

Global H2 Upscaling

Zusammenfassung der Energieszenarien

Zuwendungsgeber:

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Geschäftsbereich Energiesystem Integration (ESI 1)
Postfach 52425 Jülich

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungsnehmerin:

IZES gGmbH
Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme
Projektleitung: Eva Hauser
Altenkesseler Str. 17
66115 Saarbrücken
Tel.: +49-(0)681-844 972-0
Email: hauser@izes.de

Autor*innen: Henrik Mantke, Barbara Dröschel, IZES
Unter Mitarbeit von Dr. Uwe Klann und Eva Hauser

Saarbrücken, den 09.08.2023

Inhalt

Abbildungen.....	III
Tabellen.....	IV
1 Auswahl der Szenarien zur Analyse.....	5
2 Gewählte Indikatoren zum Vergleich.....	6
3 Analyseergebnisse der allgemeinen Indikatoren.....	7
3.1 BIP-Wachstum bis 2050	7
3.2 Bevölkerungswachstum bis 2050	8
3.3 Elektrifizierungsgrad 2050	8
3.4 Endenergieverbrauch 2050	9
3.5 Effizienz / Suffizienz.....	10
3.6 Zusammenfassung der Auswertung der Indikatoren	13
4 Analyse des Wasserstoffbedarfs und der Wasserstoffproduktion in den Szenarien.....	14
4.1 Gesamtbedarf.....	14
4.2 Verkehr	16
4.3 Industrie.....	16
4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Bedarfs	17
5 Weltweiter Handel mit H ₂ und Derivaten	18
6 Literaturverzeichnis	24

Abbildungen

Abbildung 1 Mittleres BIP-Wachstum pro Jahr bis 2050	7
Abbildung 2 Mittleres Bevölkerungswachstum bis 2050	8
Abbildung 3 Elektrifizierungsgrad 2050	9
Abbildung 4 Endenergieverbrauch 2050	10
Abbildung 5: Wasserstoff- und Wasserstoffderivateverbrauch insgesamt im Endenergieverbrauch in PWh	15
Abbildung 6: Wasserstoff- und Wasserstoffderivateverbrauch insgesamt im Sektor Verkehr in PWh	16
Abbildung 7: Wasserstoff- und Wasserstoffderivateverbrauch insgesamt im Sektor Industrie in PWh	17
Abbildung 8: H ₂ -Handel zwischen Weltregionen 2050	23

Tabellen

Tabelle 1: Betrachtete Energieszenarien.....	5
Tabelle 2: Angenommener Endenergieverbrauch H2 und H2-Derivate 2050 in den Szenarien	14

1 Auswahl der Szenarien zur Analyse

Für die Analyse des weltweiten Wasserstoffbedarfs 2050 wurden sechs verschiedene Energieszenarien ausgewählt. Zu diesen gehören die ambitioniertesten Szenarien der großen Energieagenturen von IRENA (1,5°C Pathway) und IEA (Net Zero). Sodann wurden Szenarien des IPCC analysiert, die das 1,5 °C-Ziel von Paris mit hoher Wahrscheinlichkeit und geringen Überschreitungen einhalten könnten (> 50 %). Diese finden sich in der Kategorie C1 der AR6 Datenbank und umfassen insgesamt 97 Szenarien. Unter diesen wurde das einzige mit hohen Elektrifizierungsraten und hohen Anteilen an EE ausgewählt, das von einem geringen Einsatz von Biomasse und CCS ausgeht. (DeepElec_SSP2_HighRE_Budg900). Zusätzlich wurden 2 weitere Szenarien in der Analyse berücksichtigt, die das 1,5 °C Ziel erreichen könnten (JRC Geco 1,5°C, Shell Sky 1.5).

Tabelle 1: Betrachtete Energieszenarien

Autor*innen	Jahr	Titel	Untertitel
IRENA	2022	World Energy Transitions Outlook	1.5°C Pathway
IEA	2021	Net Zero by 2050	A Roadmap for the Global Energy Sector
IPCC	2022	Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change	(IPCC 2022)Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of IPCC
Edward Byers, Volker Krey, Elmar Kriegler, Keywan Riahi, Roberto Schaeffer, et al.	2022	International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)	AR6 Scenarios Database
Keramidas, K., Fosse, F., Diaz Rincon, A., Dowling, P., Garaffa, R., Ordonez, J., Russ, P., Schade, B., Schmitz, A., Soria Ramirez, A., Vandyck, T., Weitzel, M (JRC)	2022	Global Energy and Climate Outlook (GECO)	Energy trade in a decarbonised world
Shell (Sky 1.5)	2021	The Energy Transformation Scenarios	

2 Gewählte Indikatoren zum Vergleich

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in den Szenarien zu gewährleisten, wurden Indikatoren ausgewählt, die in allen Szenarien gleichermaßen berücksichtigt wurden. Auf diese Weise war es möglich, unterschiedliche Wasserstoffbedarfe mit Hilfe des gleichen Indikatorensets für jedes Szenario zu evaluieren. Folgende Indikatoren wurden untersucht:

- Das **weltweite, mittlere Bruttoinlandsprodukt-(BIP)-Wachstum bis 2050** als Maß für die angenommene wirtschaftliche Entwicklung weltweit.
- Das **mittlere Bevölkerungswachstum pro Jahr bis 2050** als Maß für die angenommene Bevölkerungsentwicklung.
- Der **Elektrifizierungsgrad 2050**, als Maß für die Effizienz der Primärenergienutzung. In einem klimaneutralen Szenario müssen i.d.R. weitere Energieträger aus Strom erzeugt werden (z.B. Wasserstoff). Diese können z.B. aus Bioenergie gewonnen werden und sind in diesem Fall sowie bei der Nutzung fossiler Energien mit einer energieaufwändigen CO₂-Abscheidung verbunden.
- Der **Endenergieverbrauch 2050**, als Maß für Energieeffizienz. In Korrelation mit Bevölkerungs- und BIP-Wachstum zeigt dieser, wie sich Energieeffizienzsteigerungen insgesamt entwickeln.

Zusätzlich zu diesen Parametern war ein wichtiger weiterer Parameter die Suffizienz bzw. Effizienz. Unter Suffizienz können im weitesten Sinne Verhaltensänderungen bzw. Politikmaßnahmen verstanden werden, die zu einer absoluten Senkung des Energieverbrauchs beitragen. Hierzu zählen etwa Maßnahmen im Mobilitätssektor (z.B. Tempolimits auf Autobahnen, Fahrradnutzung oder Zu-Fuß-Gehen) und Wandel von Konsumgewohnheiten (z.B. Einschränkung des Fleischkonsums). Effizienzsteigerungen hingegen gehen i.d.R. mit technischen Fortschritten und einer relativen Senkung des Energieverbrauchs einher.

Neben den allgemeinen Parametern, wurden auch der Wasserstoffbedarf in den Sektoren Mobilität, Industrie und Gebäude und die Wasserstoff-Produktion selbst betrachtet, soweit die untersuchten Szenarien hierzu Daten bereitstellten. Einige Szenarien behandelten auch Aspekte wie die Produktion von strombasierten Kraftstoffen oder Biokraftstoffen und fossilen Kraftstoffen mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung.

3 Analyseergebnisse der allgemeinen Indikatoren

3.1 BIP-Wachstum bis 2050

Beim Vergleich der betrachteten Szenarien fällt auf, dass diese sich nach dem mittleren BIP-Wachstum bis 2050 in drei verschiedene Gruppen unterteilen lassen. Das niedrigste Wachstum ist im JRC Geco zu finden, welches bei 1,7 % pro Jahr liegt. Damit entspricht es in etwa dem Wert, den man erhält, wenn man den Trend von 1961-2021 bis 2050 fortschreibt und entsprechend den Mittelwert für den fortgeschriebenen Zeitraum von 2022-2050 annimmt (1,65 %). Das IEA-Szenario geht von einem Wert aus, der mit ca. 3 % in etwa dem Mittelwert der Jahre 2012-2019 (2,97 %) entspricht. IPCC liegt leicht darunter mit 2,7 %. IRENA und Shell gehen von fast 4 % aus und damit einer noch höheren Wertschöpfungssteigerung, welche zuletzt vor der Wirtschafts- und Finanzkrise 2008 in der Historie zu finden ist.¹

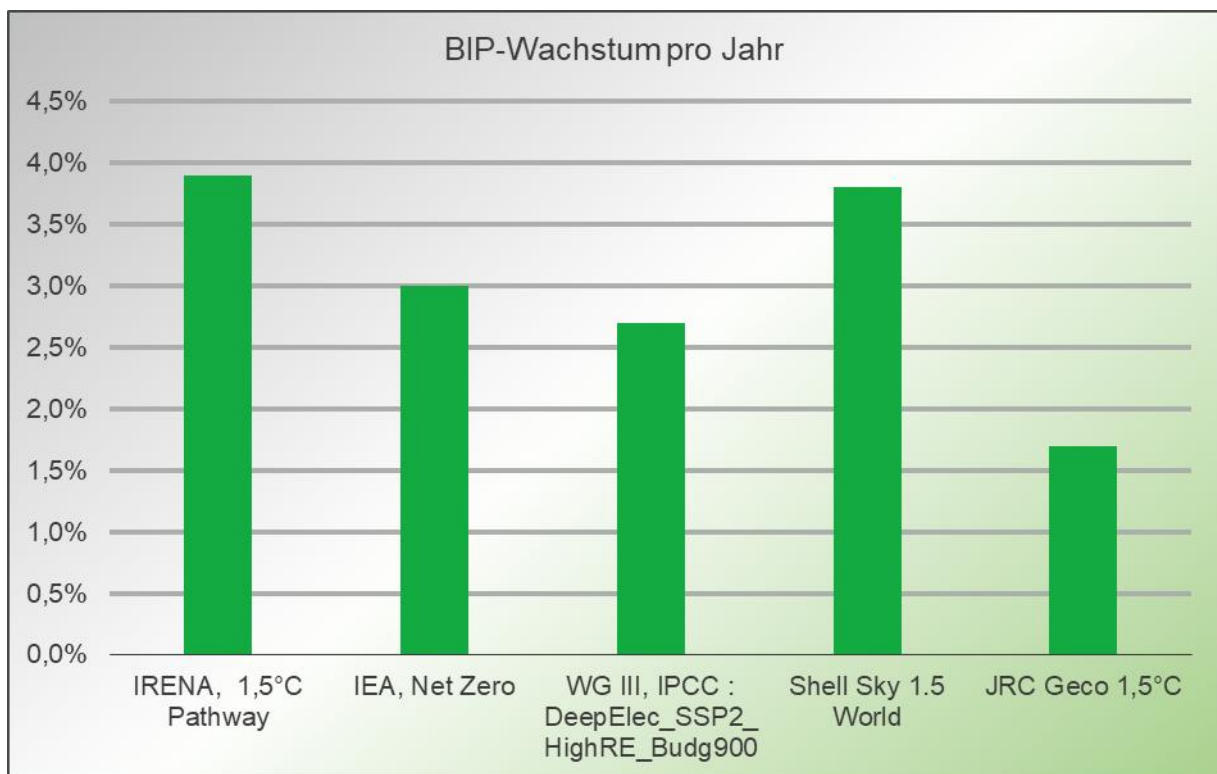


Abbildung 1 Mittleres BIP-Wachstum pro Jahr bis 2050 ²

¹ Alle Vergleiche auf Basis von Daten der Weltbank: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>.

² IRENA (2021-2050), IEA (2022-2050) nahe am Vor-Corona Niveau von 3 %, WG III (2020-2050) (Wert für „PPP“), Shell (2019-2050), JRC Geco (2015-2050).

3.2 Bevölkerungswachstum bis 2050

Beim Bevölkerungswachstum gibt es im Vergleich der Szenarien ebenfalls eine Dreiteilung. Alle Szenarien gehen von einer sinkenden Wachstumsgeschwindigkeit der Bevölkerung aus. Das niedrigste mittlere Wachstum nimmt IRENA mit lediglich 0,5 % pro Jahr im Mittel an. Dies entspricht der Hälfte des Wertes des Jahres 2020 (1,01 %). Ein etwas höheres Wachstum nehmen IPCC und JRC Geco mit 0,6 % an. Die höchsten Wachstumsraten sind bei IEA und Shell zu finden mit 0,8 % pro Jahr, diese liegen nur leicht unterhalb des Wertes des Jahres 2021 (0,86 %).³

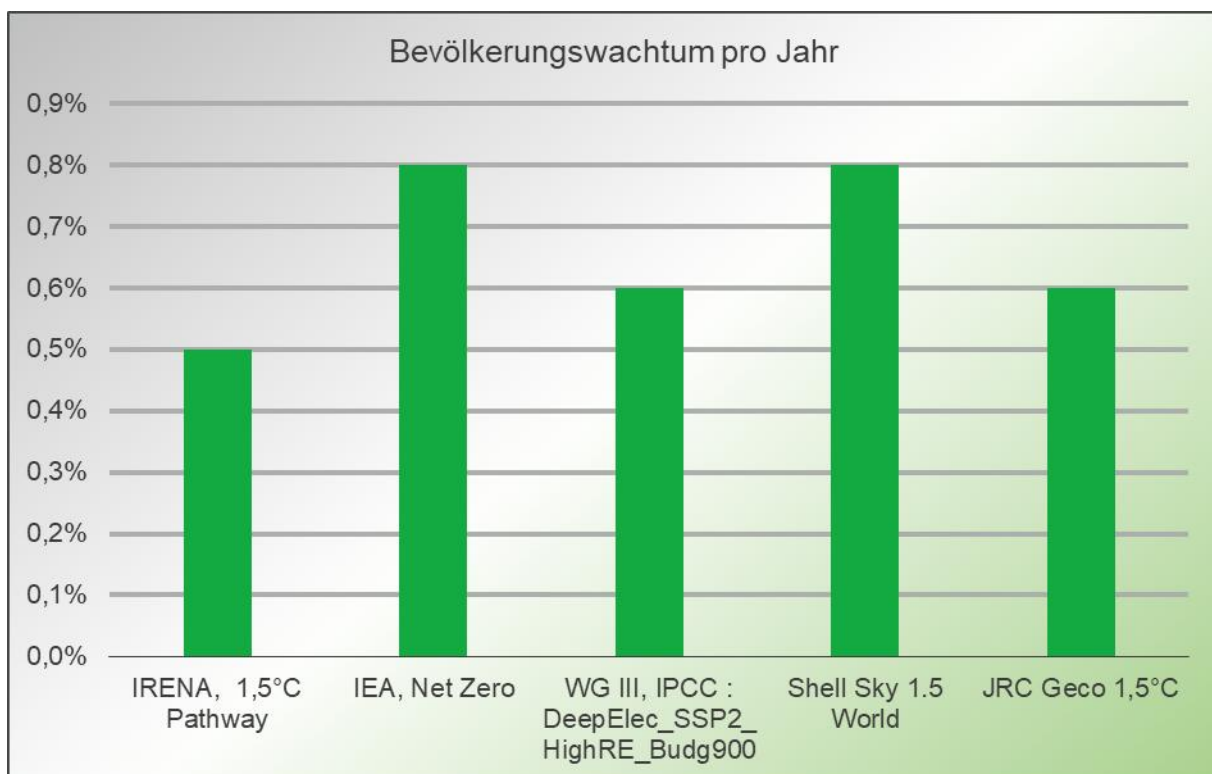


Abbildung 2 Mittleres Bevölkerungswachstum bis 2050⁴

3.3 Elektrifizierungsgrad 2050

Beim Elektrifizierungsgrad gibt es ebenfalls Unterschiede zwischen den Szenarien. Den niedrigsten Wert nimmt das Shell-Szenario mit lediglich 43 % an, was etwas mehr als einer Verdopplung des Wertes des Jahres 2019 entspricht (19 %). Leicht ambitionierter sind IRENA und IEA mit ca. 50 % und JRC Geco mit 56 %. Der ambitionierteste

³ Vergleich auf Basis von Daten der Weltbank: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW>.

⁴ Das Bevölkerungswachstum bezieht sich auf die folgenden Zeiträume: IRENA (2021-2050), IEA (2020-2050), WG III (2020-2050), Shell (2019-2050), JRC Geco (2015-2050).

Wert wird vom IPCC Szenario angenommen, welches bei 66 % liegt und damit fast 3,5-mal so hoch wie der Wert des Jahres 2021.⁵

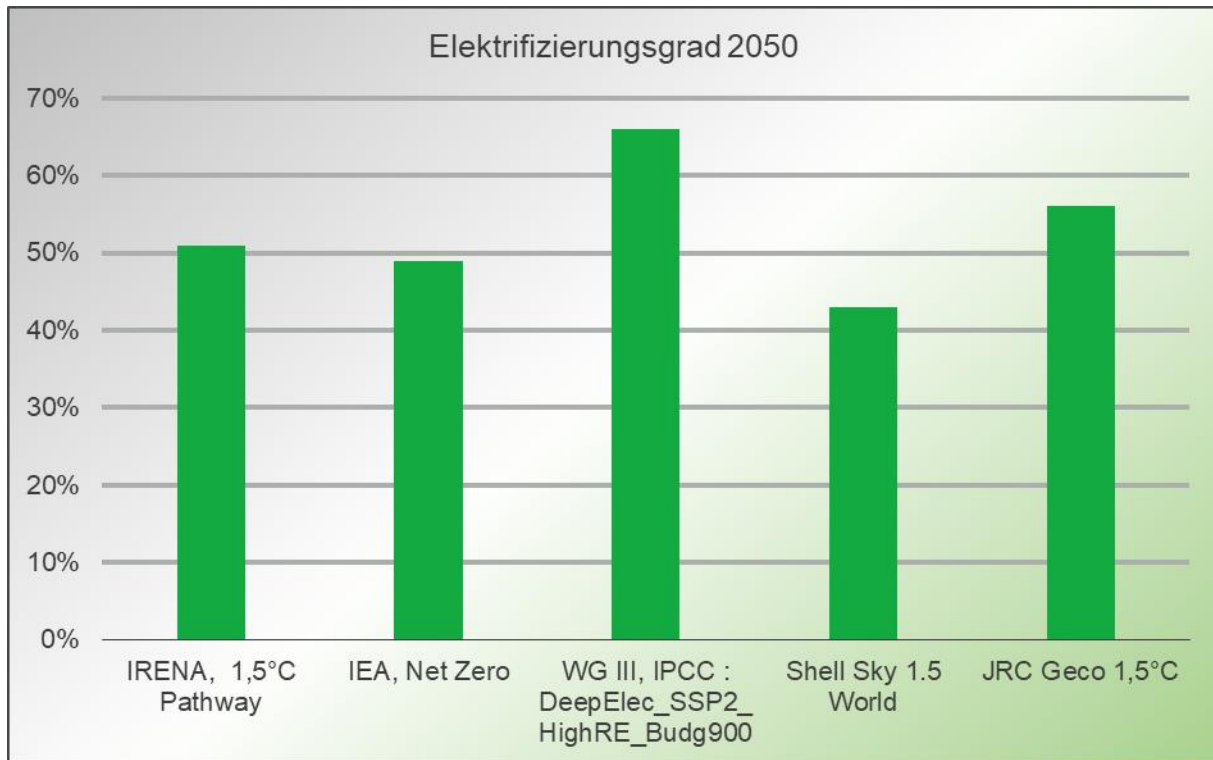


Abbildung 3 Elektrifizierungsgrad 2050

3.4 Endenergieverbrauch 2050

Beim Endenergieverbrauch gibt es eine Zweiteilung. Im Shell Szenario liegt der Endenergieverbrauch 2050 bei 153 PWh und damit ca. 1,5-mal so hoch wie in den anderen Szenarien mit ca. 100 PWh (s. dazu auch Kap. 3.5). Im Jahr 2019 lag dieser Wert bei 116 PWh. Damit nimmt nur das Shell-Szenario eine Steigerung des Endenergieverbrauchs an, wohingegen er in den anderen Szenarien leicht sinkt.

⁵ Vergleich mit Energiestatistik der IEA: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption>.

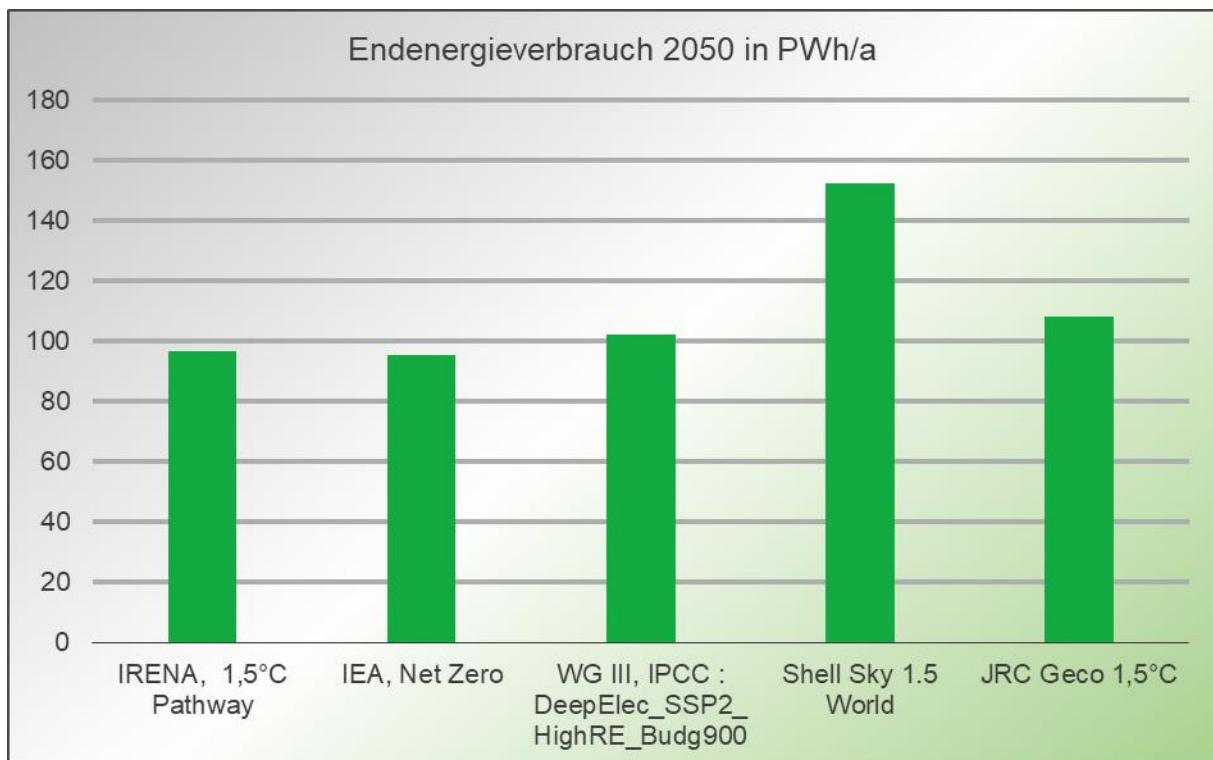


Abbildung 4 Endenergieverbrauch 2050

3.5 Effizienz / Suffizienz

Zur Bewertung der beiden Ansätze werden diese hier wie folgt abgegrenzt:

- Effizienz: Sie erreicht relative Energieeinsparungen aufgrund technologischer Entwicklungen.
- Suffizienz: Sie basiert auf einem genügsamen Umgang mit vorhandenen Ressourcen und kann absolute Energieeinsparungen erzielen.

In beiden Ansätzen haben Lebensstile sowie individuelle Gewohnheiten und Verhaltensweisen einen bedeutenden Einfluss auf den Energieverbrauch. Reboundeffekte aufgrund von Effizienz- oder Suffizienzmassnahmen wurden in keinem der Szenarien betrachtet.

IRENA 1,5°C Pathway

Hier wird Effizienz als Maßnahmen zur Reduktion der Energienachfrage definiert und in einem Zug mit Effizienzverbesserungen genannt. Letztere können z.B. strukturelle Änderungen bedeuten (Stahlerzeugung mit Direktreduktion von Eisen) oder Einführung einer Kreislaufwirtschaft (Irena 2022b, S. 34, Anm. Fig. 1.1 + S. 79). Auch werden Elektrifizierung und Effizienzsteigerungen als unmittelbar zusammengehörig betrachtet (Irena 2022b, S. 47).

Definiert wird Energieeffizienz als das Verhältnis zwischen dem Primärenergieverbrauch und dem BIP. Der Indikator wird als Veränderung der durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate der Energieintensität des BIP, gemessen in Kaufkraftparitäten (KKP), ausgedrückt (Irena 2022b, S. 78, Fn 17).

Bei der IRENA heißt es, dass strukturelle sowie Verhaltensänderungen für ca. 8 % der Effizienzgewinne verantwortlich sind. Durch Elektrifizierung und Erhöhung der Sanierungsraten wird der Energieverbrauch für Raumwärme im Gebäudesektor erheblich reduziert: auf 99 EJ in 2030 im Vergleich zu 121 EJ in 2019 (Irena 2022b, S. 81, 84 Table 2.3, 210). Im Verkehrssektor gehören dazu Aspekte wie die verstärkte Nutzung des öffentlichen Verkehrs und anderer Mobilitätsdienstleistungen, sowie die Reduktion von vermeidbarem Verkehr durch z.B. Wegeplanung oder Änderungen im Berufsalltag z.B. durch die verstärkte Nutzung von Homeoffice. Auch die Änderung des Modal Split durch Nutzung von Schienentransport statt Flugzeug oder Straßentransport gehört hierher. (Irena 2022b, S. 81, 84, Table 2.3, 210). Zudem wird auch der Effekt von Kampagnen für Verhaltensänderungen angesprochen (Irena 2022b, S. 109).

IEA Net Zero Emission by 2050

Das IEA-Szenario beschreibt Verhaltensänderungen (und Materialeffizienz) am detailliertesten. Bis 2050 reduzieren diese den Endenergieverbrauch um 10 % oder 37 EJ (10 PWh). Dabei werden folgende Maßnahmen besonders hervorgehoben (IEA 2021, S. 84–88).

Flugverkehr:

Flüge sollten auf dem Niveau von 2019 gehalten werden. Für kurze Strecken sollte auf Hochgeschwindigkeitszüge gesetzt werden. Hier sind Verlagerungen bis zu 17 % in 2050 möglich. Insgesamt müsste der Flugverkehr um rund 12 % reduziert werden (IEA 2021, S. 85).

Nutzung des Autos:

In Städten sollte auf geteilte Mobilität und gleichzeitig auf einen Ausstieg aus Schadstoff emittierenden Fahrzeugen gesetzt werden. Ein Teil der privaten Kfz-Nutzung könnte durch Fahrradfahren, öffentlichen Verkehr oder Zu-Fuß-Gehen ersetzt werden. So würde die Eigentumsquote an Kfz erheblich sinken, was sich auch in einer sinkenden Stahlproduktion niederschlägt. Andererseits würde für den Ausbau von Fahrradwegen zusätzlicher Zement und Bitumen benötigt.

Eine Zusammenfassung der Maßnahmen zu Verhaltensänderungen findet sich in Tabelle 2.10 (IEA 2021, S. 88).

Über die verschiedenen Sektoren können folgende Energieeinsparungen erzielt werden: 3 PWh im Verkehrssektor, 1 PWh im Gebäudesektor und 6 PWh in der Industrie. Hierdurch werden 2030 1,7 Gt CO₂ Emissionen eingespart (IEA 2021, S. 69, Fig. 2.15).

Die IEA versteht unter Verhaltensänderungen nur aktive Interventionen. Hierunter fallen z.B. keine Einsparungen, die mit digitalen Hilfsmitteln erreicht werden.

Es werden mehrere Aspekte unter Verhaltensänderungen gefasst. Dazu gehören die Reduktion von verschwenderischem Energieverbrauch (z.B. die Einführung von 100 km/h auf Autobahnen), die modale Verlagerung (z.B. vom Flugzeug auf die Bahn) und Materialeffizienzsteigerungen (z.B. ein höheres Recycling) (IEA 2021, S. 67–70).

WG III, IPCC: DeepElec_SSP2_HighRE_Budg900

Das hier ausgewählte Szenario geht von Effizienzsteigerungen durch hohe Elektrifizierung bei gleichzeitiger Reduktion des Biomasseeinsatzes aus. Bis Mitte des Jahrhunderts wird eine Elektrifizierung von bis zu 66 % über alle Sektoren angenommen. Lebensstil- und Verhaltensänderungen im Rahmen der IPCC-Szenarien wurden anhand des Berichts der Working Group (WG) III (IPCC 2022) untersucht.

Dieser widmet ein ganzes Kapitel (Chapter 5 Demand, Services and Social Aspects of Mitigation) möglichen Lebensstil- und Verhaltensänderungen und den Umständen, unter denen diese gelingen können. Es wird nicht speziell auf das hier betrachtete Szenario im Einzelnen Bezug genommen, sondern übergreifend auf zahlreiche vergleichbare Szenarien.

Verbesserte Energieumwandlungsprozesse und Energienutzung können zu einer bedeutend geringeren Energienachfrage in 2050 führen (IPCC 2022, S. 534, Fig. 5.10). In Tabelle 5.2 (IPCC 2022, S. 536–537) werden Szenarios aufgelistet, die die Energie- und Ressourcennachfrage auf Ebene von Serviceleistungen u.a. durch Verhaltensmaßnahmen bis 2050 erheblich senken können. Hierzu werden Maßnahmen nach dem Avoid-Shift-Improve-Modell aufgelistet, z.B. Avoid: kleinere Wohnungen, Stand By-Verluste, Nachfragereduktion. Shift: Längere Nutzung von Gebäuden, Wiederverwendung von Produkten, gesündere Ernährung. Improve: Beste verfügbare Technik für alle Sektoren, weniger Fleischkonsum.

Shell Sky 1.5 World

Ergebnisse aus verhaltens- und prozessbedingten Effizienzgewinnen werden im Text an mehreren Stellen und für unterschiedliche Sektoren aufgezeigt (Shell 2021, S. 41, 45, 48). Im Vergleich zur BIP-Entwicklung sind zwar bedeutende Energieeffizienzgewinne zu verzeichnen. Dennoch wächst der absolute Energieverbrauch, vor allem wegen wachsender Nachfrage und Bevölkerung in Schwellenländern (Shell 2021, S. 45).

Im **JRC Geco 1,5°C** (JRC 2022) finden Effizienz- oder Suffizienzmaßnahmen keine Erwähnung.

3.6 Zusammenfassung der Auswertung der Indikatoren

Zwischen den Szenarien bestehen zum Teil erhebliche Unterschiede. So weist das Shell-Szenario den höchsten Endenergieverbrauch in 2050 auf. Auch das JRC Geco Szenario sieht einen hohen Energieverbrauch im Jahr 2050. Verglichen mit dem IRENA-Szenario, das ein fast doppelt so hohes BIP-Wachstum annimmt, liegt Geco beim Endenergieverbrauch 2050 mit diesem fast gleichauf. Das IEA-Szenario geht von einem Energieverbrauch von 96 PWh aus und ist damit vergleichbar mit IRENA. Allerdings geht IEA von einem geringeren jährlichen BIP-Wachstum, dafür aber einem höheren Bevölkerungsanstieg aus. Das IPCC-Szenario rechnet mit einem deutlich geringeren BIP-Wachstum als Irena, IEA oder Shell und liegt beim Energieverbrauch etwas oberhalb von Irena und IEA. Insgesamt liegen alle Szenarien außer Shell beim Endenergieverbrauch recht nahe beieinander und weisen zwischen 96 und 108 PWh für das Jahr 2050 aus.

Das betrachtete IPCC Szenario charakterisiert sich durch die höchsten Anteile von Strom im Endenergieverbrauch, gefolgt von Geco und Irena. Die beiden Szenarien mit geringeren Elektrifizierungsraten weisen in ihrem Energiemix 2050 hingegen weiterhin relativ hohe Anteile an fossilen Energieträgern auf.

Verbrauchsreduktionen durch Effizienz- und Suffizienzmassnahmen werden am detailliertesten im IEA-Szenario beschrieben. Auch das IRENA-Szenario liefert gute Aspekte zu dieser Thematik. In beiden Fällen werden mögliche Verhaltens- und Lebensstiländerungen betrachtet.

Zieht man den IPCC-Bericht der WG III hinzu, so finden sich auch hier Szenario-Ansätze, die zu erheblichen Energieeinsparungen aufgrund von Lebensstil- und Verhaltensänderungen beitragen und damit auch zu einer absoluten Reduktion des Energieverbrauchs führen könnten.

4 Analyse des Wasserstoffbedarfs und der Wasserstoffproduktion in den Szenarien

4.1 Gesamtbedarf

Bei der Abschätzung des weltweiten Wasserstoffbedarfs bis 2050 gibt es große Unterschiede zwischen den Szenarien, so dass die Szenarien grob in zwei Gruppen unterschieden werden können. In den Szenarien der IRENA, der IEA und JRC Geco werden mehr als 7 PWh Wasserstoff und Wasserstoffderivate im Endenergieverbrauch benötigt. In den Szenarien des IPCC und von Shell dagegen nur um die 3 PWh.⁶ Dabei setzt das Shell-Szenario auf große Mengen biobasierte Kraftstoffe und weiterhin auf solche aus fossilen Energieträgern mit CCS. Im Szenario des IPCC ist der Elektrifizierungsgrad insgesamt und damit auch für den Mobilitätssektor sehr hoch. Darüber hinaus ist der Abstand zwischen dem Szenario der IRENA mit dem im Vergleich höchsten Wasserstoffverbrauch von fast 12 PWh zu JRC Geco mit etwas weniger als 8 PWh ebenfalls bemerkenswert.

Die folgende Tabelle stellt den Gesamtbedarf an H₂ über alle Szenarien dar, aufgeteilt nach Sektoren.

Tabelle 2: Angenommener Endenergieverbrauch H₂ und H₂-Derivate 2050 in den Szenarien

Endenergieverbrauch in PWh	H₂-/H₂-Derivateverbrauch gesamt	H₂-/H₂-Derivateverbrauch im Sektor Verkehr	H₂-/H₂-Derivateverbrauch im Sektor Industrie	H₂-/H₂-Derivateverbrauch im Sektor Gebäude
IRENA, 1,5°C	11,60	5,17	10,56	0,89
IEA, Net Zero	9,17	6,19	2,28	0,83
IPCC: DeepElec_ HighRE	3,31	0,25	3,06	0,01
Shell Sky 1.5	2,50	0,83	1,67	0,00
JRC Geco 1,5°C	7,61	5,60	1,97	0,04

⁶ Die Energieeinheiten wurden über alle ausgewerteten Szenarien in PWh umgerechnet, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

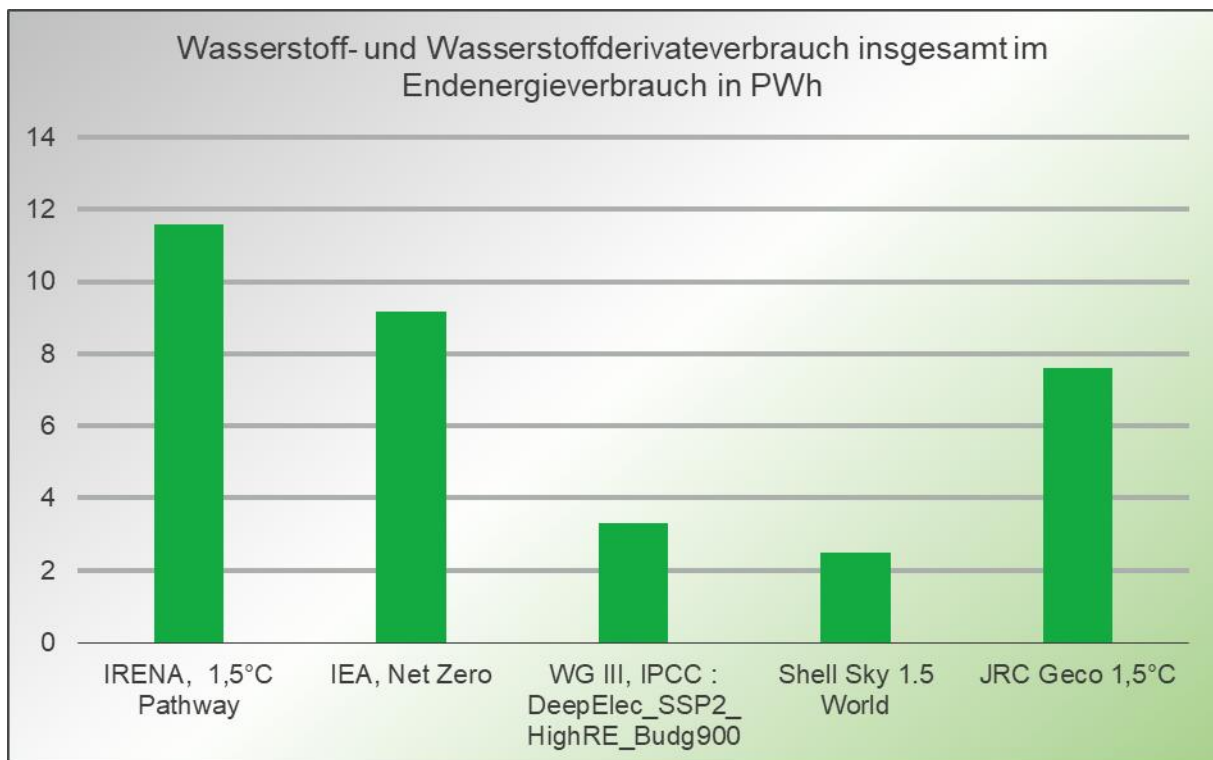


Abbildung 5: Wasserstoff- und Wasserstoffderivateverbrauch insgesamt im Endenergieverbrauch in PWh

Für das Irena-Szenario konnten als einzigem Szenario keine Datensätze beschafft werden, so dass die Auswertung nur anhand des Berichts „World Energy Transition Outlook 2022“ möglich war. Für die weiter unten gemachten Ausführungen zum Handel mit H₂ und seinen Derivaten wurden Veröffentlichungen von IRENA zum weltweiten H₂-Handel herangezogen (s. Kap. 5). Doch auch hieraus erschlossen sich nicht die Differenzen zwischen Erzeugung, Verbrauch und Verteilung von H₂ auf einzelne Sektoren. Für alle anderen Szenarien standen auswertbare Excel-Daten zur Verfügung.

Im IRENA 1,5°C Pathway-Szenario liegt die Produktion von H₂ in Höhe von 20,44 PWh, die Nachfrage aber nur bei 11,6 PWh. Der Verbleib der Differenz von 8,84 PWh wird im Bericht nicht erläutert. Addiert man ferner den im Bericht angegebenen Verbrauch an H₂ über alle Sektoren, summiert sich dieser auf 19,67 PWh gegenüber einem angegebenen Gesamtverbrauch von 11,6 PWh. Auch über den Verbleib der 8,07 PWh Differenz zwischen dem Verbrauch in den Sektoren Industrie, Verkehr, Gebäude und dem Gesamtverbrauch werden im Bericht keine Angaben gemacht.⁷

⁷ Zur Auswertung wurde der o.g. Bericht der IRENA herangezogen (s. Kap 1) und die dort angegebene Maßeinheit von EJ in PWh umgerechnet.

4.2 Verkehr

Die grobe Zweiteilung, die sich aus der unterschiedlichen Berücksichtigung strombasierter Kraftstoffe ergibt, zeigt sich beim Bedarf an wasserstoffbasierten Energieträgern im Verkehr noch deutlicher. Bei IRENA, IEA und JRC Geco werden über 5 PWh gebraucht, wohingegen gemäß IPCC und Shell weniger als 1 PWh benötigt werden. Im Verkehrssektor nimmt die IEA den höchsten Verbrauch mit über 6 PWh an.

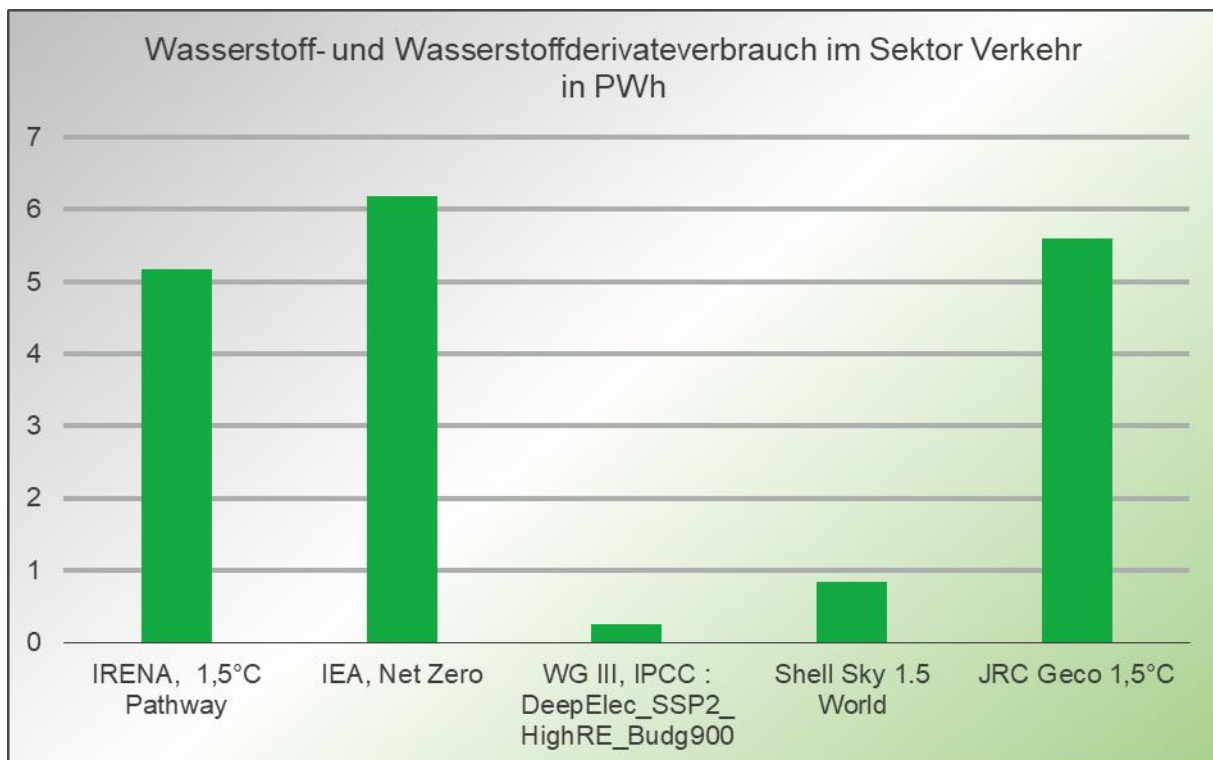


Abbildung 6: Wasserstoff- und Wasserstoffderivateverbrauch insgesamt im Sektor Verkehr in PWh

4.3 Industrie

Im Sektor Industrie ergibt sich ein anderes Bild. Hier geht IRENA von einem Bedarf von über 10 PWh aus, derweil die anderen Szenarien nur einen Bedarf von um die 2 PWh annehmen.⁸

⁸ Möglicherweise handelt es sich hierbei um einen Fehler in der Berechnung des IRENA-Szenarios, s.o.

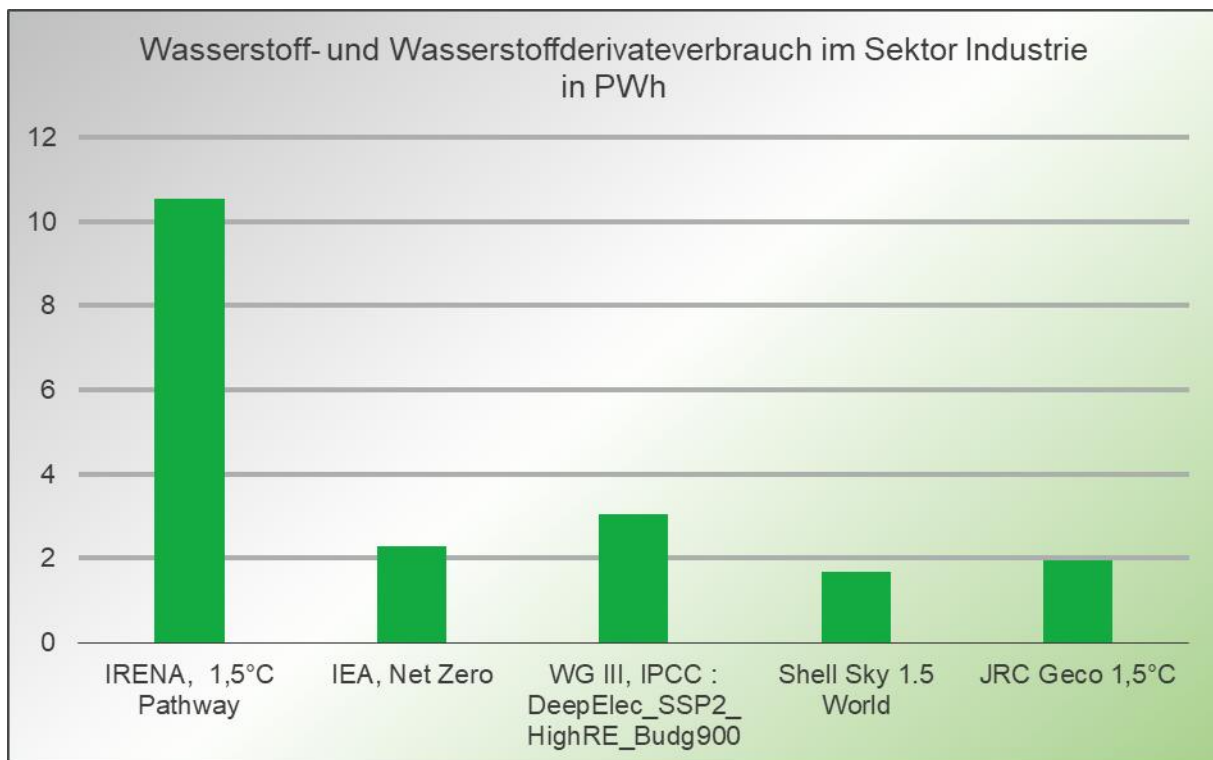


Abbildung 7: Wasserstoff- und Wasserstoffderivateverbrauch insgesamt im Sektor Industrie in PWh

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Bedarfs

Ogleich im IRENA- und IEA-Szenario Effizienz- sowie teilweise Suffizienzmaßnahmen zur Senkung des Endenergieverbrauchs beschrieben werden, gehen beide Szenarien 2050 von hohen weltweiten H₂-Bedarfen aus. Mögliche Begründungen hierfür könnten in den relativ hohen Annahmen beim BIP- und Bevölkerungswachstum in beiden Szenarien sowie in dem im Vergleich zum IPCC- und JRC-Szenario geringen Elektrifizierungsgrad von um die 50 % zu finden sein.

Weiterhin ist hervorzuheben, dass bei hohem angenommenen Elektrifizierungsgrad wie im IPCC-Szenario und bei hohen Anteilen an Biomasse und fossilen Energieträgern wie im Shell-Szenario der H₂-Bedarf speziell für den Mobilitätssektor sehr gering ausfällt.

Was den Gebäudesektor betrifft, so geht keines der Szenarien hier von nennenswerten H₂-Bedarfen im Jahr 2050 aus. Daher wurde dieser Einsatzbereich hier nicht weiter untersucht bzw. ausgewertet.

5 Weltweiter Handel mit H₂ und Derivaten

Je höher der für 2050 angenommene Elektrifizierungsgrad in den Szenarien, umso geringer fällt der weltweite H₂-Handel und -Bedarf aus.

Im **IEA Net Zero Szenario** steigt der Anteil an Stromanwendungen von 20 % in 2020 auf 49 % in 2050 (IEA 2021, S. 72, Table 2.5). Es wird für 2050 von einer weltweit gehandelten Menge an H₂ in Höhe von 414 Mt (4,81 PWh) ausgegangen. Hierin sind auch Ammoniak und synthetische Kraftstoffe enthalten. Die globale Produktion soll dann bei insgesamt 528 Mt (6,14 PWh) liegen, wovon 38 % noch immer auf fossiler Basis mit CCUS und 62 % mittels Elektrolyse und aus EE hergestellt werden (IEA 2021, S. 76, Table 2.7). Die Hälfte des weltweit produzierten Ammoniaks und ein Drittel aller synthetischen Kraftstoffe werden 2050 gehandelt (IEA 2021, S. 110). Entsprechend soll es 2050 weltweit 150 Export-Terminals für den H₂- und Ammoniak-Handel in Häfen geben (IEA 2021, S. 111, Table 3.1). Dieser Handel erfordert auch die Entwicklung von Zertifizierungssystemen und Herkunftsnachweisen für die unterschiedlichen Erzeugungsrouten von H₂ (IEA 2021, S. 113).

Welche Handelsströme sich wo genau entwickeln werden, ist im Szenario-Bericht nicht ausgeführt.

IRENA World Energy Transition Outlook

Neben dem World Energy Transition Outlook wurde hier auch der Bericht von IRENA zum weltweiten H₂-Handel Teil I herangezogen (Irena 2022a).

Weltweiter H₂-Handel könnte ein Viertel der gesamten Nachfrage in 2050 ausmachen. Diese soll ca. 50 EJ/Jahr (420 Mt H₂/Jahr oder 13,89 PWh) betragen. Dieser Betrag enthält nicht den Anteil an H₂ zur Stromerzeugung und auch keine saisonale Speicherung von H₂ aus EE-Strom. Strom für die H₂-Produktion fällt im Erzeugerland an und fließt somit nicht in die gehandelte Menge ein (Irena 2022a, S. 55). Die H₂-Nachfrage teilt sich zu ungefähr gleichen Teilen auf Transport mittels Pipelines und Schiffen (Ammoniak) auf (Irena 2022b, S. 192). Für den weltweiten Handel müssen Infrastruktur (Häfen, Umwandlungsprozesse) sowie ein Marktdesign und Handlungsleitfäden für H₂-Handel⁹ entwickelt werden (Irena 2022b, S. 233). H₂-Märkte werden größtenteils regional und kleiner als die heutigen Öl- und Gasmärkte sein (Irena 2022b, S. 234).

⁹ Evtl. sind damit Zertifizierungssysteme gemeint.

Der Endenergieverbrauch 2050 beträgt 348 EJ (96,66 PWh), davon werden 12 % (11,6 PWh) von H₂ abgedeckt¹⁰. Von diesen wiederum sollen 25 % auf dem Weltmarkt gehandelt werden (Irena 2022b, S. 235, Figure 5.10). Das entspricht 10,44 EJ (2,9 PWh) oder 3 % des weltweiten Endenergieverbrauchs. Die direkte Elektrifizierung des Endenergieverbrauchs liegt 2050 bei 58 % im Vergleich zu 21 % in 2019, ohne indirekten Stromverbrauch zur e-Fuel-Produktion. Für Letztere wird 2050 ein Anteil von 7 % am gesamten Treibstoffaufkommen veranschlagt (Irena 2022b, S. 87).

Irena Trade Outlook

In diesem Bericht von IRENA werden Handelspartner und -routen für H₂ für das Jahr 2050 beschrieben.

Aktivste künftige Importländer werden demnach Deutschland, die Niederlande und Japan sein. Hinzu kommt Singapur als regionaler Handelsplatz für Asien (Irena 2022a, S. 23).

Mögliche künftige Exportländer lassen sich in drei Kategorien unterteilen (Irena 2022a, S. 23–24):

- Heutige Importländer die zu Exporteuren werden könnten: Chile, Marokko, Portugal, Spanien
- Länder mit Zwischenpositionen, die heute fossile Exporteure sind, aber große EE-Potenziale haben: Australien, Kanada, Mittlerer Osten
- Länder, deren Energiemix bereits hohe Anteile an EE aufweist und die grünen H₂ exportieren könnten: Australien, Neuseeland, Norwegen, Uruguay, einige kanadische Provinzen.

Ein Blick auf die eingesetzten Technologien zeigt, dass Elektrolyse zur Produktion von H₂ in Verbindung mit PV und Wind onshore überwiegt und als Transportmedium meist Ammoniak gewählt wird. Das am weitesten fortgeschrittene Projekt in diese Richtung ist lt. IRENA der Western Green Energy Hub im Südosten von West-Australien (Irena 2022a, S. 24).

¼ der weltweiten H₂-Nachfrage wird 2050 international gehandelt (18,4 EJ/ Jahr oder 5,11 PWh/Jahr). Davon sollen 55 % als H₂ über Pipelines auf zwei regionale Märkte konzentriert sein: Europa (85 %) und Lateinamerika. Die restlichen 45 % werden meist in Form von Ammoniak und ohne Rekonversion in H₂ verschifft (Irena 2022a, S. 39, Highlights).

¹⁰ Direkte Verwendung und E-fuels sind hier zusammengerechnet.

Für die Versorgung von Europa spielen Nordafrika (Erzeugung), Italien und Spanien (Durchleitung) zentrale Rollen als H₂-Hubs.

Der größte Handelsüberschuss mit H₂ wird für Australien, Chile und Nordafrika erwartet. Größte Nettoimporteure sollen Deutschland, Japan, Südkorea und andere europäische Länder sein.

Der globale H₂-Handel ist deutlich kleiner als der heutige Handel mit Öl und Gas (Irena 2022a, S. 39, Highlights).

Ammoniak ist der attraktivste Energieträger für Schiffstransporte, weil er relativ geringe Transportkosten aufweist. In 2050 werden 690 Mt/a Ammoniak benötigt, wovon etwa 80 % als Rohstoff in der Chemieindustrie und als Schiffstreibstoff eingesetzt werden. Nur 20 % werden als H₂-Träger verwendet.

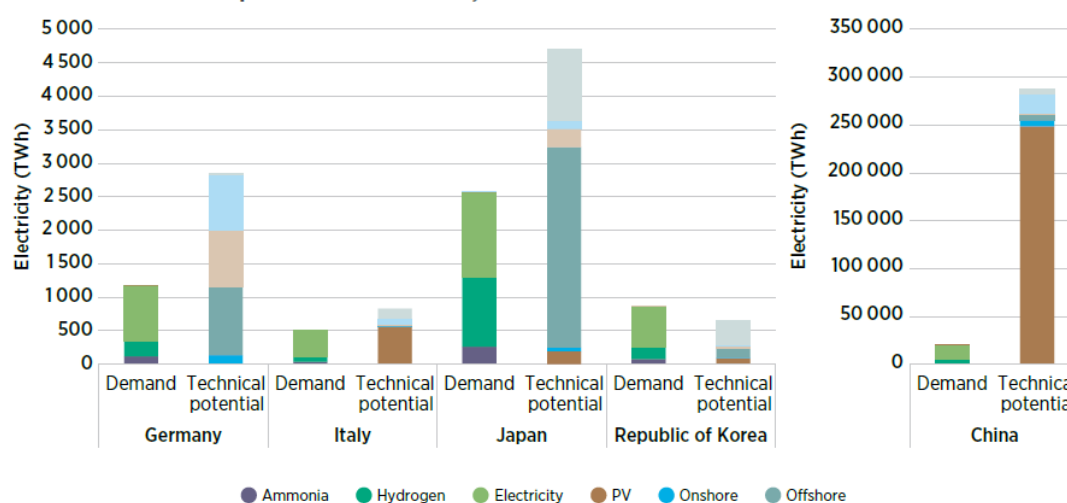
Größte Ammoniak-Exporteure sollen demnach Australien, Indien, Nordafrika und die USA sein. Von Brasilien, Kanada, China und Lateinamerika wird angenommen, dass sie sich selbst versorgen.

Größte Ammoniak-Importeure sind Deutschland, Indonesien, Italien, Japan, Südostasien und der Rest von Asien.

Für die Entwicklung der gesamten H₂-Wertschöpfungskette werden USD 4 Billionen zum Aufbau von 10,3 TW EE, 4,4 TW Elektrolyseure und 1,6 TWh Batteriespeicher veranschlagt (Irena 2022a, S. 40, Highlights).

Die nachfolgende Grafik stellt die Strom-, H₂- und Ammoniaknachfrage ausgewählter Länder in 2050 im Vergleich zu ihrem technischen EE-Potenzial dar (Irena 2022a, S. 44, Figure 3.3). Allerdings fehlt hier die Erläuterung zu den rosafarbenen Balken.

FIGURE 3.3. Electricity, hydrogen and ammonia demand in 2050 in comparison with the technical renewable potential for solar PV, onshore wind and offshore wind in selected countries



Theoretisch hätte Deutschland also das Potenzial, sich in 2050 selbst mit H₂ und Ammoniak zu versorgen. Denn das onshore-Wind- und PV-Potenzial ist 67 % höher als

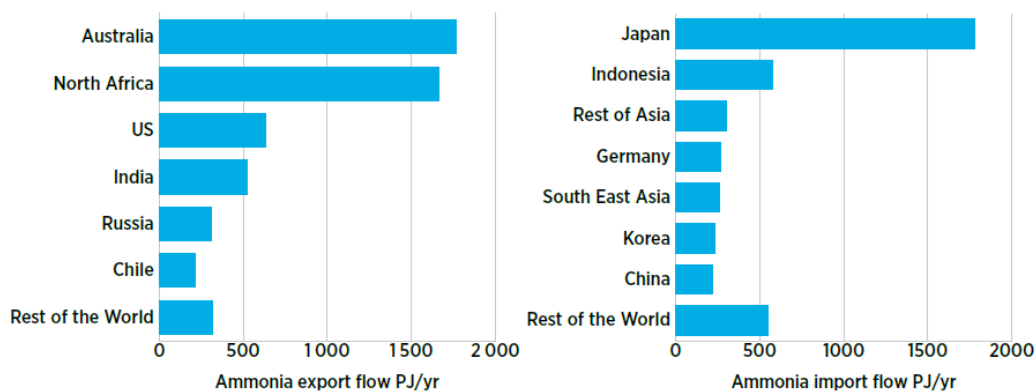
die Nachfrage. Die H₂- und Ammoniaknachfrage wurde in der Grafik in Stromnachfrage konvertiert.

Für Südkorea, Japan und China erscheint die Stromerzeugung aus EE recht kompliziert. Die ersten beiden haben keine sehr guten Standorte, was die Stromerzeugung aus EE im Vergleich mit anderen Ländern verteuert. China hingegen hat zwar große und reiche EE-Potenziale, die jedoch weit entfernt von den Verbrauchszentren liegen (Irena 2022a, S. 45).

Indien soll 2050 eine Stromnachfrage von 8.000 TWh einschl. H₂ und Ammoniakherstellung haben. Sein theoretisches PV-Potenzial liegt bei 16.000 TWh. Somit könnte Indien also exportieren (Irena 2022a, S. 46).

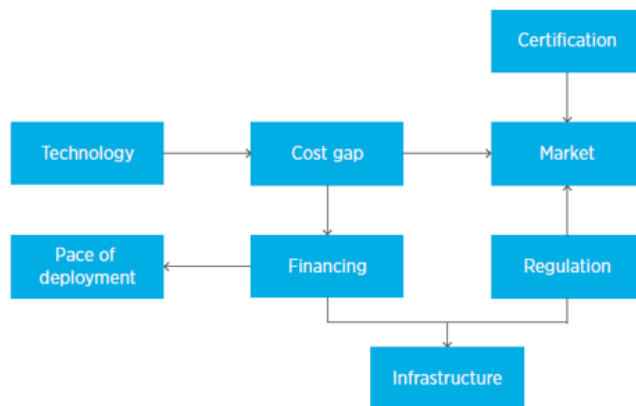
Folgende Weltregionen werden für Im- oder Export von Ammoniak 2050 ausgemacht (Irena 2022a, S. 59, Figure 3.15).

FIGURE 3.15. Export (left) and import (right) markets are relatively concentrated, with the top seven countries representing 96% and 86% of the market, respectively



Es gibt auch eine Kurzzeit-Roadmap, um einen globalen H₂-Handel zu etablieren (Irena 2022a, S. 77, Kap. 4). Dieser muss in einer ersten Phase zunächst von Regierungen gepusht werden. Gleichzeitig müssen Zertifizierungssysteme entwickelt werden, die sich auf den gesamten Lebenszyklus von H₂ und seinen Derivaten beziehen müssen: von der Erzeugung, über Lagerung, Umwandlung bis zum Transport. Auch die Schaffung von Infrastrukturen für einen H₂-Markt sowie transparenter, diskriminierungsfreier Zugang zu diesem ist von Bedeutung. Um die anfänglich noch hohen Kosten von H₂ zu dämpfen, können Kredite und Zuschüsse sowie CO₂-Bepreisung und der Stopp von Subventionen für fossile Energien helfen. Auf allen Ebenen der Wertschöpfung müssen kleinere Pilotprojekte schrittweise zu größeren Projekten entwickelt werden. Dies kann besonders bei potenziellen großen H₂-Endnutzern wie der Chemie-, Eisen- und Stahlindustrie erfolgen. Und: „Die Nutzung von Strom für Wasserstoff darf effektivere Verwendungszwecke von Strom nicht verdrängen, sondern muss zusätzlich erfolgen“ (Irena 2022a, S. 78).

Die Haupthindernisse für die Marktentwicklung aus heutiger Sicht werden in einer übersichtlichen Grafik dargestellt (Irena 2022a, S. 79, Figure 4.1).



Zu all diesen Themen finden sich gute Hinweise zur Entwicklung eines weltweiten H₂- und -Derivatehandels, bis hin zur Formulierung gezielter Unterstützungsmechanismen (Irena 2022a, Kap. 4).

JRC, 2022, Global Energy and Climate Outlook 2022: Energy trade in a decarbonized world, GECO

Hier macht die H₂ und e-Fuel-Nachfrage 2050 nur geringe Anteile am weltweiten Endenergieverbrauch aus: jeweils 8 % bzw. 4 %. Der überwiegende Endenergieträger ist Strom für den direkten Verbrauch. Dessen Anteil steigt von 22 % auf 60 % in 2050 (JRC 2022, S. 23), bei der in Waren und Dienstleistungen enthaltenen Energie sogar auf 63 % (JRC 2022, S. 39).

Der größte H₂-Bedarf entsteht im Transportsektor. 78 % der H₂-Nachfrage fallen hier an. Rund 12 % werden für die Eisen- und Stahlindustrie benötigt. In den restlichen Industriesektoren und in Gebäuden macht H₂ nur 1 % der Nachfrage aus (JRC 2022, S. 24).

Gehandelt wird nur grüner und kohlenstoffarmer H₂. Der größte Teil der Nachfrage wird aus inländischer Erzeugung gedeckt. Denn die Erzeugungskosten für H₂ sinken mit der Zeit und damit auch die Nachfrage nach Importen. Im Gegensatz zu den IRENA-Erwartungen zum H₂-Handel, sinkt z.B. die Importabhängigkeit von Japan und Südkorea von heute 90 % auf unter 30 % zur Mitte des Jahrhunderts (JRC 2022, S. 40, Figure 38). Ob dies auf einen massiven Ausbau von EE zurückzuführen ist, wird nicht ganz deutlich. Auf jeden Fall besteht die Notwendigkeit, zur Klimaneutralität zu gelangen und damit auch die wirtschaftliche Resilienz gegenüber Preisschwankungen durch fossile Energien zu stärken. Der größte Teil des gehandelten H₂ wird über Pipelines verteilt. Nur 12 % werden mit Schiffen transportiert.

In der EU liegt der selbst erzeugte und verbrauchte Anteil an H₂ in 2050 bei 83 %, wovon 28 % zwischen EU-Ländern gehandelt werden. 17 % werden durch Importe aus Nicht-EU-Ländern gedeckt. Importe kommen aus der Schweiz, Norwegen, den restlichen Balkanstaaten und Nordafrika (JRC 2022, S. 44).

2050 sind 39 % des gehandelten H₂ grün. Dessen Transport erfolgt von Nordafrika und den Balkanstaaten per Pipeline in die EU. 61 % des H₂ sind kohlenstoffarm und

gehen vom Mittleren Osten via Pipeline zu den Schwarzmeer-Ländern (JRC 2022, S. 45).

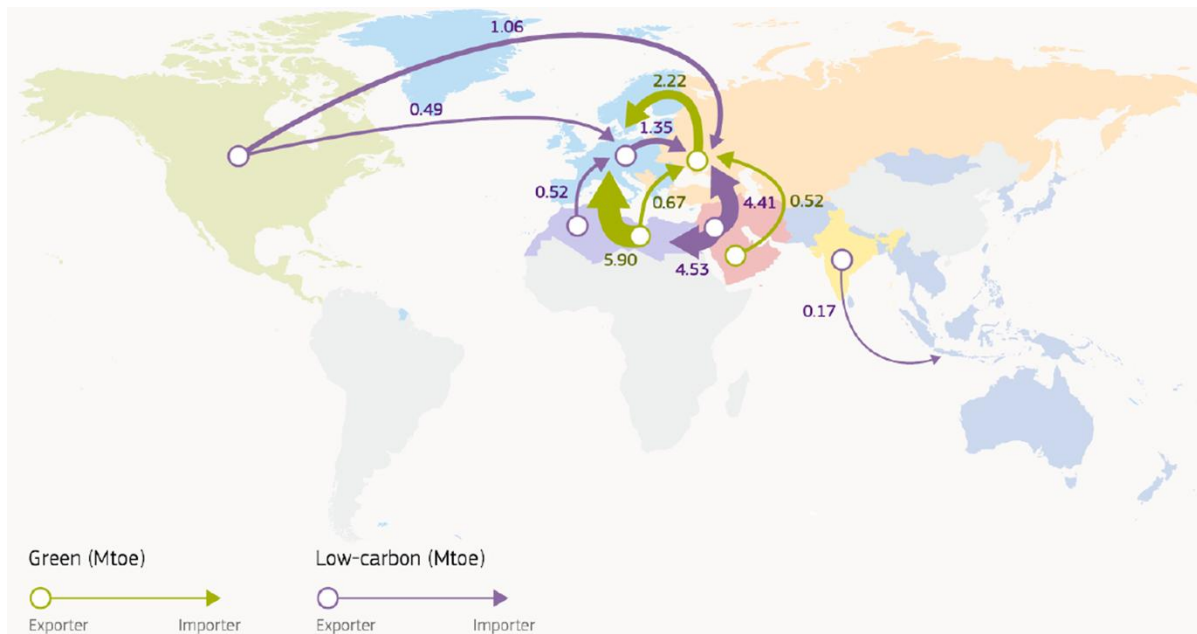


Abbildung 8: H₂-Handel zwischen Weltregionen 2050¹¹

Da die Transportkosten für E-Fuels geringer als die für H₂ sein sollen, werden E-Fuels an geeigneten Standorten hergestellt und per Schiff zu den Nachfragern transportiert. Die EU könnte demnach E-Fuels in 2050 zu 54 % selbst erzeugen bzw. aus dem innereuropäischen Handel decken. Die meisten E-Fuel-Importe kommen aus den EFTA-Staaten, aus dem restlichen Zentraleuropa, aus Eurasien und aus Nordafrika in die EU. Kleinere Mengen werden aus Nord- und Zentralamerika per Schiff importiert (JRC 2022, S. 48).

Die Handelswege für E-Fuels sind länger als für H₂, weil z.B. Subsahara-Afrika und Südostasien E-Fuels importieren, bei H₂ aber Selbstversorger sind (JRC 2022, S. 49).

Shell Sky 1.5 scenario

Der Handel mit H₂ und seinen Derivaten wird in diesem Szenario nicht betrachtet (Shell 2021).

¹¹ Quelle: JRC 2022, S. 46. Die in den Karten dargestellten Handelsströme stellen den Nettohandel zwischen 10 globalen Regionen dar und eliminieren daher einen Teil des interregionalen Handels, der in den Grafiken und im Text dargestellt ist.

6 Literaturverzeichnis

IEA (2021): Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector.

IPCC (2022): Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of IPCC.

Irena (2022a): Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I. Trade outlook for 2050 and way forward.

Irena (2022b): World Energy Transitions Outlook. 1.5o C Pathway.

JRC (2022): Global Energy and Climate Outlook (GECO). Energy trade in a decarbonised world.

Shell (2021): The energy transformation scenarios.