hydrogen & Renewables Italy (2023): Green Hydrogen in Italy. Developments & prospects. Online verfügbar unter https://drive.google.com/file/d/1E1ALj792mN0aAv1sMkunG6pHj5RL9_HK/view?pli=1, zuletzt geprüft am 05.10.2023.
- [107] World Resources Institute (2013): Water Stress by Country. Online verfügbar unter <https://www.wri.org/data/water-stress-country>, zuletzt geprüft am 01.11.2023.
- [108] Zen and the Art of Clean Energy Solutions (Zen) on behalf of the Government of Canada: Hydrogen strategy for Canada. Seizing the Opportunities for Hydrogen A Call to Action 2020. Online verfügbar unter https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf, zuletzt geprüft am 13.10.2023.

8 Anhang

Produktionspotentiale durch Elektrolyse*) [TWh]								
Wirkungsgrad**)	0,7							
Volllaststunden	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
GW	TWh							
2	1,4	2,8	4,2	5,6	7	8,4	9,8	11,2
3	2,1	4,2	6,3	8,4	10,5	12,6	14,7	16,8
4	2,8	5,6	8,4	11,2	14	16,8	19,6	22,4
5	3,5	7	10,5	14	17,5	21	24,5	28
6,5	4,55	9,1	13,65	18,2	22,75	27,3	31,85	36,4
7	4,9	9,8	14,7	19,6	24,5	29,4	34,3	39,2
10	7	14	21	28	35	42	49	56
11	7,7	15,4	23,1	30,8	38,5	46,2	53,9	61,6
14	9,8	19,6	29,4	39,2	49	58,8	68,6	78,4
15	10,5	21	31,5	42	52,5	63	73,5	84
20	14	28	42	56	70	84	98	112
25	17,5	35	52,5	70	87,5	105	122,5	140
30	21	42	63	84	105	126	147	168
40	28	56	84	112	140	168	196	224
50	35	70	105	140	175	210	245	280
55	38,5	77	115,5	154	192,5	231	269,5	308
60	42	84	126	168	210	252	294	336
65	45,5	91	136,5	182	227,5	273	318,5	364
70	49	98	147	196	245	294	343	392
77	53,9	107,8	161,7	215,6	269,5	323,4	377,3	431,2
80	56	112	168	224	280	336	392	448
100	70	140	210	280	350	420	490	560
120	84	168	252	336	420	504	588	672
130	91	182	273	364	455	546	637	728
145	101,5	203	304,5	406	507,5	609	710,5	812
190	133	266	399	532	665	798	931	1064
210	147	294	441	588	735	882	1029	1176
225	157,5	315	472,5	630	787,5	945	1102,5	1260
258	180,6	361,2	541,8	722,4	903	1083,6	1264,2	1444,8
335	234,5	469	703,5	938	1172,5	1407	1641,5	1876
500	350	700	1050	1400	1750	2100	2450	2800
590	413	826	1239	1652	2065	2478	2891	3304
990	693	1386	2079	2772	3465	4158	4851	5544
1248	873,6	1747,2	2620,8	3494,4	4368	5241,6	6115,2	6988,8

Tabelle 92 Produktionspotentiale durch Elektrolyse [TWh]

A

*) Es wurden lediglich die für die Arbeit notwendigen Kapazitäten betrachtet.

**) Der Wirkungsgrad wurde exemplarisch mit 70 % angenommen

Produktionspotentiale durch Elektrolyse*) [Mt]								
Wirkungsgrad**)	0,70							
Volllaststunden	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
GW	Mt							
2	0,04	0,08	0,13	0,17	0,21	0,25	0,29	0,34
3	0,06	0,13	0,19	0,25	0,32	0,38	0,44	0,50
4	0,08	0,17	0,25	0,34	0,42	0,50	0,59	0,67
5	0,11	0,21	0,32	0,42	0,53	0,63	0,74	0,84
6,5	0,14	0,27	0,41	0,55	0,68	0,82	0,96	1,09
7	0,15	0,29	0,44	0,59	0,74	0,88	1,03	1,18
10	0,21	0,42	0,63	0,84	1,05	1,26	1,47	1,68
11	0,23	0,46	0,69	0,92	1,16	1,39	1,62	1,85
14	0,29	0,59	0,88	1,18	1,47	1,77	2,06	2,35
15	0,32	0,63	0,95	1,26	1,58	1,89	2,21	2,52
20	0,42	0,84	1,26	1,68	2,10	2,52	2,94	3,36
25	0,53	1,05	1,58	2,10	2,63	3,15	3,68	4,20
30	0,63	1,26	1,89	2,52	3,15	3,78	4,41	5,05
40	0,84	1,68	2,52	3,36	4,20	5,05	5,89	6,73
50	1,05	2,10	3,15	4,20	5,26	6,31	7,36	8,41
55	1,16	2,31	3,47	4,62	5,78	6,94	8,09	9,25
60	1,26	2,52	3,78	5,05	6,31	7,57	8,83	10,09
65	1,37	2,73	4,10	5,47	6,83	8,20	9,56	10,93
70	1,47	2,94	4,41	5,89	7,36	8,83	10,30	11,77
77	1,62	3,24	4,86	6,47	8,09	9,71	11,33	12,95
80	1,68	3,36	5,05	6,73	8,41	10,09	11,77	13,45
100	2,10	4,20	6,31	8,41	10,51	12,61	14,71	16,82
120	2,52	5,05	7,57	10,09	12,61	15,14	17,66	20,18
130	2,73	5,47	8,20	10,93	13,66	16,40	19,13	21,86
145	3,05	6,10	9,14	12,19	15,24	18,29	21,34	24,38
190	3,99	7,99	11,98	15,98	19,97	23,96	27,96	31,95
210	4,41	8,83	13,24	17,66	22,07	26,49	30,90	35,32
225	4,73	9,46	14,19	18,92	23,65	28,38	33,11	37,84
258	5,42	10,85	16,27	21,69	27,12	32,54	37,96	43,39
335	7,04	14,08	21,13	28,17	35,21	42,25	49,29	56,34
500	10,51	21,02	31,53	42,04	52,55	63,06	73,57	84,08
590	12,40	24,80	37,21	49,61	62,01	74,41	86,82	99,22
990	20,81	41,62	62,43	83,24	104,05	124,86	145,68	166,49
1248	26,23	52,47	78,70	104,94	131,17	157,41	183,64	209,87

Tabelle 93 Produktionspotentiale durch Elektrolyse [Mt]

B

*) Es wurden lediglich die für die Arbeit notwendigen Kapazitäten betrachtet.

**) Der Wirkungsgrad wurde exemplarisch mit 70 % angenommen

Basiswerte der Bundesländer zur weiteren Betrachtung und Verteilung der importierten Wassermengen				
Bundesländer	Industrieunternehmen	Anteil der Unternehmen	Gesamter Wassereinsatz [Mill. m ³]	Anteil am Gesamtwassereinsatz
Nordrhein-Westfalen	62.170,00	20%	5.509,79	22%
Baden-Württemberg	52.180,00	16%	4.322,05	17%
Bayern	66.986,00	21%	3.552,59	14%
Schleswig-Holstein	12.060,00	4%	2.277,65	9%
Rheinland-Pfalz	15.825,00	5%	2.263,69	9%
Niedersachsen	28.259,00	9%	1.791,64	7%
Hessen	20.379,00	6%	1.572,76	6%
Bremen	1.755,00	1%	793,92	3%
Sachsen	15.569,00	5%	682,90	3%
Brandenburg	7.868,00	2%	629,46	2%
Hamburg	3.827,00	1%	501,18	2%
Sachsen-Anhalt	7.189,00	2%	463,15	2%
Berlin	6.064,00	2%	432,85	2%
Thüringen	8.816,00	3%	240,71	1%
Saarland	3.283,00	1%	238,58	1%
Mecklenburg-Vorpommern	5.100,00	2%	208,79	1%
Gesamt	317.330,00	100%	25.481,71	100%

Tabelle 94 Basiswerte der Bundesländer zur weiteren Betrachtung und Verteilung der importierten Wassermengen

Wassereinsatz der Wirtschaftszweige*) und privaten Haushalte 2019 nach Bundesländern**)									
Mill. m ³									
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte
Nordrhein-Westfalen	5.509,79	51,98	2.072,56	1.259,15	142,22	7,21	989,82	162,61	824,24
Baden-Württemberg	4.322,05	32,26	446,04	2.226,45	99,75	8,33	949,32	101,48	458,41
Bayern	3.552,59	83,28	873,50	1.011,20	125,23	9,12	742,11	124,25	583,90
Schleswig-Holstein	2.277,65	20,54	94,05	1.963,89	16,10	2,03	30,73	26,19	124,11
Rheinland-Pfalz	2.263,69	25,04	1.538,99	142,15	33,31	3,00	306,55	43,38	171,26
Niedersachsen	1.791,64	254,06	302,30	488,31	50,99	4,92	88,45	237,08	365,53
Hessen	1.572,76	17,12	308,30	327,36	88,28	2,40	486,80	73,45	269,07
Bremen	793,92	0,13	62,66	683,82	2,35	0,22	11,33	6,40	27,01
Sachsen	682,90	12,93	284,56	60,60	29,67	3,73	127,43	33,36	130,63
Brandenburg	629,46	30,36	301,33	143,51	14,16	1,71	18,98	19,01	100,40
Hamburg	501,18	k.A.	195,62	k.A.	6,41	0,32	72,72	10,29	85,44
Sachsen-Anhalt	463,15	29,97	249,60	29,59	17,82	3,13	22,88	33,45	76,72
Berlin	432,85	0,06	6,07	192,68	12,92	3,11	7,21	65,84	144,96
Thüringen	240,71	7,80	57,70	1,79	25,47	6,79	56,98	17,75	66,43
Saarland ¹⁾	238,58	k.A.	49,18	k.A.	7,96	0,48	108,53	8,58	38,89
Mecklenburg-Vorpommern	208,79	49,57	53,94	7,21	7,26	1,06	11,55	15,95	62,26
Summe aller Bundesländer	25.481,71	615,10	6.896,40	8.537,71	679,90	57,56	4.031,39	979,07	3.529,26

Tabelle 95 Wassereinsatz der Wirtschaftszweige und privaten Haushalte 2019 nach Bundesländern; [98]

D

*) Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008

**) vorläufige Werte

1) Ergebnisse beruhen größtenteils auf Basisdaten von 2016

Aufteilung der importierten Wassermenge von 2030 (min.) nach Anteil am Gesamtwasserverbrauch der Bundesländer											
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte	Anteil am Wasserverbrauch	Anteil an importierter Wassermenge 2030 min. [Mill. m3]
Nordrhein-Westfalen	0,05%	5,41%	0,14%	0,22%	1,98%	38,97%	0,28%	1,73%	0,34%	22%	2,81
Baden-Württemberg	0,05%	6,73%	0,49%	0,10%	2,18%	26,05%	0,23%	2,14%	0,47%	17%	2,17
Bayern	0,05%	2,15%	0,20%	0,18%	1,43%	19,63%	0,24%	1,44%	0,31%	14%	1,79
Schleswig-Holstein	0,05%	5,60%	1,22%	0,06%	7,14%	56,65%	3,74%	4,39%	0,93%	9%	1,15
Rheinland-Pfalz	0,05%	4,59%	0,07%	0,81%	3,45%	38,33%	0,38%	2,65%	0,67%	9%	1,15
Niedersachsen	0,05%	0,35%	0,29%	0,18%	1,75%	18,09%	1,01%	0,38%	0,24%	7%	0,89
Hessen	0,05%	4,50%	0,25%	0,24%	0,87%	32,08%	0,16%	1,05%	0,29%	6%	0,77
Bremen	0,05%	292,31%	0,61%	0,06%	16,17%	172,73%	3,35%	5,94%	1,41%	3%	0,38
Sachsen	0,06%	2,94%	0,13%	0,63%	1,28%	10,19%	0,30%	1,14%	0,29%	3%	0,38
Brandenburg	0,04%	0,86%	0,09%	0,18%	1,84%	15,20%	1,37%	1,37%	0,26%	2%	0,26
Hamburg	0,05%	k.A.	0,13%	k.A.	4,06%	81,25%	0,36%	2,53%	0,30%	2%	0,26
Sachsen-Anhalt	0,06%	0,87%	0,10%	0,88%	1,46%	8,31%	1,14%	0,78%	0,34%	2%	0,26
Berlin	0,06%	433,33%	4,28%	0,13%	2,01%	8,36%	3,61%	0,39%	0,18%	2%	0,26
Thüringen	0,05%	1,67%	0,23%	7,26%	0,51%	1,91%	0,23%	0,73%	0,20%	1%	0,13
Saarland ¹⁾	0,05%	k.A.	0,26%	k.A.	1,63%	27,08%	0,12%	1,52%	0,33%	1%	0,13
Mecklenburg-Vorpommern	0,06%	0,26%	0,24%	1,80%	1,79%	12,26%	1,13%	0,82%	0,21%	1%	0,13

Tabelle 96 Aufteilung der importierten Wassermenge von 2030 (min.) nach Anteil am Gesamtwasserverbrauch der Bundesländer

Aufteilung der importierten Wassermenge von 2030 (max.) nach Anteil am Gesamtwasserverbrauch der Bundesländer											
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte	Anteil am Wasserverbrauch	Anteil an importierter Wassermenge 2030 max. [Mill. m3]
Nordrhein-Westfalen	0,10%	10,33%	0,26%	0,43%	3,78%	74,48%	0,54%	3,30%	0,65%	22%	5,37
Baden-Württemberg	0,10%	12,86%	0,93%	0,19%	4,16%	49,82%	0,44%	4,09%	0,91%	17%	4,15
Bayern	0,10%	4,11%	0,39%	0,34%	2,73%	37,50%	0,46%	2,75%	0,59%	14%	3,42
Schleswig-Holstein	0,10%	10,71%	2,34%	0,11%	13,66%	108,37%	7,16%	8,40%	1,77%	9%	2,20
Rheinland-Pfalz	0,10%	8,79%	0,14%	1,55%	6,60%	73,33%	0,72%	5,07%	1,28%	9%	2,20
Niedersachsen	0,10%	0,67%	0,57%	0,35%	3,35%	34,76%	1,93%	0,72%	0,47%	7%	1,71
Hessen	0,09%	8,59%	0,48%	0,45%	1,67%	61,25%	0,30%	2,00%	0,55%	6%	1,47
Bremen	0,09%	561,54%	1,17%	0,11%	31,06%	331,82%	6,44%	11,41%	2,70%	3%	0,73
Sachsen	0,11%	5,65%	0,26%	1,20%	2,46%	19,57%	0,57%	2,19%	0,56%	3%	0,73
Brandenburg	0,08%	1,61%	0,16%	0,34%	3,46%	28,65%	2,58%	2,58%	0,49%	2%	0,49
Hamburg	0,10%	k.A.	0,25%	k.A.	7,64%	153,13%	0,67%	4,76%	0,57%	2%	0,49
Sachsen-Anhalt	0,11%	1,63%	0,20%	1,66%	2,75%	15,65%	2,14%	1,46%	0,64%	2%	0,49
Berlin	0,11%	816,67%	8,07%	0,25%	3,79%	15,76%	6,80%	0,74%	0,34%	2%	0,49
Thüringen	0,10%	3,08%	0,42%	13,41%	0,94%	3,53%	0,42%	1,35%	0,36%	1%	0,24
Saarland ¹⁾	0,10%	k.A.	0,49%	k.A.	3,02%	50,00%	0,22%	2,80%	0,62%	1%	0,24
Mecklenburg-Vorpommern	0,11%	0,48%	0,44%	3,33%	3,31%	22,64%	2,08%	1,50%	0,39%	1%	0,24

Tabelle 97 Aufteilung der importierten Wassermenge von 2030 (max.) nach Anteil am Gesamtwasserverbrauch der Bundesländer

Aufteilung der importierten Wassermenge von 2050 (min.) nach Anteil am Gesamtwasserverbrauch der Bundesländer											
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte	Anteil am Wasserverbrauch	Anteil an importierter Wassermenge 2050 min. [Mill. m3]
Nordrhein-Westfalen	0,06%	6,25%	0,16%	0,26%	2,29%	45,08%	0,33%	2,00%	0,39%	22%	3,25
Baden-Württemberg	0,06%	7,78%	0,56%	0,11%	2,52%	30,13%	0,26%	2,47%	0,55%	17%	2,51
Bayern	0,06%	2,49%	0,24%	0,20%	1,65%	22,70%	0,28%	1,67%	0,35%	14%	2,07
Schleswig-Holstein	0,06%	6,48%	1,41%	0,07%	8,26%	65,52%	4,33%	5,08%	1,07%	9%	1,33
Rheinland-Pfalz	0,06%	5,31%	0,09%	0,94%	3,99%	44,33%	0,43%	3,07%	0,78%	9%	1,33
Niedersachsen	0,06%	0,41%	0,34%	0,21%	2,02%	20,93%	1,16%	0,43%	0,28%	7%	1,03
Hessen	0,06%	5,20%	0,29%	0,27%	1,01%	37,08%	0,18%	1,21%	0,33%	6%	0,89
Bremen	0,06%	338,46%	0,70%	0,06%	18,72%	200,00%	3,88%	6,88%	1,63%	3%	0,44
Sachsen	0,06%	3,40%	0,15%	0,73%	1,48%	11,80%	0,35%	1,32%	0,34%	3%	0,44
Brandenburg	0,05%	0,99%	0,10%	0,21%	2,12%	17,54%	1,58%	1,58%	0,30%	2%	0,30
Hamburg	0,06%	k.A.	0,15%	k.A.	4,68%	93,75%	0,41%	2,92%	0,35%	2%	0,30
Sachsen-Anhalt	0,06%	1,00%	0,12%	1,01%	1,68%	9,58%	1,31%	0,90%	0,39%	2%	0,30
Berlin	0,07%	500,00%	4,94%	0,16%	2,32%	9,65%	4,16%	0,46%	0,21%	2%	0,30
Thüringen	0,06%	1,92%	0,26%	8,38%	0,59%	2,21%	0,26%	0,85%	0,23%	1%	0,15
Saarland ¹⁾	0,06%	k.A.	0,31%	k.A.	1,88%	31,25%	0,14%	1,75%	0,39%	1%	0,15
Mecklenburg-Vorpommern	0,07%	0,30%	0,28%	2,08%	2,07%	14,15%	1,30%	0,94%	0,24%	1%	0,15

Tabelle 98 Aufteilung der importierten Wassermenge von 2050 (min.) nach Anteil am Gesamtwasserverbrauch der Bundesländer

Aufteilung der importierten Wassermenge von 2050 (max.) nach Anteil am Gesamtwasserverbrauch der Bundesländer											
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte	Anteil am Wasserverbrauch	Anteil an importierter Wassermenge 2050 max. [Mill. m3]
Nordrhein-Westfalen	0,43%	45,46%	1,14%	1,88%	16,62%	327,74%	2,39%	14,53%	2,87%	22%	23,63
Baden-Württemberg	0,42%	56,60%	4,09%	0,82%	18,31%	219,21%	1,92%	17,99%	3,98%	17%	18,26
Bayern	0,42%	18,05%	1,72%	1,49%	12,00%	164,80%	2,03%	12,10%	2,57%	14%	15,03
Schleswig-Holstein	0,42%	47,08%	10,28%	0,49%	60,06%	476,35%	31,47%	36,92%	7,79%	9%	9,67
Rheinland-Pfalz	0,43%	38,62%	0,63%	6,80%	29,03%	322,33%	3,15%	22,29%	5,65%	9%	9,67
Niedersachsen	0,42%	2,96%	2,49%	1,54%	14,75%	152,85%	8,50%	3,17%	2,06%	7%	7,52
Hessen	0,41%	37,62%	2,09%	1,97%	7,29%	268,33%	1,32%	8,77%	2,39%	6%	6,44
Bremen	0,41%	2476,92%	5,14%	0,47%	137,02%	1463,64%	28,42%	50,31%	11,92%	3%	3,22
Sachsen	0,47%	24,90%	1,13%	5,31%	10,85%	86,33%	2,53%	9,65%	2,46%	3%	3,22
Brandenburg	0,34%	7,08%	0,71%	1,50%	15,18%	125,73%	11,33%	11,31%	2,14%	2%	2,15
Hamburg	0,43%	k.A.	1,10%	k.A.	33,54%	671,88%	2,96%	20,89%	2,52%	2%	2,15
Sachsen-Anhalt	0,46%	7,17%	0,86%	7,27%	12,07%	68,69%	9,40%	6,43%	2,80%	2%	2,15
Berlin	0,50%	3583,33%	35,42%	1,12%	16,64%	69,13%	29,82%	3,27%	1,48%	2%	2,15
Thüringen	0,44%	13,72%	1,85%	59,78%	4,20%	15,76%	1,88%	6,03%	1,61%	1%	1,07
Saarland ¹⁾	0,45%	k.A.	2,18%	k.A.	13,44%	222,92%	0,99%	12,47%	2,75%	1%	1,07
Mecklenburg-Vorpommern	0,51%	2,16%	1,98%	14,84%	14,74%	100,94%	9,26%	6,71%	1,72%	1%	1,07

Tabelle 99 Aufteilung der importierten Wassermenge von 2050 (max.) nach Anteil am Gesamtwasserverbrauch der Bundesländer

Aufteilung der importierten Wassermenge von 2030 (min.) nach Anteil Industrieunternehmen der Bundesländer											
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte	Anteil an Industrieunternehmen	Anteil an importierter Wassermenge 2030 min. [Mill. m3]
Nordrhein-Westfalen	0,05%	4,91%	0,12%	0,20%	1,79%	35,37%	0,26%	1,57%	0,31%	20%	2,55
Baden-Württemberg	0,05%	6,32%	0,46%	0,09%	2,05%	24,49%	0,21%	2,01%	0,45%	16%	2,04
Bayern	0,08%	3,22%	0,31%	0,27%	2,14%	29,39%	0,36%	2,16%	0,46%	21%	2,68
Schleswig-Holstein	0,02%	2,48%	0,54%	0,03%	3,17%	25,12%	1,66%	1,95%	0,41%	4%	0,51
Rheinland-Pfalz	0,03%	2,56%	0,04%	0,45%	1,92%	21,33%	0,21%	1,48%	0,37%	5%	0,64
Niedersachsen	0,06%	0,45%	0,38%	0,24%	2,26%	23,37%	1,30%	0,49%	0,31%	9%	1,15
Hessen	0,05%	4,50%	0,25%	0,24%	0,87%	32,08%	0,16%	1,05%	0,29%	6%	0,77
Bremen	0,02%	100,00%	0,21%	0,02%	5,53%	59,09%	1,15%	2,03%	0,48%	1%	0,13
Sachsen	0,09%	4,95%	0,22%	1,06%	2,16%	17,16%	0,50%	1,92%	0,49%	5%	0,64
Brandenburg	0,04%	0,86%	0,09%	0,18%	1,84%	15,20%	1,37%	1,37%	0,26%	2%	0,26
Hamburg	0,03%	k.A.	0,07%	k.A.	2,03%	40,63%	0,18%	1,26%	0,15%	1%	0,13
Sachsen-Anhalt	0,06%	0,87%	0,10%	0,88%	1,46%	8,31%	1,14%	0,78%	0,34%	2%	0,26
Berlin	0,06%	433,33%	4,28%	0,13%	2,01%	8,36%	3,61%	0,39%	0,18%	2%	0,26
Thüringen	0,16%	4,87%	0,66%	21,23%	1,49%	5,60%	0,67%	2,14%	0,57%	3%	0,38
Saarland ¹⁾	0,05%	k.A.	0,26%	k.A.	1,63%	27,08%	0,12%	1,52%	0,33%	1%	0,13
Mecklenburg-Vorpommern	0,12%	0,52%	0,48%	3,61%	3,58%	24,53%	2,25%	1,63%	0,42%	2%	0,26

Tabelle 100 Aufteilung der importierten Wassermenge von 2030 (min.) nach Anteil an Industrieunternehmen der Bundesländer

Aufteilung der importierten Wassermenge von 2030 (max.) nach Anteil an Industrieunternehmen der Bundesländer											
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte	Anteil an Industrieunternehmen	Anteil an importierter Wassermenge 2030 max. [Mill. m3]
Nordrhein-Westfalen	0,09%	9,41%	0,24%	0,39%	3,44%	67,82%	0,49%	3,01%	0,59%	20%	4,89
Baden-Württemberg	0,09%	12,12%	0,88%	0,18%	3,92%	46,94%	0,41%	3,85%	0,85%	16%	3,91
Bayern	0,14%	6,16%	0,59%	0,51%	4,10%	56,25%	0,69%	4,13%	0,88%	21%	5,13
Schleswig-Holstein	0,04%	4,77%	1,04%	0,05%	6,09%	48,28%	3,19%	3,74%	0,79%	4%	0,98
Rheinland-Pfalz	0,05%	4,87%	0,08%	0,86%	3,66%	40,67%	0,40%	2,81%	0,71%	5%	1,22
Niedersachsen	0,12%	0,87%	0,73%	0,45%	4,31%	44,72%	2,49%	0,93%	0,60%	9%	2,20
Hessen	0,09%	8,59%	0,48%	0,45%	1,67%	61,25%	0,30%	2,00%	0,55%	6%	1,47
Bremen	0,03%	184,62%	0,38%	0,04%	10,21%	109,09%	2,12%	3,75%	0,89%	1%	0,24
Sachsen	0,18%	9,44%	0,43%	2,01%	4,11%	32,71%	0,96%	3,66%	0,93%	5%	1,22
Brandenburg	0,08%	1,61%	0,16%	0,34%	3,46%	28,65%	2,58%	2,58%	0,49%	2%	0,49
Hamburg	0,05%	k.A.	0,12%	k.A.	3,74%	75,00%	0,33%	2,33%	0,28%	1%	0,24
Sachsen-Anhalt	0,11%	1,63%	0,20%	1,66%	2,75%	15,65%	2,14%	1,46%	0,64%	2%	0,49
Berlin	0,11%	816,67%	8,07%	0,25%	3,79%	15,76%	6,80%	0,74%	0,34%	2%	0,49
Thüringen	0,30%	9,36%	1,27%	40,78%	2,87%	10,75%	1,28%	4,11%	1,10%	3%	0,73
Saarland ¹⁾	0,10%	k.A.	0,49%	k.A.	3,02%	50,00%	0,22%	2,80%	0,62%	1%	0,24
Mecklenburg-Vorpommern	0,23%	0,99%	0,91%	6,80%	6,75%	46,23%	4,24%	3,07%	0,79%	2%	0,49

Tabelle 101 Aufteilung der importierten Wassermenge von 2030 (max.) nach Anteil an Industrieunternehmen der Bundesländer

Aufteilung der importierten Wassermenge von 2050 (min.) nach Anteil an Industrieunternehmen der Bundesländer											
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte	Anteil an Industrieunternehmen	Anteil an importierter Wassermenge 2050 min. [Mill. m3]
Nordrhein-Westfalen	0,05%	5,68%	0,14%	0,23%	2,07%	40,92%	0,30%	1,81%	0,36%	20%	2,95
Baden-Württemberg	0,05%	7,32%	0,53%	0,11%	2,37%	28,33%	0,25%	2,33%	0,51%	16%	2,36
Bayern	0,09%	3,72%	0,35%	0,31%	2,48%	33,99%	0,42%	2,49%	0,53%	21%	3,10
Schleswig-Holstein	0,03%	2,87%	0,63%	0,03%	3,66%	29,06%	1,92%	2,25%	0,48%	4%	0,59
Rheinland-Pfalz	0,03%	2,96%	0,05%	0,52%	2,22%	24,67%	0,24%	1,71%	0,43%	5%	0,74
Niedersachsen	0,07%	0,52%	0,44%	0,27%	2,61%	27,03%	1,50%	0,56%	0,36%	9%	1,33
Hessen	0,06%	5,20%	0,29%	0,27%	1,01%	37,08%	0,18%	1,21%	0,33%	6%	0,89
Bremen	0,02%	115,38%	0,24%	0,02%	6,38%	68,18%	1,32%	2,34%	0,56%	1%	0,15
Sachsen	0,11%	5,72%	0,26%	1,22%	2,49%	19,84%	0,58%	2,22%	0,57%	5%	0,74
Brandenburg	0,05%	0,99%	0,10%	0,21%	2,12%	17,54%	1,58%	1,58%	0,30%	2%	0,30
Hamburg	0,03%	k.A.	0,08%	k.A.	2,34%	46,88%	0,21%	1,46%	0,18%	1%	0,15
Sachsen-Anhalt	0,06%	1,00%	0,12%	1,01%	1,68%	9,58%	1,31%	0,90%	0,39%	2%	0,30
Berlin	0,07%	500,00%	4,94%	0,16%	2,32%	9,65%	4,16%	0,46%	0,21%	2%	0,30
Thüringen	0,18%	5,64%	0,76%	24,58%	1,73%	6,48%	0,77%	2,48%	0,66%	3%	0,44
Saarland ¹⁾	0,06%	k.A.	0,31%	k.A.	1,88%	31,25%	0,14%	1,75%	0,39%	1%	0,15
Mecklenburg-Vorpommern	0,14%	0,61%	0,56%	4,16%	4,13%	28,30%	2,60%	1,88%	0,48%	2%	0,30

Tabelle 102 Aufteilung der importierten Wassermenge von 2050 (min.) nach Anteil an Industrieunternehmen der Bundesländer

Aufteilung der importierten Wassermenge von 2050 (max.) nach Anteil an Industrieunternehmen der Bundesländer											
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte	Anteil an Industrieunternehmen	Anteil an importierter Wassermenge 2050 max. [Mill. m3]
Nordrhein-Westfalen	0,39%	41,32%	1,04%	1,71%	15,10%	297,92%	2,17%	13,21%	2,61%	20%	21,48
Baden-Württemberg	0,40%	53,25%	3,85%	0,77%	17,22%	206,24%	1,81%	16,93%	3,75%	16%	17,18
Bayern	0,63%	27,08%	2,58%	2,23%	18,01%	247,26%	3,04%	18,15%	3,86%	21%	22,55
Schleswig-Holstein	0,19%	20,93%	4,57%	0,22%	26,71%	211,82%	13,99%	16,42%	3,46%	4%	4,30
Rheinland-Pfalz	0,24%	21,45%	0,35%	3,78%	16,12%	179,00%	1,75%	12,38%	3,14%	5%	5,37
Niedersachsen	0,54%	3,81%	3,20%	1,98%	18,96%	196,54%	10,93%	4,08%	2,65%	9%	9,67
Hessen	0,41%	37,62%	2,09%	1,97%	7,29%	268,33%	1,32%	8,77%	2,39%	6%	6,44
Bremen	0,13%	823,08%	1,71%	0,16%	45,53%	486,36%	9,44%	16,72%	3,96%	1%	1,07
Sachsen	0,79%	41,53%	1,89%	8,86%	18,10%	143,97%	4,21%	16,10%	4,11%	5%	5,37
Brandenburg	0,34%	7,08%	0,71%	1,50%	15,18%	125,73%	11,33%	11,31%	2,14%	2%	2,15
Hamburg	0,21%	k.A.	0,55%	k.A.	16,69%	334,38%	1,47%	10,40%	1,25%	1%	1,07
Sachsen-Anhalt	0,46%	7,17%	0,86%	7,27%	12,07%	68,69%	9,40%	6,43%	2,80%	2%	2,15
Berlin	0,50%	3583,33%	35,42%	1,12%	16,64%	69,13%	29,82%	3,27%	1,48%	2%	2,15
Thüringen	1,34%	41,28%	5,58%	179,89%	12,64%	47,42%	5,65%	18,14%	4,85%	3%	3,22
Saarland ¹⁾	0,45%	k.A.	2,18%	k.A.	13,44%	222,92%	0,99%	12,47%	2,75%	1%	1,07
Mecklenburg-Vorpommern	1,03%	4,34%	3,99%	29,82%	29,61%	202,83%	18,61%	13,48%	3,45%	2%	2,15

Tabelle 103 Aufteilung der importierten Wassermenge von 2050 (max.) nach Anteil an Industrieunternehmen der Bundesländer

Anteil der gesamtiportierten Wassermenge von 2030 (min.) an Verbräuchen der Bundesländer									
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte
Nordrhein-Westfalen	0,23%	24,53%	0,62%	1,01%	8,96%	176,84%	1,29%	7,84%	1,55%
Baden-Württemberg	0,29%	39,52%	2,86%	0,57%	12,78%	153,06%	1,34%	12,56%	2,78%
Bayern	0,36%	15,31%	1,46%	1,26%	10,18%	139,80%	1,72%	10,26%	2,18%
Schleswig-Holstein	0,56%	62,07%	13,56%	0,65%	79,19%	628,08%	41,49%	48,68%	10,27%
Rheinland-Pfalz	0,56%	50,92%	0,83%	8,97%	38,28%	425,00%	4,16%	29,39%	7,44%
Niedersachsen	0,71%	5,02%	4,22%	2,61%	25,00%	259,15%	14,41%	5,38%	3,49%
Hessen	0,81%	74,47%	4,14%	3,89%	14,44%	531,25%	2,62%	17,36%	4,74%
Bremen	1,61%	9807,69%	20,35%	1,86%	542,55%	5795,45%	112,53%	199,22%	47,20%
Sachsen	1,87%	98,61%	4,48%	21,04%	42,97%	341,82%	10,01%	38,22%	9,76%
Brandenburg	2,03%	42,00%	4,23%	8,88%	90,04%	745,61%	67,18%	67,07%	12,70%
Hamburg	2,54%	k.A.	6,52%	k.A.	198,91%	3984,38%	17,53%	123,91%	14,92%
Sachsen-Anhalt	2,75%	42,54%	5,11%	43,09%	71,55%	407,35%	55,73%	38,12%	16,62%
Berlin	2,95%	21250,00%	210,05%	6,62%	98,68%	409,97%	176,84%	19,37%	8,80%
Thüringen	5,30%	163,46%	22,10%	712,29%	50,06%	187,78%	22,38%	71,83%	19,19%
Saarland ¹⁾	5,34%	k.A.	25,93%	k.A.	160,18%	2656,25%	11,75%	148,60%	32,78%
Mecklenburg-Vorpommern	6,11%	25,72%	23,64%	176,84%	175,62%	1202,83%	110,39%	79,94%	20,48%

Tabelle 104 Anteil der gesamtiportierten Wassermenge von 2030 (min.) an Verbräuchen der Bundesländer

Anteil der gesamtiportierten Wassermenge von 2030 (max.) an Verbräuchen der Bundesländer									
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte
Nordrhein-Westfalen	0,44%	47,00%	1,18%	1,94%	17,18%	338,83%	2,47%	15,02%	2,96%
Baden-Württemberg	0,57%	75,73%	5,48%	1,10%	24,49%	293,28%	2,57%	24,07%	5,33%
Bayern	0,69%	29,33%	2,80%	2,42%	19,51%	267,87%	3,29%	19,66%	4,18%
Schleswig-Holstein	1,07%	118,94%	25,98%	1,24%	151,74%	1203,45%	79,50%	93,28%	19,68%
Rheinland-Pfalz	1,08%	97,56%	1,59%	17,19%	73,34%	814,33%	7,97%	56,32%	14,26%
Niedersachsen	1,36%	9,62%	8,08%	5,00%	47,91%	496,54%	27,62%	10,30%	6,68%
Hessen	1,55%	142,70%	7,92%	7,46%	27,67%	1017,92%	5,02%	33,26%	9,08%
Bremen	3,08%	18792,31%	38,99%	3,57%	1039,57%	11104,55%	215,62%	381,72%	90,45%
Sachsen	3,58%	188,94%	8,59%	40,31%	82,34%	654,96%	19,17%	73,23%	18,70%
Brandenburg	3,88%	80,47%	8,11%	17,02%	172,53%	1428,65%	128,71%	128,51%	24,33%
Hamburg	4,87%	k.A.	12,49%	k.A.	381,12%	7634,38%	33,59%	237,41%	28,59%
Sachsen-Anhalt	5,27%	81,51%	9,79%	82,56%	137,09%	780,51%	106,77%	73,03%	31,84%
Berlin	5,64%	40716,67%	402,47%	12,68%	189,09%	785,53%	338,83%	37,11%	16,85%
Thüringen	10,15%	313,21%	42,34%	1364,80%	95,92%	359,79%	42,87%	137,63%	36,78%
Saarland ¹⁾	10,24%	k.A.	49,67%	k.A.	306,91%	5089,58%	22,51%	284,73%	62,82%
Mecklenburg-Vorpommern	11,70%	49,28%	45,29%	338,83%	336,50%	2304,72%	211,52%	153,17%	39,24%

Tabelle 105 Anteil der gesamtiportierten Wassermenge von 2030 (max.) an Verbräuchen der Bundesländer

Anteil der gesamtiportierten Wassermenge von 2050 (min.) an Verbräuchen der Bundesländer									
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasserversorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfallentsorgung, Rückgewinnung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	Dienstleistungsbereiche	Private Haushalte
Nordrhein-Westfalen	0,27%	28,41%	0,71%	1,17%	10,39%	204,85%	1,49%	9,08%	1,79%
Baden-Württemberg	0,34%	45,78%	3,31%	0,66%	14,81%	177,31%	1,56%	14,55%	3,22%
Bayern	0,42%	17,74%	1,69%	1,46%	11,79%	161,95%	1,99%	11,89%	2,53%
Schleswig-Holstein	0,65%	71,91%	15,70%	0,75%	91,74%	727,59%	48,06%	56,40%	11,90%
Rheinland-Pfalz	0,65%	58,99%	0,96%	10,39%	44,34%	492,33%	4,82%	34,05%	8,62%
Niedersachsen	0,82%	5,81%	4,89%	3,02%	28,97%	300,20%	16,70%	6,23%	4,04%
Hessen	0,94%	86,27%	4,79%	4,51%	16,73%	615,42%	3,03%	20,11%	5,49%
Bremen	1,86%	11361,54%	23,57%	2,16%	628,51%	6713,64%	130,36%	230,78%	54,68%
Sachsen	2,16%	114,23%	5,19%	24,37%	49,78%	395,98%	11,59%	44,27%	11,31%
Brandenburg	2,35%	48,65%	4,90%	10,29%	104,31%	863,74%	77,82%	77,70%	14,71%
Hamburg	2,95%	k.A.	7,55%	k.A.	230,42%	4615,63%	20,31%	143,54%	17,29%
Sachsen-Anhalt	3,19%	49,28%	5,92%	49,92%	82,88%	471,88%	64,55%	44,16%	19,25%
Berlin	3,41%	24616,67%	243,33%	7,67%	114,32%	474,92%	204,85%	22,43%	10,19%
Thüringen	6,14%	189,36%	25,60%	825,14%	57,99%	217,53%	25,92%	83,21%	22,23%
Saarland ¹⁾	6,19%	k.A.	30,03%	k.A.	185,55%	3077,08%	13,61%	172,14%	37,98%
Mecklenburg-Vorpommern	7,07%	29,80%	27,38%	204,85%	203,44%	1393,40%	127,88%	92,60%	23,72%

Tabelle 106 Anteil der gesamtiportierten Wassermenge von 2050 (min.) an Verbräuchen der Bundesländer

Anteil der gesamtiportierten Wassermenge von 2050 (max.) an Verbräuchen der Bundesländer									
Land	Insgesamt	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	Bergbau und Verarb. Gewerbe	Energieversorgung	Wasser-versorgung	Baugewerbe	Abwasser- und Abfall-entsorgung, Rück-gewinnung, Beseitigung von Umwelt-verschmut-zungen	Dienst-leistungs-bereiche	Private Haushalte
Nordrhein-Westfalen	1,95%	206,60%	5,18%	8,53%	75,51%	1489,46%	10,85%	66,04%	13,03%
Baden-Württemberg	2,48%	332,89%	24,08%	4,82%	107,66%	1289,20%	11,31%	105,82%	23,43%
Bayern	3,02%	128,95%	12,29%	10,62%	85,75%	1177,52%	14,47%	86,43%	18,39%
Schleswig-Holstein	4,71%	522,83%	114,18%	5,47%	667,02%	5290,15%	349,46%	410,04%	86,53%
Rheinland-Pfalz	4,74%	428,87%	6,98%	75,55%	322,40%	3579,67%	35,03%	247,56%	62,71%
Niedersachsen	5,99%	42,27%	35,52%	21,99%	210,61%	2182,72%	121,41%	45,30%	29,38%
Hessen	6,83%	627,28%	34,83%	32,80%	121,65%	4474,58%	22,06%	146,21%	39,91%
Bremen	13,53%	82607,69%	171,39%	15,70%	4569,79%	48813,64%	947,84%	1677,97%	397,59%
Sachsen	15,73%	830,55%	37,74%	177,21%	361,95%	2879,09%	84,27%	321,91%	82,21%
Brandenburg	17,06%	353,72%	35,64%	74,83%	758,40%	6280,12%	565,81%	564,91%	106,96%
Hamburg	21,43%	k.A.	54,90%	k.A.	1675,35%	33559,38%	147,68%	1043,63%	125,69%
Sachsen-Anhalt	23,19%	358,32%	43,02%	362,93%	602,64%	3430,99%	469,36%	321,05%	139,98%
Berlin	24,81%	178983,33%	1769,19%	55,73%	831,19%	3453,05%	1489,46%	163,11%	74,08%
Thüringen	44,61%	1376,79%	186,12%	5999,44%	421,63%	1581,59%	188,47%	605,01%	161,66%
Saarland ¹⁾	45,01%	k.A.	218,36%	k.A.	1349,12%	22372,92%	98,95%	1251,63%	276,14%
Mecklenburg-Vorpommern	51,43%	216,64%	199,09%	1489,46%	1479,20%	10131,13%	929,78%	673,29%	172,49%

Tabelle 107 Anteil der gesamtiportierten Wassermenge von 2050 (max.) an Verbräuchen der Bundesländer