



Ariadne-Report

Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045

Szenarien und Pfade im Modellvergleich

KOPERNIKUS
Ariadne **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Der vorliegende Ariadne-Report wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Er spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Herausgegeben von

Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgen-
forschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

Oktober 2021

DOI: 10.48485/pik.2021.006

Bildnachweise

Titel: Yeshe Kangrangz / Unsplash; Kapitel 1: Andrea Boldizsar / Unsplash; Kapitel 2: funky-data / iStock; Kapitel 3: Julian Hochgesang / Unsplash; Kapitel 4: Robin Sommer / Unsplash; Kapitel 5: huangyifei / iStock; Kapitel 6: audioundwerbung / iStock; Kapitel 7: Clint Adair / Unsplash; Kapitel 8: Adam Vradenburg / Unsplash; Kapitel 9: Dan Meyers / Unsplash; Kapitel 10: Micheile Henderson / Unsplash

6. Wasserstoff & E-Fuels

6.1	Zusammenfassung	176
6.2	Einleitung	177
6.3	Überblick über die Entwicklungen in den Szenarien	179
6.4	Nachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels	181
6.4.1	<i>Sektorale Nutzung von Wasserstoff</i>	182
6.4.2	<i>Sektorale Nutzung von E-Fuels</i>	183
6.4.3	<i>Nutzung im Verkehrssektors</i>	184
6.4.4	<i>Nutzung im Industriesektor</i>	185
6.4.5	<i>Nutzung im Gebäudesektor</i>	187
6.5	Das Angebot von Wasserstoff und E-Fuels	188
6.6	Anforderungen an Infrastrukturen für Wasserstoff	193
6.7	Prioritäten bis 2030	195
6.8	Fazit	196
	Literaturangaben	198

Autorinnen und Autoren

Benjamin Pfluger, Falko Ueckerdt, Adrian Odenweller



6.1 Zusammenfassung

Wasserstoff- und E-Fuel¹⁷-Optionen müssen möglichst bald entwickelt werden, um ihre Wirkung nach 2030 zu entfalten. Bis 2030 ist der Beitrag von Wasserstoff zur Erreichung der Klimaschutzziele in allen Szenarien begrenzt. Ein schneller Hochlauf der Angebots- und Nachfrageseite sowie der Wasserstoffinfrastruktur ist dringend erforderlich. Deutliche Wasserstoff- und E-Fuel-Importe werden in allen Szenarien nach 2030 benötigt und müssen daher zeitnah in die Wege geleitet werden.

„No-regret“-Optionen für Wasserstoff müssen schnell angegangen werden. Für die Nutzung von Wasserstoff und E-Fuels gibt es langfristig eine große Spannweite (250 - 700 TWh). Einige Maßnahmen sind in allen Szenarien erforderlich und können daher als „No-regret“-Optionen gesehen werden. Im Zentrum stehen hierbei Wasserstoff für Stahl und Ammoniak sowie E-Fuels für die Petro-Chemie, Flug- und Schiffsverkehr. Diese Optionen sind technisch gut geeignet, Keimzellen eines Wasserstoffnetzes zu werden, da sie grünen Wasserstoff verhältnismäßig flexibel einsetzen können und die Nachfragen an wenigen Punkten im System gebündelt vorliegen.

Die Rolle von Wasserstoff und E-Fuels für die Wärmeversorgung von Gebäuden ist vergleichsweise klein. Die direkte Elektrifizierung mit Wärmepumpen ist beim Gebäudeneubau, der Fernwärme und für einen großen Teil des Gebäudebestands die günstigere und robustere Klimaschutzoption. Die Gasnachfrage für Gebäudewärme sinkt in jedem Szenario um mindestens 70 %. Wasserstoff ist in anderen Sektoren nützlicher und wird nur zum Heizen verwendet, wenn er im Überfluss produziert oder importiert werden kann.

Im Verkehrssektor ist im Schwerlastverkehr das Rennen zwischen Strom und Wasserstoff noch offen. Im Pkw-Bereich zeichnet sich ab, dass batterieelektrische Fahrzeuge den Markt dominieren werden. Im Lkw-Bereich sind die Unterschiede bei den Gesamtkosten der unterschiedlichen Antriebsvarianten geringer. Mit einer weiteren Verbesserung der Energiedichten von Batterien und dem Ausbau von Schnelllademöglichkeiten könnte auch dieses Segment weitgehend elektrifiziert werden.

Die Schaffung einer Wasserstoffinfrastruktur mit ausreichenden Speichermöglichkeiten ist in allen Szenarien erforderlich. Der eingesetzte Wasserstoff erreicht zeitnah Mengen, die nur mit

¹⁷ Unter E-Fuels werden alle Energieträger zusammengefasst, die aus Elektrolysewasserstoff hergestellt werden. Dies umfasst unter anderem synthetisches Methan und flüssige Kraftstoffe (Power-to-Liquid, PtL), wie Fischer-Tropsch-Kraftstoffe. Für die E-Fuel-Herstellung wird neben Wasserstoff auch Kohlenstoff benötigt, der meist aus Kohlendioxid oder Kohlenstoffmonoxid stammt.

einer Netzinfrastruktur effizient verteilt werden können. Zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage müssen substanzielle Speichermöglichkeiten geschaffen werden, wofür geologische Speicher, insbesondere Salzkavernen, aus heutiger Sicht unumgänglich sind.

6.2 Einleitung

Die Frage, welche Rollen Wasserstoff und E-Fuels in der Dekarbonisierung spielen sollen, zählt zu den kontroversesten Aspekten in den Diskussionen um die Ausgestaltung der Energiewende. Die Debatten um die Rolle von strombasierten Energieträgern haben dabei seit dem Beschluss des Bundesverfassungsgerichts und im Zuge der Verschärfung der Klimaschutzziele (BMU, 2021b) noch einmal zugenommen. Wasserstoff und E-Fuels stehen für viele Verkehrs- und Wärmeanwendungen in Konkurrenz zur direkten Elektrifizierung.

Das wesentliche Argument für die Elektrifizierung ist dabei, dass der Pfad energieeffizient und dadurch zumindest auf den ersten Blick vergleichsweise kostengünstig ist. Zudem sind viele elektrifizierende Technologien bereits verfügbar und gewinnen stetig Marktanteile (z. B. batterieelektrische Fahrzeuge (battery electric vehicles, BEV) und Wärmepumpen). Die *indirekte* Elektrifizierung mit Wasserstoff und E-Fuels steht im Vergleich noch ganz am Anfang. Eine Kernherausforderung ist die mangelnde Wettbewerbsfähigkeit. Dies liegt zum Teil an hohen Effizienzverlusten und hohen Kosten, die entlang der vergleichsweise langen Umwandlungsketten entstehen und mit einem deutlich erhöhten Strombedarf einhergehen. Ein prägnantes Beispiel dafür ist der Verkehrsbereich, bei dem der Strombedarf pro gefahrenem Kilometer bei E-Fuels ca. fünfmal höher ist als bei batterieelektrischen Fahrzeugen (Ueckerdt et al., 2021). Der wesentliche Vorteil von Wasserstoff und E-Fuels ist, dass diese bei einigen Anwendungen über die Grenzen der Elektrifizierung hinausgehen können.

Es gibt daher weitgehende Einigkeit unter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, Analytistinnen und Analysten, Stakeholdern und Marktakteuren, dass direktelektrische Optionen im Grundsatz vorzuziehen sind und alternative Lösungen nur in den Bereichen eingesetzt werden sollten, in denen eine Elektrifizierung technisch nicht machbar oder zu aufwendig und damit auch im Vergleich zum Einsatz von Wasserstoff und E-Fuels zu teuer ist.

Allerdings gibt es unterschiedliche Einschätzungen dazu, welche Bereiche mit vertretbarem Aufwand elektrifiziert werden können. Dabei besteht zunächst Einigkeit über eine Reihe von „No-regret-Anwendungen“ von Wasserstoff und E-Fuels, wie der Produktion von Primärstahl, Produkte der Grundstoffchemie, Langstreckenflugverkehr und -schifffahrt. Die Debatte fokussiert

sich daher auf weitere Anwendungen vor allem bei der Gebäudewärme und dem Straßenverkehr. Die Argumentation der Befürworterinnen und Befürwortern eines breiten Einsatzes von Wasserstoff und E-Fuels fußt daher zum Teil auf der Einschätzung, dass für viele Bereiche eine Elektrifizierung nicht möglich oder zu teuer ist, wobei indirekte Kosten im Stromsystem ebenfalls eine Rolle spielen. Ein häufig diskutiertes Beispiel hierfür sind Gebäude, bei denen eine Versorgung mit elektrischen Wärmepumpen in Bestandsgebäuden Sanierungsmaßnahmen und einen substanziellen Stromnetzausbau erfordern kann. Einige Studien schätzen, dass dies für einen breiten Einsatz von Wasserstoff in Gebäuden spricht (dena, 2018), während andere Studien zu dem Schluss kommen, dass Wasserstoff und E-Fuels sowie die dafür erforderliche Transformationen so teuer sind, dass Sanierung und Elektrifizierung für die meisten Gebäude die kosteneffizienten Optionen sind (Gerhardt et al., 2020).

Ein weiterer zentraler Punkt in der Diskussion um direkte und indirekte Elektrifizierung ist das realisierbare Erneuerbare-Energien-(EE)-Ausbaupotenzial in Deutschland und Europa. Elektrifizierung ist nur dann umfangreich möglich, wenn die entsprechenden Potenziale für erneuerbare Stromerzeugung in Deutschland und seinen Stromnachbarn realisiert werden können. Stößt dies an Grenzen, zum Beispiel durch fehlende Akzeptanz, können mit dem Import von insbesondere E-Fuels auch verstärkt die EE-Potenziale außerhalb Europas genutzt und die heimischen Ressourcen geschont werden.

Die Szenarien in Ariadne loten die beiden zentralen Energiewende-Dimensionen 1) direkte/indirekte Elektrifizierung und 2) Import/Export durch das Design der Transformationspfade aus. Zum einen werden in der Endnutzung die Mengen von Strom, Wasserstoff und E-Fuels variiert. Die Szenarien *Elektrifizierung* setzen dabei stark auf direktelektrische Ansätze, wohingegen in den *Wasserstoff*-Szenarien substanzielle Mengen an Wasserstoff aus Elektrolyse eingesetzt werden und im *E-Fuels*-Szenario der Fokus auf synthetischen strombasierten Kohlenwasserstoffen liegt. Zum anderen wird in den Szenarien *inländisch* von einem hohen nutzbaren EE-Potenzial in Deutschland ausgegangen, während die Szenarien *Import* von einer schnelleren Verfügbarkeit günstiger Wasserstoff- und E-Fuel-Importe ausgehen. Die beiden Varianten *inländisch* und *Import* gibt es sowohl für das *Elektrifizierungs*- als auch für das *Wasserstoff*-Szenario. Für das *E-Fuels*-Szenario wird davon ausgegangen, dass hier der Schwerpunkt auf Energieimporten liegt. Die Transportfähigkeit von E-Fuels erlaubt es, einen Teil des langfristigen EE-Ausbaubedarfs ins Ausland zu verlagern, z. B. in schwach besiedelte Regionen, wie die Wüsten Nordafrikas.

Allen Szenarien ist gemein, dass Wasserstoff schwerpunktmäßig aus Strom mittels Elektrolyse erzeugt wird. Der Einsatz fossiler Energieträger zur Wasserstofferzeugung, also z. B. von sogenanntem „blauen Wasserstoff“ aus Erdgas unter Einsatz von Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS), wurde ausgeschlossen oder stark begrenzt. Wasserstoff aus Biomasse ist aufgrund niedriger Potenziale ebenfalls stark begrenzt.

Die Analyse der Szenarien erlaubt es, die technologischen Spielräume zu explorieren, die im Rahmen der verschärften Klimaschutzziele verbleiben. Somit lassen sich Bandbreiten für die drängenden Fragen im Themenfeld strombasierter Energieträger ermitteln:

- Wie entwickelt sich der Hochlauf der Nachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels?
- Welche Sektoren und Anwendungen nutzen Wasserstoff und E-Fuels?
- Welche Rolle spielen Energieimporte und heimischer EE-Ausbau?

6.3 Überblick über die Entwicklungen in den Szenarien

Im Folgenden werden die Ergebnisse zweier Energiesystemmodelle verglichen, REMIND und REMod¹⁸. Im Falle von REMod werden die nichtenergetischen Verbräuche von Wasserstoff und E-Fuels als Grundstoffe in der Industrie aus den Ergebnissen des detaillierten Sektormodells FORECAST ergänzt. Zudem werden für die Analysen zur Endenergienutzung die sektorspezifischen Ergebnisse der Sektormodelle für Industrie (FORECAST), Verkehr (DEMO) und Gebäude (REMod) zu einem Hybrid-Modell kombiniert.

Die Bandbreiten des Einsatzes von Wasserstoff und E-Fuels sind für alle Szenarien in Abbildung 6.1 dargestellt. Es zeigt sich, dass bis 2030 der Lösungsraum über die Szenarien und Modelle hinweg relativ schmal ist: Der Einsatz variiert zwischen 43 und 81 TWh. Wasserstoff bildet hierbei den Einstieg in die indirekte Elektrifizierung, während E-Fuels bis 2030 fast keine Rolle spielen. Die 2030-Mengen sind klein verglichen mit dem gesamten Endenergiebedarf (~3 %). Bis 2030 sind Energieeffizienz und Elektrifizierung die tragenden Säulen des Klimaschutzes.

Der Hochlauf in den Szenarien deckt sich mit der Größenordnung der Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie (BMWi, 2020a): Diese sieht zwar einen Wasserstoff-Einsatz von 90 bis 110 TWh in 2030 vor, schließt jedoch den bestehenden Einsatz von 55 TWh für Raffinerien und einige Prozesse der chemischen Industrie mit ein, der bisher über Dampfreformation aus Erdgas oder

¹⁸ Details der Modelle sind im Appendix dieses Berichts dokumentiert.

als Nebenprodukt bei Prozessen anfällt. Dieser Bedarf an fossilem Wasserstoff wird in Energiesystemmodellen typischerweise nicht explizit abgebildet, da diese Nachfragen zunächst fossile Energieträger beziehen und Wasserstoff nur als Zwischenprodukt existiert.

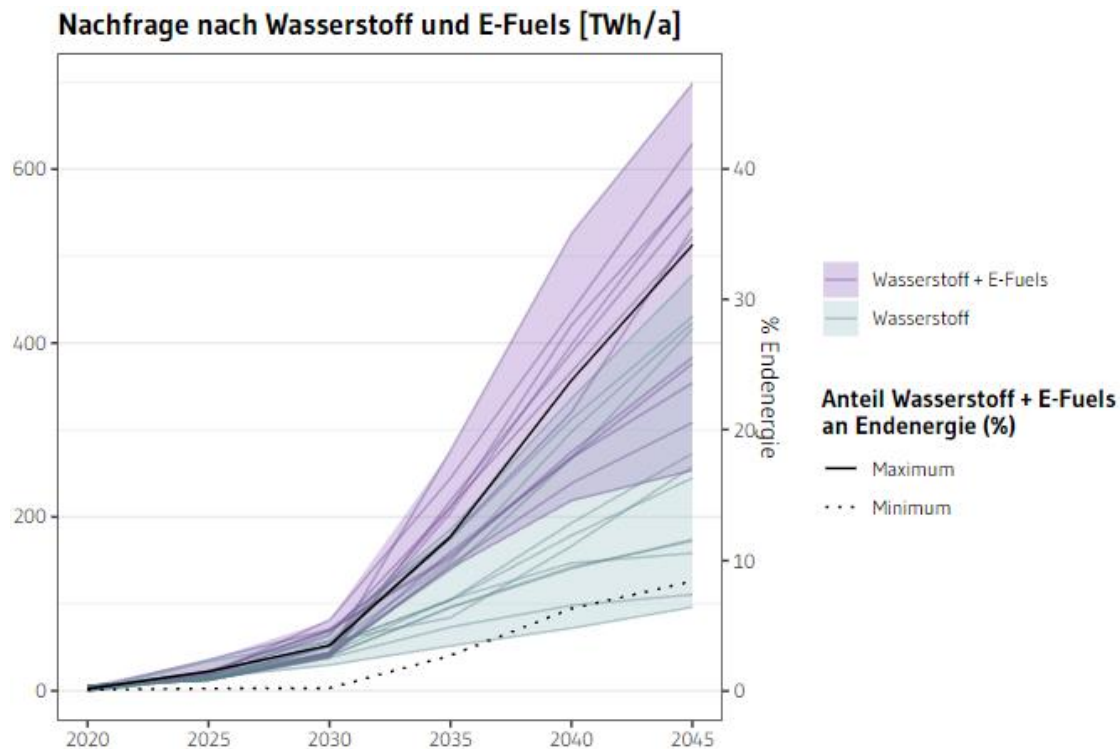


Abbildung 6.1: Entwicklung des Einsatzes von Wasserstoff und E-Fuels in den Szenarien.

Nach 2030 verbreitert sich der Spielraum in Bezug auf die Rolle von Wasserstoff und E-Fuels deutlich. In 2045 liegt der gesamte Einsatz von Wasserstoff und E-Fuels je nach Szenario zwischen 250 und 700 TWh. Wasserstoff und E-Fuels können nach 2030 eine signifikante oder auch stark begrenzte Rolle spielen. Sie können breit in allen Sektoren eingesetzt werden, oder aber sehr fokussiert, wenn die Klimaschutzstrategie auch nach 2030 auf Elektrifizierung ausgelegt ist. Diese Spannweite verdeutlicht, warum es in der Debatte um Wasserstoff geht, und warum strategische Entscheidungen so fundamental und gleichzeitig herausfordernd sind. Die Ariadne-Szenarien untersuchen die Erfordernisse und Auswirkungen der verschiedenen Szenarien und leiten robuste Gemeinsamkeiten sowie sogenannte „No-regret“-Maßnahmen ab, die möglichst schnell in die Wege geleitet werden sollten.

6.4 Nachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels

In allen Szenarien ist ein schneller und substanzieller Hochlauf sowohl der Produktion als auch der Nutzung von zunächst Wasserstoff und später auch E-Fuels zu beobachten. Bereits 2030 gibt es eine substanzielle Nachfrage nach Wasserstoff. Nach 2030 wächst die Nutzung von Wasserstoff und E-Fuels weiter, wenngleich hier die Szenarienunterschiede groß sind.

Die Ergebnisse werden im Folgenden für die drei Szenarien mit höheren Energieimportanteilen diskutiert. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse für sowohl Wasserstoff- als auch E-Fuel-Nutzung in allen Sektoren ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

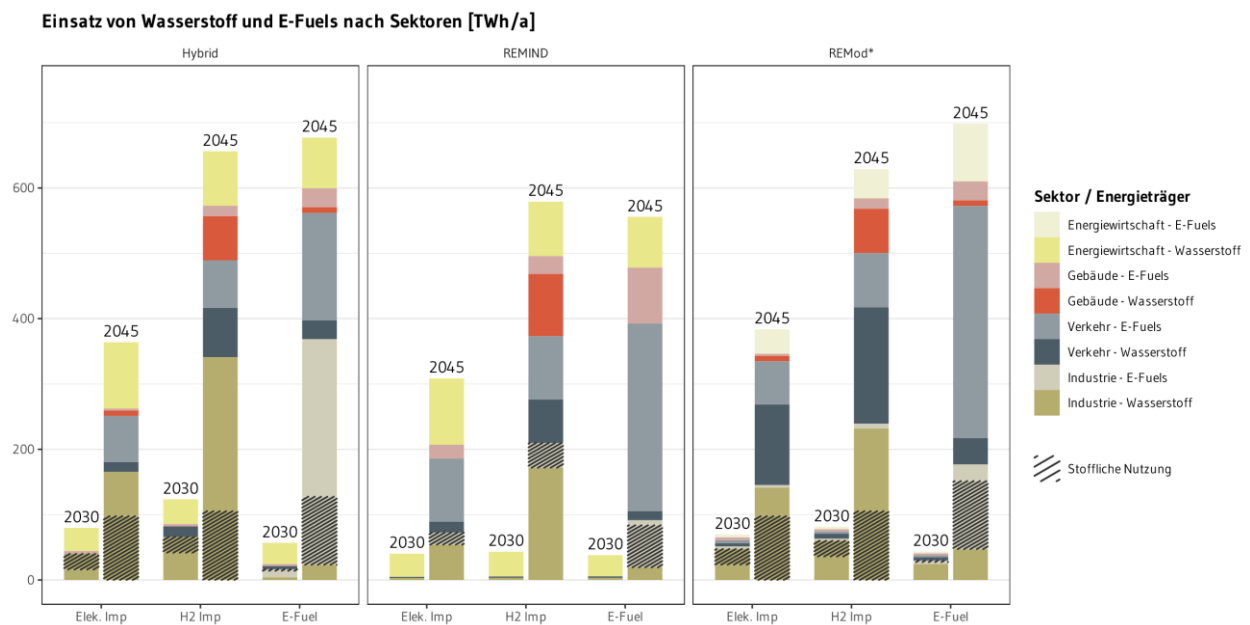


Abbildung 6.2: Entwicklung der Nachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels in den Szenarien mit höheren Energieimportanteilen.

In 2030 gibt es zwei vorwiegende Anwendungen, für die der knappe Wasserstoff den größten systemischen Wert hat: Einerseits für die saisonale Speicherung und Integration eines beschleunigten heimischen EE-Ausbaus (REMIND-Modell) und andererseits, um die Transformation hin zu CO₂-armen Schlüsseltechnologien im Industriesektor zu beginnen (REMod*-Modell). Auch längerfristig werden in fast allen Szenarien mindestens 100-200 TWh pro Jahr für die energetische und stoffliche Nutzung in der Industrie benötigt. Dieser Einsatz von Wasserstoff und E-Fuels ist eine „No-regret“-Option, die ein robustes Ergebnis fast aller Szenarien darstellt. Der Einsatz im Verkehr- und Gebäudesektor hingegen variiert stark mit dem technologischen

Schwerpunkt der Szenarien. Im Verkehrssektor wird auch im *Elektrifizierungs*-Szenario ein kleinerer Teil des LKW-, Flug- und Schiffsverkehrs mit Wasserstoff und E-Fuels versorgt. Im *E-Fuels*-Szenario wird der Verkehrssektor zum größten Abnehmer von Wasserstoff und E-Fuels. Im Gegensatz dazu sind die Nachfragen im Gebäudesektor auch im *Wasserstoff*- und *E-Fuels*-Szenario vergleichsweise klein und im *Elektrifizierungs*-Szenario sehr klein.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse für Wasserstoff, E-Fuels und die Nachfragesektoren Verkehr, Industrie und Gebäude einzeln diskutiert.

6.4.1 Sektorale Nutzung von Wasserstoff

Über die Modelle und Szenarien hinweg zeigen sich Bandbreiten der direkten Wasserstoffnutzung von 50 - 120 TWh in 2030 und 100 - 600 TWh in 2045.

Die sektorale Nutzung von Wasserstoff unterscheidet sich nicht nur zwischen den Szenarien, sondern auch zwischen den Modellen, die leicht unterschiedliche Rollen dafür vorsehen (siehe Abbildung 6.3). Im REMIND-Modell wird reiner Wasserstoff im *Elektrifizierungs*- und *E-Fuels*-Szenario überwiegend für die Rückverstromung und in geringerem Umfang in der Industrie eingesetzt, da dort vorwiegend Biomasse stofflich und energetisch genutzt wird. Die Rückverstromung beginnt bereits vor 2030 und stellt in REMIND in allen Szenarien auch langfristig eine der größten Anwendungen für Wasserstoff dar.

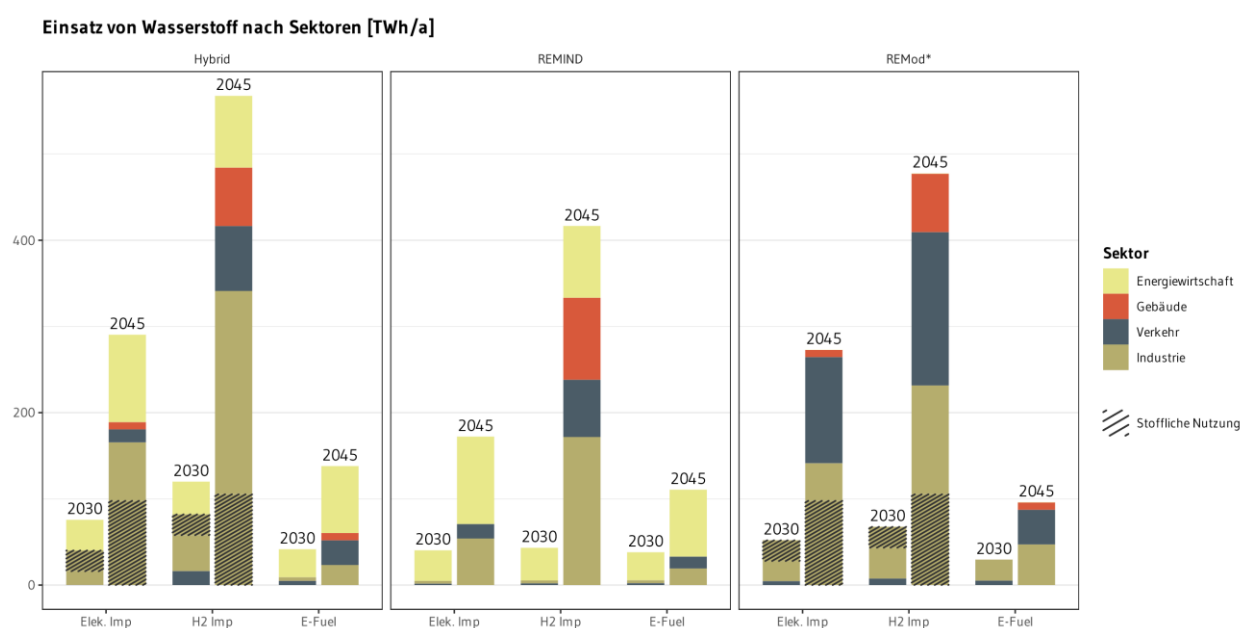


Abbildung 6.3: Entwicklung der Nachfrage nach Wasserstoff mit höheren Energieimportanteilen.

Im kombinierten REMod*-Modell wird der Wasserstoffhochlauf wenig über die Rückverstromung getrieben, da REMod* dort auf E-Fuels (E-Methan) setzt. Stattdessen sind industrielle Nachfragen (stofflich und energetisch) der stärkste Treiber. Später kommen Wasserstoffanwendungen im Verkehrssektor hinzu.

6.4.2 Sektorale Nutzung von E-Fuels

Neben reinem Wasserstoff kommen in allen Szenarien auch daraus hergestellte Energieträger zum Einsatz (E-Methan, flüssige E-Fuels wie E-Methanol, E-Benzin oder E-Kerosin). Der E-Fuel-Hochlauf ist in Abbildung 6.4 dargestellt. In 2030 kommen E-Fuels nur in REMod* und nur in begrenztem Umfang von 5 bis 10 TWh zum Einsatz; diese werden als Beimischung über E-Methan in Industrie und Gebäuden und über Flüssigkraftstoffe im Verkehr eingesetzt.

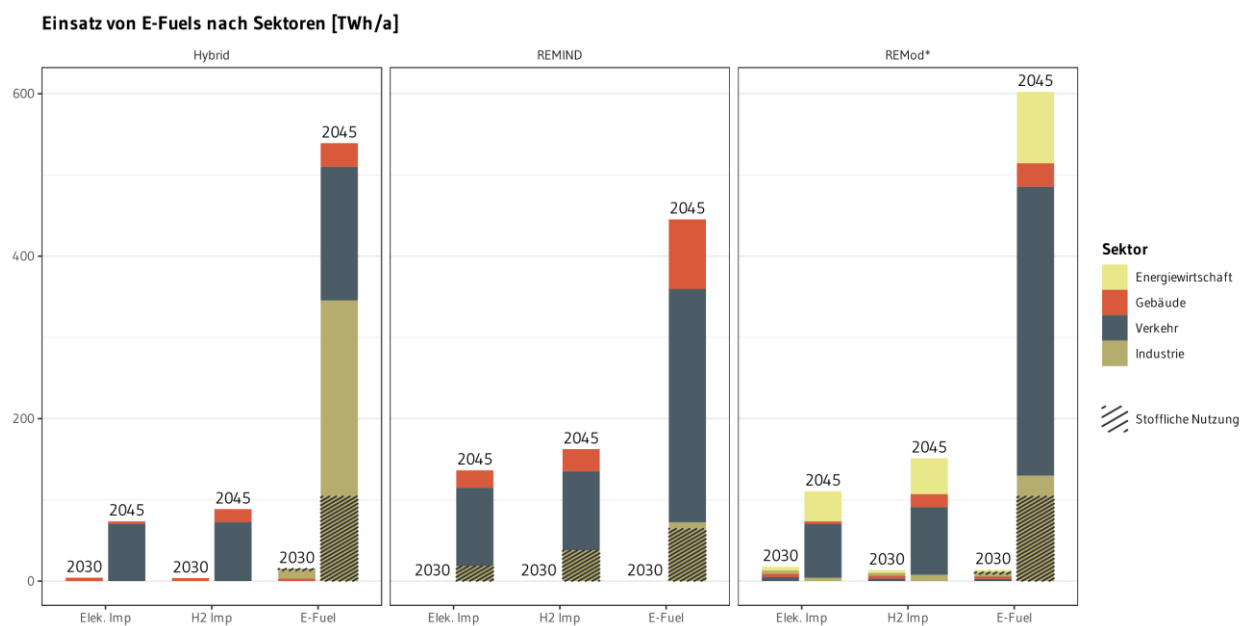


Abbildung 6.4: Entwicklung der Nachfrage nach E-Fuels in den Szenarien mit höheren Energieimportanteilen

Bis 2045 steigt der E-Fuel-Einsatz in allen Szenarien und Modellen. E-Fuel-Importe sind für Klimaneutralität erforderlich, wobei die Szenarien eine Bandbreite zu ihrer spezifischen Rolle zeigen, die noch größer ist als bei der direkten Nutzung von Wasserstoff. Im *Elektrifizierungs*-Szenario bleibt der E-Fuel-Einsatz auf einem vergleichsweise moderaten Niveau von ~100 TWh und im *Wasserstoff*-Szenario steigt er leicht auf 100 - 200 TWh. Nur im *E-Fuels*-Szenario steigt die Verwendung deutlich auf 400 - 600 TWh in 2045.

In den meisten Szenarien sind E-Fuels Kraft- und Brennstoffe in vorwiegend flüssiger Form und werden vor allem im Verkehrssektor oder als Grundstoffe in der Industrie eingesetzt. E-Methan wird in geringerem Maße für Prozesswärme (*E-Fuels*-Szenario des FORECAST-Modells), für die Rückverstromung (REMod-Modell) oder im Gebäudesektor verwendet (v. a. *E-Fuels*-Szenario des REMIND-Modells).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass es nur im Verkehrssektor und bei chemischen Grundstoffen unvermeidbar ist, E-Fuels zu nutzen.

6.4.3 Nutzung im Verkehrssektors

Der Verkehrssektor ist besonders in der langfristigen Perspektive zusammen mit der Industrie der Sektor mit der höchsten Nachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels. Dies liegt vor allem daran, dass insbesondere schwere Verkehrsträger wie Schiffe und Flugzeuge für lange Strecken kaum elektrifizierbar sind, sodass kohlenstoffbasierte Energieträger aufgrund ihrer hohen Energiedichte unumgänglich sind. Die Nachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels für die bereits diskutierten Szenarien in den Jahren 2030 und 2045 sind in Abbildung 6.5 dargestellt.

Die Modelle sehen über die Szenarien hinweg im Luft- und Schiffsverkehr E-Fuels als einzige Option an. In REMod sind die Nachfragen dabei aber insgesamt etwas höher, im *E-Fuels*-Szenario sogar deutlich.

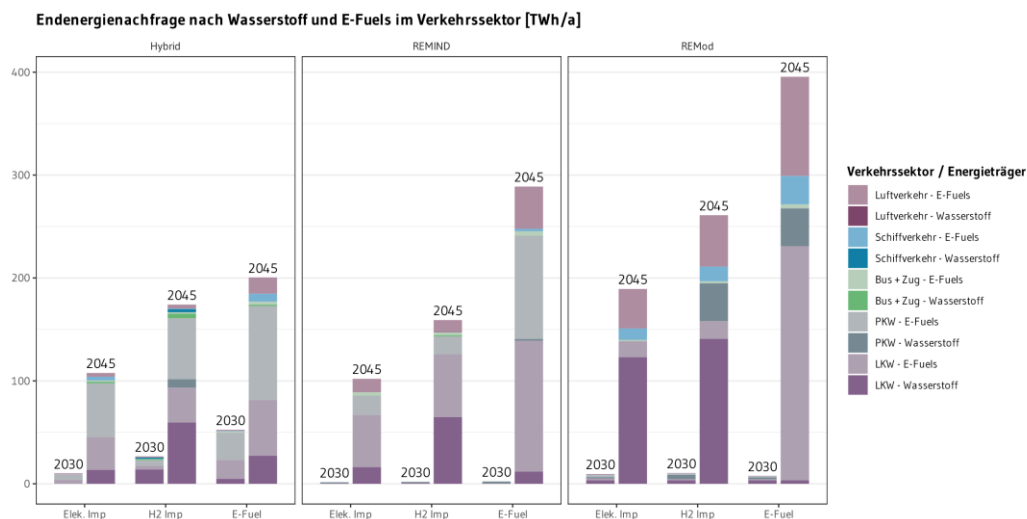


Abbildung 6.5: Nachfragen nach Wasserstoff und E-Fuels des Verkehrssektors in 2030 und 2045 (inklusive Bunkertreibstoffe in Schiff- und Luftverkehr).

In 2030 spielen Wasserstoff und E-Fuels nur im Sektormodell DEMO (dargestellt im Hybridmodell) eine signifikante Rolle im Verkehrssektor – vor allem für LKW und etwas weniger im Pkw-Sektor.

Bis 2045 erhöht sich die Nachfrage des Verkehrssektors dann je nach Szenario und Modell auf 100 bis 400 TWh. Die Energiesystemmodelle sehen hier den größten Wert und Einsatz beim LKW-Schwerlastverkehr und Luftverkehr. Die große Bandbreite der Szenarien und Modelle bezüglich des Einsatzes von Wasserstoff und E-Fuels im Lkw-Schwerlastverkehr spiegelt die technologischen Unsicherheiten in der Forschung und Industrie wieder. Das Sektormodell DEMO sieht im Gegensatz zu den Energiesystemmodellen eine Verwendung von E-Fuels auch in Pkws in allen Szenarien.

Insgesamt spiegeln die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Modelle und Szenarien die derzeitige Diskussion wider: Es besteht ein Konsens, dass E-Fuels für den Flug- und Schiffsverkehr erforderlich sind; die notwendige Menge hängt von der Verkehrsnachfrage, der Effizienz und der Verfügbarkeit von Biotreibstoffen ab. Im Schwerlastverkehr werden alle Optionen – batterieelektrische Fahrzeuge, Wasserstoff und Biotreibstoffe – diskutiert. Die Entwicklungen der letzten Jahre zeigen, dass Elektrifizierung hier entgegen den noch vor fünf Jahren gängigen Einschätzungen eine ernstzunehmende Option werden kann. Im Pkw-Bereich werden zwar alle drei Energieformen noch diskutiert, jedoch zeichnet sich hier ab, dass batterieelektrische Fahrzeuge zwar nicht die alleinige, aber vermutlich die dominierende Antriebstechnologie wird.

6.4.4 Nutzung im Industriesektor

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Modells FORECAST herangezogen, da dieses von allen Modellen im Modellverbund die vollständigste und detaillierteste Abbildung des Industriesektors beinhaltet. Die Ergebnisse werden detailliert in Kapitel 4 dieses Berichts diskutiert. Bezüglich der Mengen von Wasserstoff und E-Fuels lassen sich aber einige wichtige Schlussfolgerungen ziehen. Zunächst einmal ist die Industrie in allen Szenarien mit substantiellen Bedarfen bereits in 2030 vertreten. Diese liegen zwischen rund 16 TWh im E-Fuel-Szenario und 66 TWh im Wasserstoff-Szenario (Abbildung 6). Im Elektrifizierungs- und Wasserstoff-Szenario spielen dabei die chemische Industrie und der Stahlsektor eine bedeutende Rolle: In der Ammoniakproduktion und in Direktreduktionsanlagen für die Stahlproduktion kann grüner Wasserstoff relativ flexibel eingesetzt werden, insbesondere in Zeiten, in denen er durch ein gutes EE-Angebot verfügbar ist. Bei

Engpässen von grünem Wasserstoff kann in diesen Anwendungen Erdgas als Brückentechnologie verwendet werden. Zudem ist die für die Versorgung dieser Nachfrager benötigte Infrastruktur deutlich einfacher zu realisieren als die Infrastruktur für die breite Verwendung von Wasserstoff (z. B. in Gebäuden, Verkehr oder anderer Prozesswärmeerzeugung). Die Anwendungen bilden somit nachfrageseitig eine ideale „Keimzelle“ für die erste Phase im Hochlauf eines Wasserstoff-Leitungsnetzes.

Bis 2045 steigt der Gesamtbedarf von Wasserstoff und E-Fuels auf 160 bis 370 TWh (Abbildung 6.6). Hohe Bedarfe ergeben sich besonders dann, wenn Wasserstoff und E-Fuels neben den stofflichen Bedarfen auch in der Prozesswärme eingesetzt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Industrie in den meisten Anwendungen prinzipiell sowohl Wasserstoff als auch E-Fuels einsetzen kann. Selbst in den Anwendungen, die letztlich Wasserstoff im Prozess benötigen, wie die Ammoniakproduktion, kann eine Versorgung prinzipiell auch mit E-Methan erfolgen, das vor Ort wieder umgewandelt wird. Ob ein solcher Pfad trotz der zusätzlichen Umwandlungsschritte kosteneffizient sein kann, ist zweifelhaft, soll aber im weiteren Projektverlauf noch analysiert werden. Insgesamt bestehen in der Industrie neben der notwendigen Nutzung von Wasserstoff und E-Fuels (stofflich in der Chemieindustrie, als Reduktionsmittel in der Stahlindustrie) große Potenziale für die direkte Elektrifizierung. Die Konkurrenz dieser Optionen wird maßgeblich über die verfügbare Infrastruktur und die Energieträgerpreise entschieden.

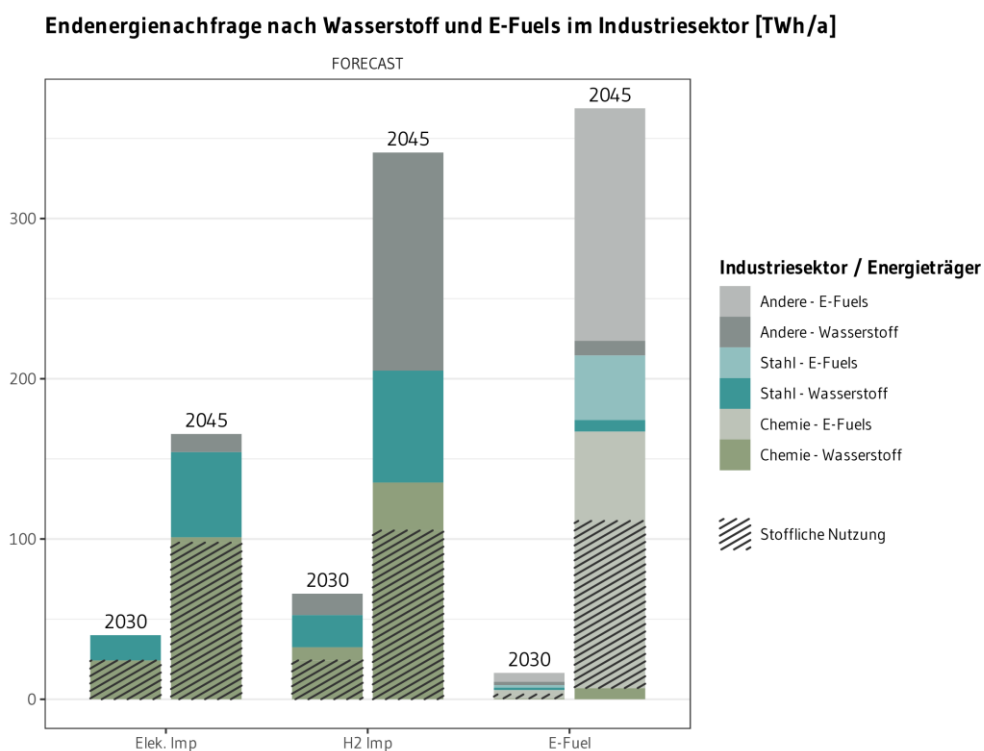


Abbildung 6.6: Nachfragen nach Wasserstoff und E-Fuels des Industriesektors in 2030 und 2045.

6.4.5 Nutzung im Gebäudesektor

Gebäudewärme ist einer der wichtigsten und herausforderndsten Sektoren der Energiewende. Bereits die Erreichung der Sektorziele ist eine große Aufgabe, weil der Sektor durch die langen Lebensdauern von Gebäuden und Heizsystemen gekennzeichnet ist. Darüber hinaus können treibhausgasarme Heizsysteme, wie Wärmepumpen, in manchen Gebäuden im Bestand erst nach grundlegenden (und damit teuren) Sanierungen eingesetzt werden. Für die Nutzung von Wasserstoff ist zudem zunächst eine aufwendige und koordinierte Umstellung der Infrastrukturen und aller angeschlossenen Endgeräte erforderlich.

In Abbildung 6.7 werden die Szenarienergebnisse des REMod-Modells gezeigt, da dieses den Gebäudesektor mit großem Detail abbildet. Bis 2030 erfolgt ein nur sehr begrenzter Einsatz von Wasserstoff und E-Fuels für Gebäudewärme – durch eine Beimischung von E-Methan in das Erdgasnetz (REMod-Modell). Zur Erreichung des 2030-Sektorziels spielen alternative Optionen wie Wärmepumpen und Sanierungen eine deutlich größere Rolle.

In 2045 unterscheidet sich die Rolle von Wasserstoff und E-Fuels und somit die Rolle von Gasnetzen für die Wärmeversorgung von Gebäuden in den Szenarien deutlich. Im *Elektrifizierungs*-Szenario werden zwar noch Gase eingesetzt, allerdings nur in geringem Umfang von ca. 10 TWh, also für einige wenige Verteilnetze. Im *Wasserstoff*-Szenario müssen die Heizsysteme und Verteilnetze gebietsweise sukzessive auf Wasserstoff umgestellt werden und werden in wenigen Fällen mit E-Methan betrieben. Im *E-Fuels*-Szenario wird Erdgas sukzessive durch E-Methan-Beimischung ersetzt. Gleichzeitig reduziert sich auch hier aufgrund von Elektrifizierungs- und Effizienzmaßnahmen die Rolle von Gasen deutlich, sodass diese langfristig bei nur ~40 TWh liegt.

Insgesamt zeigen die Szenarien, dass im Bereich der Gasnetze in jedem Pfad großer Transformationsbedarf besteht und das Gasnetz nicht im gleichen Umfang weiterbetrieben werden kann. Selbst unter den für Gase optimalen Bedingungen im *Wasserstoff*- und *E-Fuels*-Szenario nimmt die Bedeutung deutlich ab, da andere Optionen günstiger sind.

Endenergienachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels im Gebäudesektor [TWh/a]

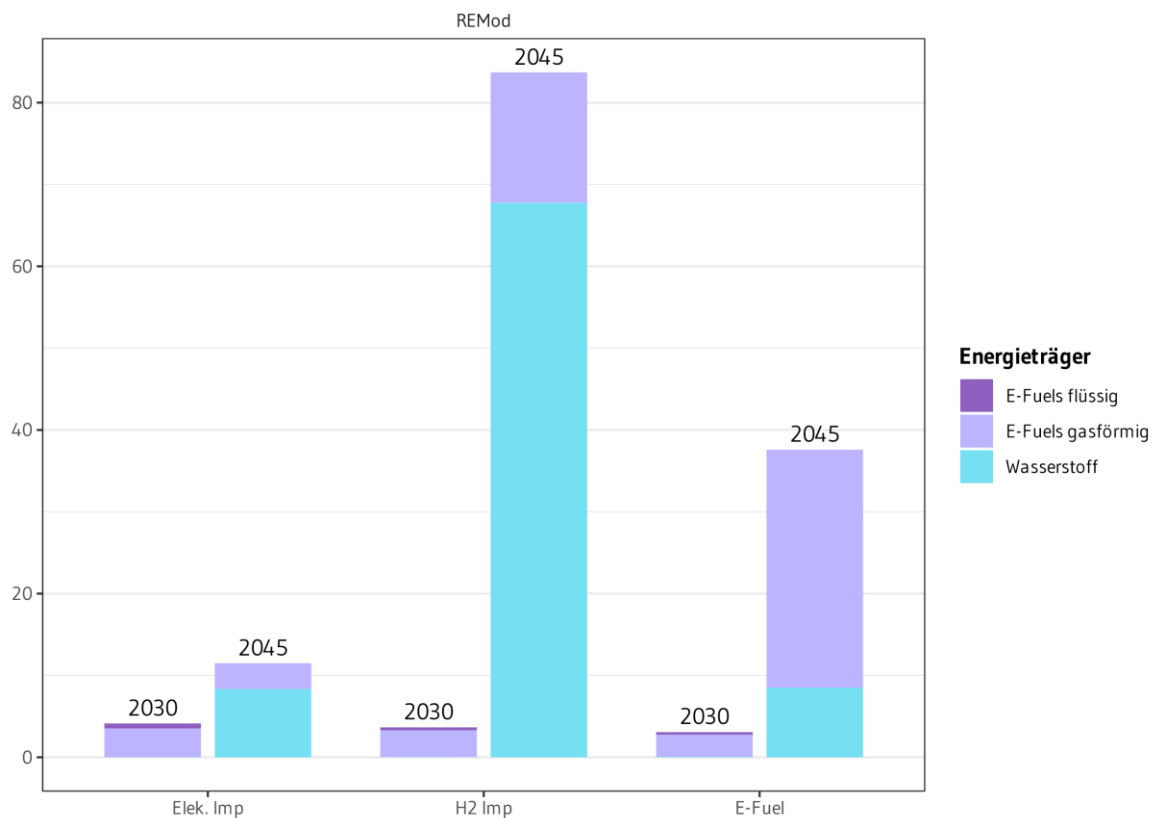


Abbildung 6.7: Nachfragen nach Wasserstoff und E-Fuels des Gebäudesektors in 2030 und 2045

6.5 Das Angebot von Wasserstoff und E-Fuels

Die in den vorherigen Unterkapiteln diskutierten Nachfragen nach Wasserstoff und E-Fuels werden in allen Szenarien über Elektrolysewasserstoff oder daraus hergestellte E-Fuels versorgt. Elektrolyse ist folglich eine zentrale Schlüsseltechnologie. Die Unsicherheiten beim Aufbau einer Wasserstoffversorgung sind jedoch erheblich. Dies gilt in gewissem Umfang für technische Parameter, wie die in der Praxis erreichbare Umwandlungseffizienz und die Flexibilität der Anlagen. Es betrifft aber insbesondere auch die zukünftigen Kosten und Wettbewerbsfähigkeit sowie die Geschwindigkeit des Hochlaufs von Elektrolysekapazität, E-Fuel-Importen und notwendiger Infrastruktur. Darüber hinaus hängt die Frage, welcher Anteil in Deutschland produziert werden kann und welcher importiert wird, von einer ganzen Reihe von Faktoren ab, insbesondere von den Kosten und realisierbaren Potenzialen des EE-Ausbaus in und außerhalb Deutschlands sowie von den Transportformen und -routen und dabei auftretenden Kosten. Vor dem Hintergrund dieser Unsicherheiten wurden im vorliegenden Bericht die Angebotspfade und -mengen als einer der Kernparameter der Szenarien variiert.

Alle Szenarien, wie auch die hier diskutierten Strategien insgesamt, beruhen auf erneuerbarem Strom, der auf unterschiedlichen Pfaden via direkter und indirekter Elektrifizierung aus dem Inland und Ausland zu den Nachfragesektoren gebracht wird. In Abbildung 6.8 ist der langfristige Strombedarf für alle Szenarien für die beiden Gesamtsystemmodelle dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die *Wasserstoff*- und *E-Fuels*-Szenarien deutlich mehr erneuerbaren Strom bedürfen als die Szenarien mit einem Schwerpunkt bei der direkten Elektrifizierung. Durch den Import von Wasserstoff und E-Fuels können gleichzeitig die einheimischen EE-Potenziale geschont werden (der einheimische Strombedarf ist jeweils umrahmt). Gleichzeitig bleibt selbst im E-Fuel-Szenario der Importanteil mit ca. 60 % unter dem heutigen Niveau. Die Höhe der Energieimporte und das Risiko von Importabhängigkeiten nimmt somit grundsätzlich ab.

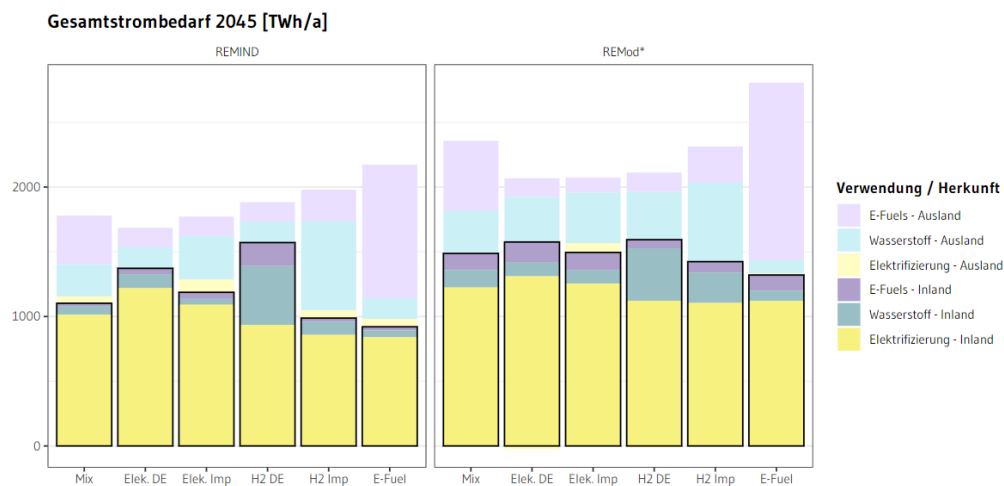


Abbildung 6.8: Strombedarf zur Deckung der Nachfrage für Wasserstoff, E-Fuels und direkte Elektrifizierung in 2045.

Das Gesamtbild aus Angebot und Nachfrage für Wasserstoff und E-Fuels ist für die drei importfokussierten Szenarien für die beiden Gesamtsystemmodelle in Abbildung 6.9 bzw. Abbildung 6.10 dargestellt. Die Bereitstellung ist *positiv* und die Einsatzzwecke sind *negativ* dargestellt.



Abbildung 6.9: Entwicklung des Einsatzes von Wasserstoff in den Szenarien mit höheren Energieimportanteilen.

Die heimische Wasserstoffproduktion beginnt in allen Szenarien bereits um 2025. Um den frühen Bedarf von Wasserstoffnachfragen zu decken, wird Elektrolysewasserstoff mit kleinen Mengen Wasserstoff aus den begrenzten Potenzialen heimischer Biomasse ergänzt. Die verschiedenen Szenarien zeigen große Bandbreiten beim Ausbau der Elektrolysekapazität in Deutschland (siehe Abbildung 6.11). In 2030 sind das 6 - 14 GW, sodass die 5-GW-Zielmarke der nationalen Wasserstoffstrategie in den meisten Szenarien deutlich übertroffen werden muss. In 2045 ist die Bandbreite 12 - 39 GW, im *Wasserstoff-(Import)*-Szenario des REMod-Modells sind es sogar 50 GW. Der Import von Wasserstoff beginnt je nach Modell in oder kurz nach 2030. Das Angebot an E-Fuels wird in allen Szenarien erst etwas später als das Angebot von Wasserstoff hochgefahren und ist schon früh von Importen dominiert. Die Importmengen steigen so schnell an, dass in fast allen Szenarien bereits ab 2035 die Summe aus Wasserstoff- und E-Fuel-Importen über der heimischen Produktion dieser Energieträger liegt.

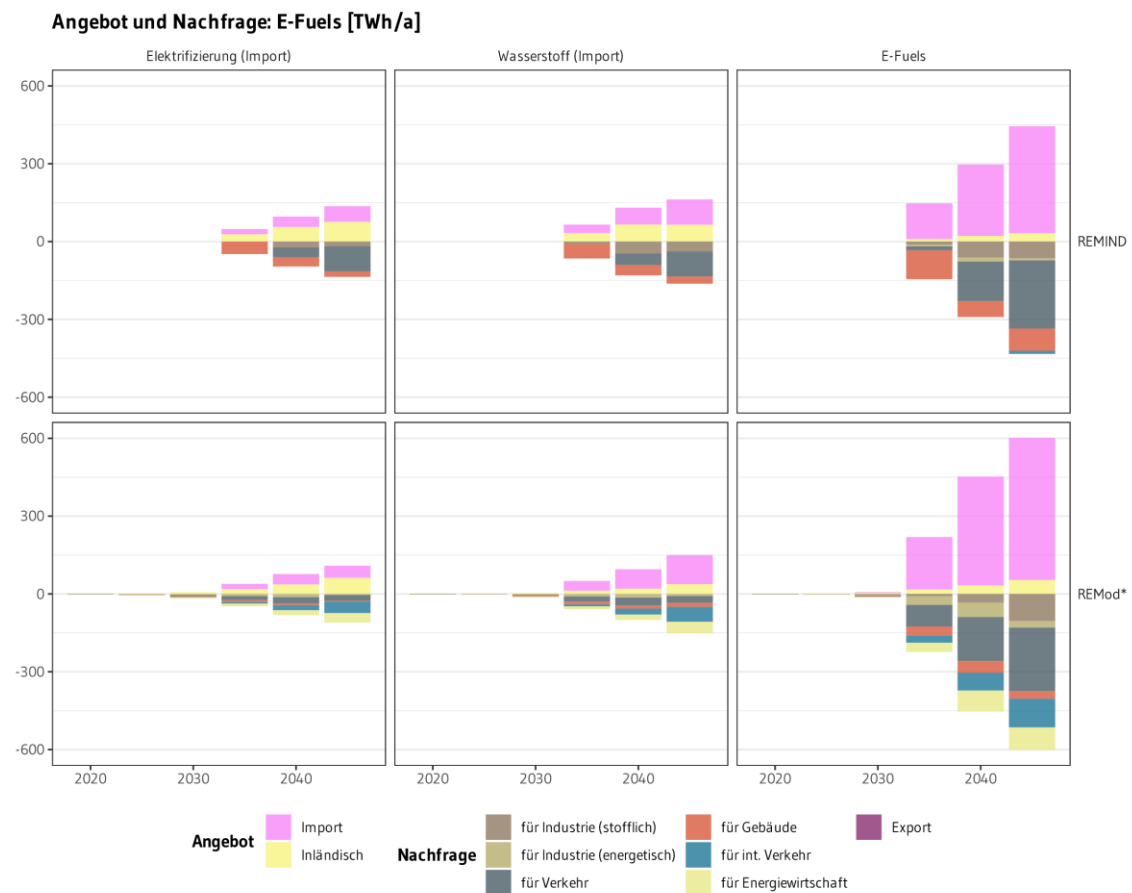


Abbildung 6.10: Entwicklung des Einsatzes von E-Fuels in den Szenarien mit höheren Energieimportanteilen.

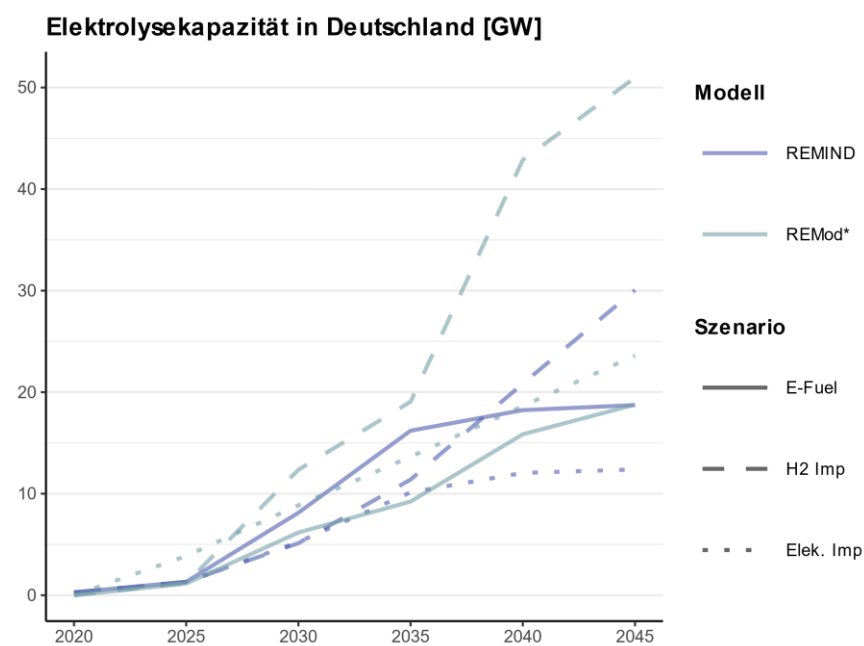


Abbildung 6.11: Elektrolyseausbau in Deutschland 2020 bis 2045.

Abbildung 6.12 zeigt die Investitionsbedarfe für Elektrolyse und Anlagen zur CO₂-Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture, DAC), um die entsprechenden Mengen Wasserstoff und E-Fuels zu produzieren. In allen Szenarien muss bereits bis 2030 massiv im Inland und Ausland in diese Schlüsseltechnologien investiert werden. Jährliche Investitionen nur für die Elektrolyse- und DAC-Kapazität betragen dann bereits 5-15 Mrd. Euro. Besonders hoch ist der Investitionsbedarf im *E-Fuels*-Szenario, wobei etwa die Hälfte auf die CO₂-Abscheidung aus der Luft entfällt. Für die Klimaneutralität in 2045 sind kumulierte Investitionen in diese Kapazitäten von etwa 130 Mrd. Euro im *Elektrifizierungs*-Szenario und 300-400 Mrd. Euro im *E-Fuels*-Szenario notwendig. Zusätzliche Kosten für Transport- und Verteilungsinfrastruktur sowie, im Fall von Wasserstoff, für notwendige nachfrageseitige Transformationen sind hier nicht berücksichtigt; wichtige Parameter der Kostenberechnung sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

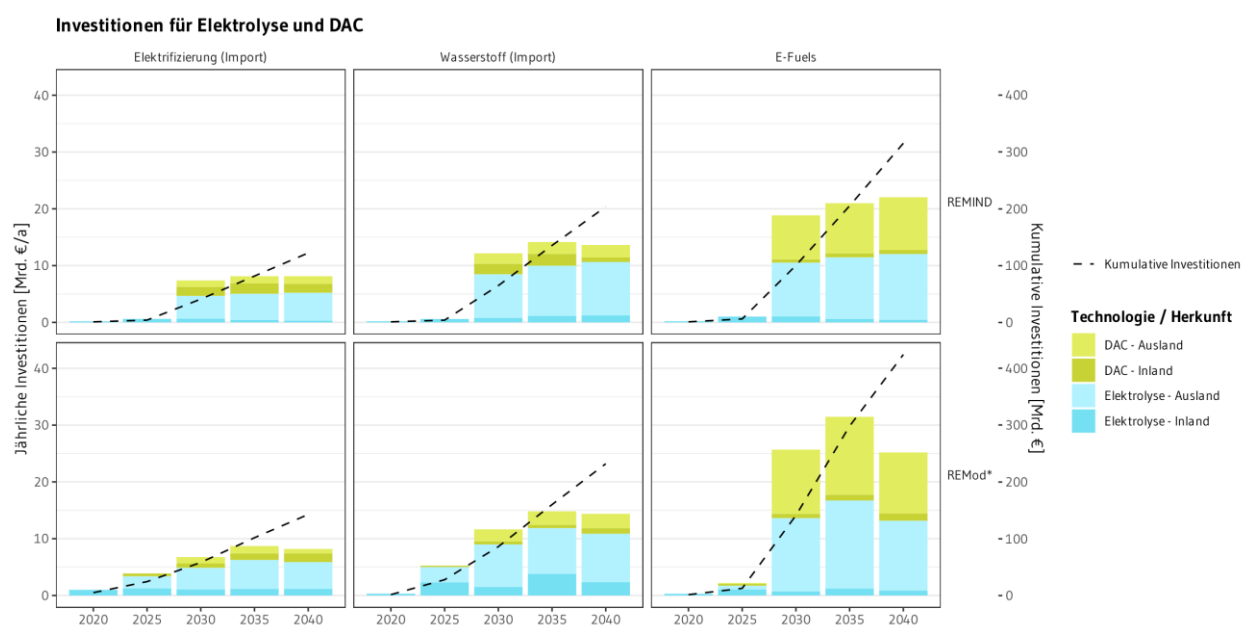


Abbildung 6.12: Investitionen in Elektrolyse und Luftabscheidung.

	2020	2030	2050
Elektrolyse, spezifische Investitionskosten (EUR/kW _{el})	1100	625	335
CO ₂ -Abscheidung aus der Luft, spezifische Investitionskosten EUR/(tCO ₂ /Jahr)	1850	1200	750
Jährliche Abschreibungsrate	7 %	7 %	7 %
Elektrolyse Volllaststunden/Jahr	5000	5000	5000
Elektrolyse Effizienz	70 %	70 %	70 %
Gesamteffizienz E-Fuel-Produktion	50 %	50 %	50 %

Tabelle 6.1: Parameter für die Berechnung der Kostenberechnung für Elektrolyse und DAC.

6.6 Anforderungen an Infrastrukturen für Wasserstoff

Der substanzielle Hochlauf von Wasserstoff und E-Fuels in den Ariadne-Szenarien erfordert auch neue Transport- und Speicherinfrastrukturen. Diese werden in einer späteren Projektphase detailliert und räumlich aufgelöst modelliert. Aus den vorliegenden Ergebnissen lassen sich aber bereits erste robuste Anforderungen an die zukünftigen Infrastrukturen ableiten.

Der Wasserstoffeinsatz steigt in allen Szenarien schnell an. Spätestens wenn die Nachfragen den zweistelligen TWh-Bereich erreichen, ist eine Versorgung allein mit Elektrolyseuren vor Ort nicht mehr sinnvoll. In Zeiten, in denen die Elektrolyse nicht läuft und grüner Wasserstoff nicht verfügbar ist, muss dann eine anderweitige Versorgung erfolgen, meistens mit Erdgas oder der lokalen Erzeugung von grauem Wasserstoff, also Wasserstoff auf fossilen Quellen ohne den Einsatz von CCS. Überirdische Speicher, wie zylindrische Wasserstofftanks sind zu teuer, um längere Pausen in der Produktion von grünem Wasserstoff zu überbrücken. Als Langzeitspeicher eignet sich nur die unterirdische Speicherung, wofür nach derzeitigem Erkenntnisstand Salzkavernen am besten geeignet sind. Existierende und potenziell umrüstbare Kavernenspeicher sowie das geologische Potenzial für neue Kavernen befinden sich vor allem im Norden Deutschlands. Erst durch Transportnetzinfrastrukturen kann es gelingen, diese als saisonale Wasserstoffspeicher für das gesamte System nutzbar zu machen. Dies eröffnet zwei wichtige Optionen: Zum einen kann dadurch der grüne Wasserstoffanteil in Wasserstoffanwendungen erhöht werden, da in Zeiten, in denen keine Produktion vor Ort erfolgt, grüner Wasserstoff aus dem Netz bezogen werden kann. Zum anderen kann erst durch ein Wasserstoffnetz Versorgungssicherheit gewährleistet werden. Erst dann können auch Verbraucher angeschlossen werden, die nicht über alternative – meist fossile – Wasserstoffquellen verfügen. Die meisten „No-regret“-Anwendungen verfügen im Hochlauf über derartige Alternativen.

Erste Vorschläge für ein Wasserstoffstartnetz wurden von den Fernleitungsnetzbetreibern vorgelegt. Die Pläne haben den Vorteil, dass sie zum großen Teil auf der Umwidmung existierender Erdgaspipelines basieren. Dies reduziert die Kosten deutlich, auch wenn bestimmte Infrastrukturen, wie z. B. Kompressoren zur Druckhaltung, ausgetauscht werden müssen.

Derzeit ist noch offen, aus welchen Ländern Deutschland die geplanten und – wie die Szenarien belegen – auch erforderlichen Importe mittelfristig konkret realisieren kann. Da die Planung der Importinfrastrukturen Zeit erfordern wird und eventuell weniger auf der Umrüstung bestehender Leitung basieren kann, muss diese Frage zeitnah angegangen werden.

Deutlich komplexer ist die Frage, ob und wo eine Umstellung der Verteilnetze auf Wasserstoff erfolgen kann und sollte. Der Umstellungsprozess kann dabei nicht sukzessive erfolgen, da Endgeräte nur bestimmte Bandbreiten an Gasgemischen verwenden können. Der DVGW geht davon aus, dass bei 80 % der Heizungen in Deutschland eine Wasserstoffbeimischung von 20 Vol.-% möglich ist (Lenz und Gatzert, 2021). Jenseits der Beimischung muss entweder eine Umstellung dezidierter Netzabschnitte des Bestandnetzes erfolgen oder das Wasserstoffnetz muss komplett neu errichtet werden, was im Allgemeinen als zu teuer erachtet wird. Während man bei den Netzen selbst davon ausgeht, dass eine Umrüstung hin zu Wasserstoff technisch mit vertretbarem Aufwand realisierbar ist, ist die Umstellung selbst ein komplexer Prozess, der einer umfassenden Erhebungs- und Planungsphase bedarf. Alle derzeit mit Erdgas betriebenen Geräte müssen dabei ausgetauscht werden. Zum Zeitpunkt der Umstellung wird das Gebiet vom Erdgasnetz getrennt und es beginnt der Austausch oder die Umrüstung aller Endgeräte. Je nach installierten Anlagen kann dies eine Versorgungsunterbrechung von einigen Tagen bis zu zwei Wochen erfordern bis alle Endgeräte mit reinem Wasserstoff betrieben werden können. Nach der Umstellung muss dann die Versorgung mit Wasserstoff sichergestellt werden. Zusätzlich ist zu beachten, dass es für diese Umstellung noch keine Regulierung oder Zertifizierung gibt und der Bedarf an geschultem und zertifiziertem Personal hoch ist. Aktuell sind bei den Heizungsherstellern Anlagen in der Entwicklung, die „H₂-ready“ sind, sodass der Gerätetausch schon vor der eigentlichen Umstellung durchgeführt werden kann.

Deutlich einfacher ist die Integration von E-Fuels. Diese sind chemisch mit ihren fossilen Konkurrenzprodukten nahezu identisch. So kann synthetisches E-Methan ins bestehende Erdgasnetz eingespeist und flüssige E-Fuels über die bestehenden Routen im Verkehr eingesetzt werden. Diese Vorteile sind gegen die hohen Kosten und die geringe Effizienz abzuwägen. Darüber hinaus erfordert die Produktion aber Kohlenstoff in Form von CO₂. Dadurch könnte, je nach Einsatzgebiet, eine CO₂-Transportinfrastruktur zweckmäßig sein. Schließlich erscheint es zumindest energetisch wenig sinnvoll, CO₂-Konzentrationen im ppm-Bereich aufwendig aus der Luft abzuscheiden, solange noch Industrieabgase mit hohen CO₂-Konzentrationen als Quelle zur Verfügung stehen. Gleichzeitig sinkt bei der Verwendung von Kohlenstoff aus fossilen Quellen der Klimaschutzeffekt deutlich und die Technologiepfade sind nicht kompatibel mit Klimaneutralität.

Schließlich ist die Frage des geeignetsten Energieträgermixes für die Energiewende auch eine Frage der Infrastrukturen. In allen Szenarien stammt ein Großteil der Energie aus erneuerbarem Strom, der aber zum Teil erst zu Wasserstoff oder E-Fuels umgewandelt auf anderen Infrastruk-

turpfaden zum Einsatzort gelangt. In der nächsten Projektphase werden die Wasserstoff-Infrastrukturen daher im Detail modelliert und analysiert, um ein noch genaueres Bild der erforderlichen Transformation aufzuzeigen.

6.7 Prioritäten bis 2030

Bis zum Jahr 2030 gibt es große Gemeinsamkeiten zwischen allen Szenarien auch über die unterschiedlichen Modelle hinweg. Viele der Entwicklungen können daher als „No-regret“-Optionen angesehen werden, die zügig und mit Nachdruck angegangen werden sollten.

Das wichtigste Element dabei ist der **Einsatz erster Wasserstoffmengen in der Industrie**. Am geeignetsten sind hier die Subsektoren **Stahl, Ammoniak, chemische Industrie und Raffinerien** sowie die Produktion von E-Fuels für den Flug- und Schiffsverkehr. Diese Anwendungen sind in der Lage, schon bis 2030 große Mengen Wasserstoff einzusetzen. Werden diese Anwendungen schnell umgestellt, ergibt sich eher ein Angebotsengpass als eine zu geringe Nachfrage. Dabei hilft ein weiterer Vorteil dieser Bereiche: In ihnen kann ein Grünwasserstoffangebot flexibel genutzt werden, da mögliche Engpässe bei der Produktion von grünem Wasserstoff durch alternative, fossile Quellen überbrückt werden können, die heute schon vorhanden sind. Daher sind diese Anwendungen auch nicht zwangsweise sofort auf ein Wasserstoffnetz angewiesen, sondern können Elektrolyseure auch vor Ort installieren. Eine Fokussierung auf diese Anwendungen hilft somit dabei, das Henne-Ei-Problem von Angebot, Nachfrage und Infrastrukturen aufzulösen. Eine frühe Festlegung auf einen breiten sektorübergreifenden Einsatz und dessen Forcierung, erscheint keine robuste Klimaschutzstrategie zu sein. Die Ungewissheit über zukünftige Angebotsmengen und -preise von Wasserstoff und E-Fuels und darüber, in welchen Bereichen sich diese langfristig durchsetzen können, ist derzeit noch zu groß. Stattdessen sollten die verfügbaren Optionen der direkten Elektrifizierung und die Einführung von Wasserstoff-Schlüsseltechnologien im Industriesektor schnell hochskaliert werden. Es ist Aufgabe der Politik, den Akteuren klare und langfristige Planungsgrundlagen zu geben.

Der **Aufbau eines ersten Wasserstoff-Startnetzes** bis 2030 ist eine wichtige Aufgabe. Erst durch dieses Netz können geologische Speicher für alle an das Netz angeschlossenen Anwender nutzbar gemacht werden, was eine klimaneutrale und gleichzeitig robuste Versorgung ermöglicht. Ohne das Netz werden die oben genannten Nachfrager immer wieder auch auf fossilen Wasserstoff vor Ort zurückgreifen müssen. Die **Schaffung von ausreichender Wasserstoffspeicherkapazität** ist dabei eine weitere Kernaufgabe, da ohne diese ein Netzbetrieb nicht

möglich ist. Die erforderliche Speicherkapazität ist dabei groß, da Wasserstoff durch die niedrigere Energiedichte bei gleicher Energiemenge mehr Volumen beansprucht als Erdgas und die Speicher in viel größerem Umfang auch die Saisonalität des EE-Angebots für grünen Wasserstoff ausgleichen müssen.

Der **Aufbau von Elektrolyseurkapazität** ist eine weitere „No-regret“-Maßnahme. Die in der Nationalen Wasserstoffstrategie anvisierte Leistung von 5 GW ist dabei für die meisten der diskutierten Szenarien nicht ausreichend. Eine Erhöhung des Ausbauziels kann zudem zweckmäßig sein, da in allen Szenarien der Bedarf an Leistung auch nach 2030 ohnehin weiter ansteigt.

In allen Szenarien spielt der Import von Wasserstoff und E-Fuels langfristig eine große, meist sogar die überwiegende Rolle. Daher muss so früh wie möglich eine **robuste Importstrategie** entwickelt werden, die den Import von grünem Wasserstoff nachhaltig sichert.¹⁹ Die Wahl der Handelspartner, Produktform und Transportmodi müssen mit den Einsatzbereichen und der Ausgestaltung der Infrastrukturen in Deutschland frühzeitig koordiniert werden.

Obwohl Wasserstoffkraftwerke für die Stromversorgung in den Szenarien bis 2030 nicht oder nur in geringem Umfang erforderlich sind, muss aufgrund der langen Vorlaufphase und der Auslegung des Wasserstoffnetzes zeitnah mit der **Planung der Wasserstoffkraftwerke** begonnen werden. Diese sind langfristig zur Deckung der Stromnachfrage in Zeiten mit geringem EE-Angebot erforderlich.

6.8 Fazit

In allen Szenarien spielen Wasserstoff und E-Fuels eine wichtige Rolle, deren relative Bedeutung und Ausgestaltung zwischen den Szenarien aber teilweise deutlich variiert. Bis 2030 ist der Einsatz von Wasserstoff und dessen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele noch recht begrenzt. Wasserstoff und E-Fuels werden dabei zunächst meist in einigen „No-regret“-Anwendungen eingesetzt. Im Zentrum stehen hierbei Wasserstoff für Stahl und Ammoniak, sowie E-Fuels für die Petro-Chemie, Flug- und Schiffsverkehr. Diese Optionen sind technisch gut geeignet, Keimzellen eines Wasserstoffnetzes zu werden, da sie grünen Wasserstoff verhältnismäßig flexibel einsetzen können und die Nachfragen an wenigen Punkten im System gebündelt vorliegen.

¹⁹ In Ariadne werden derzeit Instrumente und Strategien entwickelt, wie eine Absicherung der Importe gelingen kann.

Entsprechend sollte der Wasserstoffeinsatz in diesen Bereichen schnell und nachdrücklich angegangen werden.

Langfristig sind die plausiblen Bandbreiten in 2045 zwischen den Szenarien mit 250 und 700 TWh recht groß. Die Bandbreite spiegelt damit gut den Stand der derzeitigen Diskussion um die Rolle dieser Energieträger in der Strategie zur Erreichung der Energiewende wider.

Der Hochlauf der Wasserstoffnachfrage erfordert zum einen den Aufbau substanzieller Elektrolysekapazität in Deutschland. Die in der Nationalen Wasserstoffstrategie vorgesehenen 5 GW in 2030 muss in fast allen Szenarien deutlich übertroffen werden. Langfristig steigt der Leistungsbedarf auf 12 bis 50 GW in 2045. Zum anderen werden aber auch in allen Szenarien deutliche Importe von Wasserstoff und insbesondere E-Fuels spätestens nach 2030 benötigt und müssen daher zeitnah in die Wege geleitet werden. Der Importbedarf von Wasserstoff und E-Fuels liegt in 2045 je nach Szenario zwischen 250 und 600 TWh.

Die Rolle von Wasserstoff und E-Fuels im Wärmemarkt ist in jedem Szenario vergleichsweise klein. Hier sind Wärmepumpen bei Neubauten, in der Fernwärme und für einen großen Teil des Gebäudebestandes aus einer systemischen Perspektive die günstigere Option. Die Gasnachfrage für Gebäudewärme sinkt gegenüber heute in jedem Szenario um mindestens 70 %. Wasserstoff oder E-Methan werden gezielt dort genutzt, wo die Anwendung von Wärmepumpen aufgrund von Sanierungsbedarf unrentabel oder nicht möglich ist und die Besiedlungsdichte zu gering für Wärmenetze ist.

Im Verkehrssektor ist im Schwerlastverkehr das Rennen zwischen Strom und Wasserstoff noch offen. Im Pkw-Bereich zeichnet sich ab, dass batterieelektrische Fahrzeuge den Markt dominieren werden. Im Lkw-Bereich sind die Unterschiede bei den Gesamtkosten der unterschiedlichen Antriebsvarianten geringer. Mit einer weiteren Verbesserung der Energiedichten von Batterien und dem Ausbau von Schnelllademöglichkeiten könnte auch dieses Segment weitgehend elektrifiziert werden.

Selbst in den Szenarien mit geringem Einsatz von Wasserstoff ist eine Wasserstoffinfrastruktur mit ausreichenden Speichermöglichkeiten für eine effiziente und sichere Versorgung erforderlich. Zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage müssen dabei substanzielle Speichermöglichkeiten geschaffen werden, wofür geologische Speicher, insbesondere Salzkavernen, aus heutiger Sicht unumgänglich sind.

Literaturangaben

- BMU, 2021b. Novelle des Klimaschutzgesetzes vom Bundestag beschlossen. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/novelle-des-klimaschutzgesetzes-vom-bundestag-beschlossen>.
- BMWi, 2020a. Die Nationale Wasserstoffstrategie. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>.
- dena, 2018. dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf.
- Gerhardt N, Bard J, Schmitz R, Beil M, Pfennig M, Kneiske T, 2020. Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme. Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Studien-Reports/FraunhoferIEE_Kurzstudie_H2_Gebaeudewaerme_Final_20200529.pdf.
- Lenz A-K, Gatzen C, 2021. Wasserstoff zur Dekarbonisierung des Wärmesektors. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/frontiereconomics-h2-im-waermemarkt-studie.pdf>.
- Ueckerdt F, Bauer C, Dirnaichner A, Everall J, Sacchi R, Luderer G, 2021. Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. Nat Clim Chang, 11(5):384–393 DOI: 10.1038/s41558-021-01032-7.



Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:



@AriadneProjekt



ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf kopernikus-projekte.de

Wer ist Ariadne? Durch den Faden der Ariadne gelang Theseus in der griechischen Mythologie die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne. Im Konsortium von mehr als 25 Forschungseinrichtungen führt Ariadne durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, erforscht Optionen zur Gestaltung der Energiewende und erarbeitet wichtiges Orientierungswissen für politische Entscheider. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg (BTU) | Deutsche Energie-Agentur (dena) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Guidehouse Germany | Helmholtz-Zentrum Hereon | Hertie School | Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) | ifok | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität | Institute For Advanced Sustainability Studies (IASS) | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung 2° – Deutsche Unternehmer für Klimaschutz | Stiftung Umweltenergierecht | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Münster | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung