



Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien

Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats

Ort: Karlsruhe, Freiburg, Cottbus

Datum: 04.06.2021

Impressum

Metastudie Wasserstoff

Projektleitung / Kontakt

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe

Prof. Dr. Martin Wietschel, martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Autorinnen und Autor:innen

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Martin Wietschel, Lin Zheng, Marlene Arens

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Christopher Hebling, Ombeni Ranzmeyer, Achim Schaadt, Christoph Hank, André Sternberg, Sebastian Herkel, Christoph Kost

Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastruktur und Geothermie IEG

Mario Ragwitz, Ulrike Herrmann, Benjamin Pfluger

Verfasst im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats

Zitierempfehlung

Wietschel, M.; Zheng, L.; Arens, M.; Hebling, C.; Ranzmeyer, O.; Schaadt, A.; Hank, C.; Sternberg, A.; Herkel, S.; Kost, C.; Ragwitz, M.; Herrmann, U.; Pfluger, B. (2021): Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG (Hrsg.).

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autor:innen gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr.

Diese Studie wurde im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrates erstellt, die Ergebnisse und Schlussfolgerungen spiegeln die Auffassungen der aufgeführten Autor:innen wider.

Kurzzusammenfassung

Das Ziel der Studie ist die Erstellung einer vergleichenden Metastudie zur zukünftigen potentiellen Nachfrage nach Wasserstoff und Syntheseprodukten auf Basis von Wasserstoff bis 2050. Diese erfolgt durch die Auswertung von aktuellen Systemstudien im geographischen Raum der Europäischen Union mit Fokus auf Deutschland. Die ausgewählten Studien haben eine stark techno-ökonomische Energiesystemperspektive. Nicht alle Aspekte eines Transformationspfades, wie z. B. heimische Arbeitsplätze oder der Einfluss von aktuellen Politikmaßnahmen, sind dort enthalten. Weiterhin arbeiten die Studien mit Szenarien. Szenarien sind keine Vorhersage der Zukunft. Sie bilden mögliche Entwicklungen und techno-ökonomische Pfade unter verschiedenen Annahmen und Unsicherheiten ab.

Die Studien kommen in ihren Zukunftsszenarien zu stark unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich eines potentiellen Bedarfes an Wasserstoff und Syntheseprodukten. Hierfür existiert eine Reihe an Gründen, wie z. B. das anvisierte Treibhausgasminderungsniveau, die einbezogenen Nachfragesektoren, der Einsatz von Carbon Capture and Storage (CCS) oder das Potential nachhaltig nutzbarer Biomasse und die berücksichtigten Technologieoptionen. Weiterhin werden teilweise extreme sozioökonomische und technologiespezifische Annahmen gesetzt mit Fokus auf „Was passiert, wenn“-Fragen.

In der Mehrzahl der europäischen Studien wird ein Bedarf an Wasserstoff und Syntheseprodukten in größerem Umfang erst bei Treibhausgasminderungszielen von mehr als 80 % gesehen. Dieser steigt dann aber mit zunehmenden Minderungszielen stark an. Wasserstoffbasierte Energieträger sind somit wichtige Bausteine einer ambitionierten Klimapolitik.

Für Deutschland wurden nur Minderungsszenarien mit einem Ambitionsniveau von mindestens 95 % bis 2050 untersucht. Ab 2030 werden in diesen Studien relevante Nachfragemengen für Deutschland gesehen. Die Bandbreite liegt dabei zwischen sehr geringer Nachfrage bis knapp 80 TWh (ohne extreme Ausreißer nach oben zu berücksichtigen). In vielen Studien ist der Bedarf in 2030 jedoch kleiner als 50 TWh. Im Jahr 2050 liegt die Bandbreite des Bedarfs an Wasserstoff- und Syntheseprodukten in den Studien bei 400 bis knapp 800 TWh (ohne extreme Ausreißer nach unten und oben zu berücksichtigen). In allen Szenarien liegen die Bedarfe an Wasserstoff und Syntheseprodukten deutlich unter den heutigen Bedarfen an fossilen Brenn- und Kraftstoffen. Hieraus lässt sich ableiten, dass Wasserstoff und Syntheseprodukte notwendig für die Energiewende sind, aber gleichzeitig wertvolle Energieträger. Energieeffizienz wird deshalb zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Szenarien, die der Kohlendioxid-Abscheidung und Speicherung (CCS) eine größere Rolle zubilligen, kommen zu deutlich geringeren Bedarfen nach Wasserstoff und synthetischen Brennstoffen. Die mögliche Rolle von CCS als Game Changer sollte deshalb aufmerksam beobachtet und weiter analysiert werden. Höhere Mengen an Biomasse reduzieren ebenfalls den Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf. Aus diesem Grund sind die zur Verfügung stehenden nachhaltigen Biomassepotentiale für Deutschland und deren sektorale Verteilung zu klären.

Bei der Herkunft von Wasserstoff lässt sich festhalten, dass der Bedarf in 2040 und 2050 überwiegend aus ausländischen Quellen gedeckt wird. In den aktuelleren Studien ist dies teilweise auch schon in 2030 der Fall. Der Importanteil der Syntheseprodukte liegt in allen Studien höher als der Importanteil für reinen Wasserstoff.

Der Verkehr weist in vielen Studien langfristig einen sehr hohen Bedarf auf (2050: 150 bis 300 TWh, ohne extrem Ausreißer nach oben zu berücksichtigen). In 2030 allerdings ist die Nachfrage im

Verkehr noch recht gering ist. Ein unbestritten hoher Bedarf wird in allen Studien im internationalen Flug- und Schiffsverkehr gesehen (Syntheseprodukte zusammen mit biogenen Kraftstoffen in 2050: 140 bis 200 TWh). Die Rolle im straßengebundenen Verkehr wird in den Studien deutlich unterschiedlich bewertet, wobei Wasserstoff im Schwerlastverkehr in einigen neueren Studien eine bedeutende Rolle zugemessen wird.

Der potentielle Bedarf an Wasserstoff und Syntheseprodukten in der Industrie wird ebenfalls als hoch eingeschätzt. In 2050 liegt der Bedarf an Wasserstoff, Syntheseprodukten und biogenen Brennstoffen bei bis zu 500 TWh. In vielen Studien wird hier bereits 2030 ein vergleichsweise relevanter Wasserstoffbedarf gesehen (bis zu knapp 50 TWh). Die Einsatzbereiche, die in nahezu allen Studien von Bedeutung sind, sind die Wasserstoff-Direktreduktion von Eisenerz zur Herstellung von Stahl, die stoffliche Nutzung bei der Ammoniaksynthese und der Ethylenherstellung. Die energetische Nutzung in der Industrie wird in den Studien deutlich unterschiedlich und teilweise als weniger relevant bewertet. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass einige Studien einen recht hohen Stromeinsatz ausweisen.

Die Gebäudewärme weist in manchen Studien einen relevanten potenziellen Bedarf von bis zu 200 TWh für die Summe aus Wasserstoff, Syntheseprodukten und biogenen Brennstoffen bis 2050 auf. Hier bewerten Studien und Szenarien überwiegend eine Kombination von Energieeinsparmaßnahmen und Wärmepumpen oder Wärmenetzen als vielversprechender. Ein möglicher Bedarf wird eher auf der längerfristigen Zeitschiene gesehen, nach 2030, in manchen Studien auch erst nach 2040. Einige Fragen scheinen hier noch offen zu sein.

Im Umwandlungssektor (Strom- und Wärmeerzeugung, Raffinerien) wird ebenfalls eher nach 2030 eine Nachfrage nach grünem Wasserstoff gesehen, die 2050 zwischen 50 und 150 TWh liegen könnte. Bei der Stromerzeugung spielt dabei das Thema der Rückverstromung eine wichtige Rolle. Weiterhin lässt sich festhalten, dass in Szenarien mit hoher Direktelektrifizierung i.d.R. mehr Wasserstoff im Stromsektor in den Studien ausgewiesen wird. Bei einer stärkeren Direktelektrifizierung werden im höheren Maße Flexibilitätsmaßnahmen im Umwandlungssektor benötigt. Die künftige Rolle der Raffinerien wird in den meisten Studien nicht genauer beschrieben. Dies könnte daran liegen, dass deren modellhafte Abbildung und Bewertung herausfordernd sind, dies gilt teilweise auch für Chemiesektoren. Hier herrscht noch größerer Klärungsbedarf.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	3
1 Einleitung	7
2 Beschreibung und Diskussion der Studien	9
2.1 Kriterien zur Studienauswahl und Überblick über die ausgewählten Studien	9
2.2 Methodische Unterschiede in den Studien und wesentliche Determinanten der Nachfrage.....	11
2.3 Defizite der Studien.....	14
3 Studienergebnisse hinsichtlich potentieller Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage	17
3.1 Vorbemerkung	17
3.2 Auswertung der EU-Studien	17
3.3 Auswertung der nationalen Studien und Szenarien.....	19
3.3.1 Gesamter Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf	19
3.3.2 Sektoraler Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf im Industriesektor.....	24
3.3.3 Sektoraler Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf im Gebäudesektor, Gewerbe-Handel-Dienstleistungssektor (GHD) und Haushaltesektor (HH).....	26
3.3.4 Sektoraler Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf im Verkehr	28
3.3.5 Sektoraler Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf im Umwandlungssektor	32
3.4 Importquoten und nationale Elektrolysekapazitäten	33
4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	36
A.1 Anhang	42
A.1.1 Studien-Übersicht	42
A.1.2 EU-Studien – Studienprofile	44
A.1.3 Nationale Studien – Studienprofile	47
A.1.4 Nationale Studien – Ausprägung von Determinanten	56
A.2 Studienergebnisse – Auswertung der EU-Systemstudien	60
A.2.1 Gesamte Energienachfrage EU.....	61
A.2.2 Nachfrage in der Industrie EU für 2030 (oben) und 2050 (unten)	62
A.2.3 Nachfrage im Gebäudesektor EU im Jahr 2030 (oben) und 2050 (unten)	64
A.2.4 Nachfrage im Verkehrssektor EU im Jahr 2030 (oben) und 2050 (unten).....	66
A.3 Studienergebnisse – Auswertung der EU-Industriestudie	68
A.4 Studienergebnisse – Auswertung der Nationalen Studien	69

A.4.1	Gesamte nationale Energienachfrage	69
A.4.2	Nationale Energienachfrage im Industriesektor	71
A.5	Übersicht relevanter Einsatzgebiete von Wasserstoff und Syntheseprodukten sowie Konkurrenzsituation	82
	Abbildungsverzeichnis	83
	Tabellenverzeichnis	85
	Literaturverzeichnis	86

1 Einleitung

Inzwischen können weltweit über 30 nationale Wasserstoff-Roadmaps mit unterschiedlichen Antriebern und Motivationen und die Ankündigung von öffentlichen Mitteln von über 70 Mrd. \$ und privaten Mitteln von mehreren 100 Mrd. \$ für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft summiert werden (Hydrogen Council, 2021). Durch diese hohen Investitionen in Wasserstofftechnologie mit Wasserstofferzeugung und dessen Derivaten (vornehmlich im Nahen Osten und Australien) und in den Ausbau erneuerbarer Energien im Allgemeinen wird erwartet, dass bereits in den 20er Jahren Skaleneffekte erreicht werden, die fossile Lösungen in einigen Sektoren bzw. Regionen aus dem Markt drängen können, wenn die Rahmenbedingungen entsprechend gesetzt werden. Bedingt wird dieser Wandel durch enorm niedrige Stromgestehungskosten zwischen 1 USD-ct/kWh (Photovoltaik) und 2 USD-ct/kWh (Wind) in Ländern mit sehr günstigen klimatischen Voraussetzungen (Matthes C. et al., 2020). An geeigneten Standorten, mit einer hinreichenden Anzahl an Volllaststunden, sind bis 2030 Wasserstoffgestehungskosten von rund 1,50 bis 2,3 USD/kg¹ realistisch möglich (Hydrogen Council, 2021; Matthes C. et al., 2020). Branchenstudien sehen Wasserstofftechnologien als eine der wichtigsten Post-COVID Technologien zur Wiederbelebung der Weltwirtschaft (Hydrogen Council, 2021). Durch die Vorgaben des Pariser Übereinkommens COP21 und daraus abgeleiteten nationalen Treibhausgasminderungszielen ist der Defossilisierungsdruck in der Industrie (insbesondere Stahlerzeugung, Grundstoffchemie und Raffinerien) sowie im Verkehr (Luftfahrt, Schifffahrt, Schwerlast- und Individualverkehr) gleichermaßen hoch. Einige Stakeholder erwarten deshalb eine starke Zunahme von Wasserstoff und (darauf basierenden) Syntheseprodukten. Genauere Einschätzungen zu den voraussichtlichen zeitnahen (2030), mittelfristigen (2040) und langfristigen (2050) Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarfen in Deutschland werden in einer Vielzahl an Studien vorgenommen. Sie liegen jedoch weit auseinander hinsichtlich Höhe und künftiger Anwendungsbereiche.

Ein Fraunhofer-Konsortium bestehend aus dem Institut für System- und Innovationsforschung ISI, dem Institut für Solare Energiesysteme ISE, und der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastruktur und Geothermie IEG hat, von der Leitstelle NOW koordiniert, die „Metastudie Wasserstoff“ erstellt. Das Ziel dieser „Metastudie Wasserstoff“ ist die Erstellung einer vergleichenden Analyse zur zukünftigen potentiellen Nachfrage von Wasserstoff und auf Wasserstoff basierenden Syntheseprodukten bis 2050 durch Auswertung von aktuellen Systemstudien im geographischen Raum der Europäischen Union mit Fokus auf Deutschland. Die Zielsetzung kann untergliedert werden in:

- Ermitteln der Nachfragebandbreiten von Wasserstoff und Syntheseprodukten sowie eine Analyse der Importquoten und Elektrolysekapazitäten
- Herausarbeiten und Einordnen der nachfragebedingenden Annahmen bzw. Determinanten
- Identifikation der allgemeinen und spezifischen Defizite in den Studien
- Auswertung und Schlussfolgerung mit Blick auf die Zeithorizonte für die wichtigsten Entscheidungs- bzw. Weichenstellungspunkte und entsprechenden Handlungsnotwendigkeiten

In der „Metastudie Wasserstoff“ werden in einem ersten Schritt in Kapitel 2 die Auswahlkriterien für die Studien dargelegt und dann ein Überblick über die betrachteten acht nationalen und vier europäischen Studien gegeben. Danach wird in diesem Kapitel auf den methodischen Ansatz in den

¹ Angabe beschreibt die Gestehungskosten vor Ort. Hinzu kommen fallspezifische Transportkosten. Etwa 0,5 USD/kg werden für ein realistisches Szenario mit Transport per Pipeline aus Algerien nach Deutschland angenommen. Quelle: Hydrogen Council (2021)

einzelnen Studien kurz eingegangen sowie die ergebnisbestimmenden Determinanten der Nachfragehöhe nach Wasserstoff und Syntheseprodukten herausgearbeitet. Die Defizite der Studien werden dann am Ende von Kapitel 2 thematisiert. Daran schließt sich das Kapitel 3 mit einer Darstellung der Ergebnisse der Studienauswertung bezüglich der Nachfragebandbreiten von Wasserstoff und Syntheseprodukten sowie der Analyse der Importquoten und Elektrolysekapazitäten an. Abschließend werden in Kapitel 4 die Ergebnisse zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen. Die ergänzenden umfangreichen Detailergebnisse werden im Anhang zur Verfügung gestellt.

2 Beschreibung und Diskussion der Studien

2.1 Kriterien zur Studiena Auswahl und Überblick über die ausgewählten Studien

Die Studien basieren in unterschiedlichem Maße auf Grundannahmen und Setzungen, die die Szenarienergebnisse nicht unerheblich beeinflussen. Derlei Setzungen im methodologischen Design der Studien werden betrachtet und explizit ausgewiesen. Allerdings haben manche Setzungen im Studiendesign durchaus ihre Daseinsberechtigung und eine Plausibilitätsbewertung in diesem Kontext ist nie komplett objektiv und daher diskutabel.

In der Regel kommen sektorspezifische Studien zu deutlich optimistischeren Ergebnissen hinsichtlich Mengen- und Kostenentwicklungen von Wasserstoffsystemen verglichen mit den Systemstudien. Beide Studienarten haben allerdings ihre Vorteile. Der Fokus in dieser Studie liegt auf Systemstudien, nur ergänzend werden sektorspezifische Nachfragestudien einbezogen.

Aus Gründen der Aktualität werden für diese Metastudie nur Studien berücksichtigt, die im Jahr 2018 oder später veröffentlicht wurden. Zudem decken die Studien alle Wirtschaftssektoren ab, also Industrie, Verkehr, Haushalte und Gewerbe-Handel-Dienstleistungen (GHD) und den Wärmesektor. Zusätzlich wird der Energieumwandlungssektor, wie die Stromerzeugung und Raffinerien, mitbetrachtet. Es werden weiterhin nur Studien berücksichtigt, die Angaben zur zukünftigen Wasserstoff- und Syntheseprodukt nachfrage in den einzelnen Sektoren machen und somit eine Priorisierung zwischen den Sektoren ermöglichen. Weiterhin enthalten die Studien nicht nur Angaben zu den zu erwartenden Energienachfragen im Jahr 2050, sondern auch für Zeitpunkte dazwischen, wie z. B. für das Jahr 2030 und 2040. Schließlich werden nur Studien bzw. Szenarien betrachtet, die ambitionierte Treibhausgasemissionsminderungen anstreben.

Tabelle 1: Auswahlkriterien

Art der Studien	Fokus auf Systemstudien, die alle Sektoren umfassen und die Energieangebots- und Nachfrageseite abdecken, aber deren sektoraler Detaillierungsgrad begrenzt ist Einbezug von ergänzenden sektorspezifischen Nachfragestudien, die einen höheren Detaillierungsgrad bieten, aber wiederum keine sektorübergreifende Priorisierung betrachten sowie keine Nachfrageabdeckung über Angebot voraussetzen.
Räumlicher Bilanzraum	Europäische Union und Fokus auf Deutschland
Zeitlicher Bilanzraum	Zeitlicher Bilanzraum: Zwischenschritte 2030 und 2040, bis 2050
Aktualität der Studien	Veröffentlichung ab 2018
Ambitionsniveau Treibhausgas-minderung	>90 %-Treibhausgas-minderungsszenarien für EU-weite Studien, aber Fokus auf >95 %-Treibhausgas-minderungsszenarien für deutsche Studien
Sektorale Gliederung	Insofern möglich wurden die Sektoren Industrie, Gebäude-/GHD&HH, Verkehr und Energie bzw. Umwandlung mit ihren jeweiligen Untersektoren betrachtet

Bei den EU-Studien und nationalen Studien handelt es sich im Einzelnen um folgende Veröffentlichungen in chronologischer Reihenfolge:

EU-Studien

Die Europäische Kommission verfasste im Jahr 2018 die Studie „In-Depth Analysis in Support of the COMMISSION COMMUNICATION COM (2018) 773 – A Clean Planet for all – A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy“ (EC, 2018). Die Studie untersucht mit dem PRIMES-Modell zwei Szenarien, die beide Klimaneutralität im Jahr 2050 erreichen und sich von der Betrachtung der Kreislaufwirtschaft unterscheiden. Für mehr Informationen siehe Abbildung 27.

Die Europäische Kommission beauftragte das Joint Research Center mit der Metastudie „Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050“ (JRC, 2020). Die Metastudie umfasst die Auswertung von 8 Studien mit insgesamt 16 Szenarien, die mit Treibhausgasminderungszielen von über 90 % bis zum Jahr 2050 rechnen. Für mehr Informationen siehe Abbildung 26.

Ebenfalls im Jahr 2020 verfasste die Europäische Kommission die Studie „COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT – IMPACT ASSESSMENT“ (EC, 2020). Vier Szenarien mit Klimaneutralität im Jahr 2050 werden dabei mit dem Modellset PRIMES-GAINS-GLOBIOM untersucht. Die Szenarien unterscheiden sich bzgl. der politischen Maßnahmen und der CO₂-Bepreisung. Für mehr Informationen siehe Abbildung 25.

Nationale Studien

Der Bundesverband der Deutschen Industrie beauftragte die Boston Consulting Group und Prognos mit der Studie „Klimapfade für Deutschland“ (BDI, 2018). Darin werden zwei Szenarien untersucht, die zu einer 80- oder 95 %igen Reduktion von Treibhausgasen führen. Das 80 %-Szenario wurde weitestgehend mit bestehenden Technologien erreicht; das 95 %-Szenario wird darin an der Grenze des technisch Machbaren sowie der gesellschaftlichen Akzeptanz gesehen. Für mehr Informationen siehe Abbildung 29.

Die Deutschen Energieagentur verfasste die sog. „dena-Leitstudie – Integrierte Energiewende“ (dena, 2018). Diese umfassende Studie untersucht vier Szenarien mit einer 80- oder 95 %igen Treibhausgasreduktion bis zum Jahr 2050, die entweder über eine starke Elektrifizierung oder über einen Mix aus verschiedenen Technologien erreicht werden. Dem Import von Syntheseprodukten auf Basis von Wasserstoff kommt eine große Bedeutung zu. Für mehr Informationen siehe Abbildung 30.

Das Umweltbundesamt veröffentlichte im Jahr 2019 die Studie „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“ (UBA, 2019). In dieser Studie wird im Unterschied zu den meisten anderen Studien ein großer Fokus auf die Beiträge von Verhaltensänderung und Materialeffizienz zur Erreichung der Klimaschutzziele gelegt. Für mehr Informationen siehe Abbildung 33.

Ebenfalls im Jahr 2019 publizierte das Forschungszentrum Jülich die Studie „Wege für die Energiewende“ (Jülich, 2019). Treibhausgasminderungen von 80 und 95 % werden darin detailliert untersucht. Im Unterschied zu den meisten anderen Studien betrachtet diese Studie zum einen das europäische Stromnetz und zum anderen einen globalen Markt für Wasserstoff- und Syntheseprodukte. Für mehr Informationen siehe Abbildung 35.

In 2019 verfasste die Ludwig Bölkow Systemtechnik (LBST) im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE-NRW) eine Systemstudie mit zwei Szenariengruppen, eine mit Fokus auf Strom und eine mit Fokus auf Wasserstoff. Für beide Szenariengruppen werden für 2030 eine 55 %ige und für 2050 eine 80 %ige

sowie 95 %ige Treibhausgasreduzierung untersucht. Neben der Betrachtung für ganz Deutschland werden die Szenarien spezifisch für Nordrhein-Westfalen ausgewertet. Für mehr Informationen siehe Abbildung 36.

Ein Konsortium aus Prognos, Öko-Institut und Wuppertalinstitut erarbeitete für die Agora Energiewende die Studie „Klimaneutrales Deutschland“ (Agora, 2020). Darin werden zwei Szenarien untersucht, die beide zur Klimaneutralität im Jahr 2050 führen, aber durch unterschiedliche Zielwerte für das Jahr 2030 gekennzeichnet sind. Für mehr Informationen siehe Abbildung 32.

Ebenfalls im Jahr 2020 veröffentlichte das Fraunhofer ISE die Studie „Wege zu einem Klimaneutralen Energiesystem“ (ISE, 2020). Diese Studie setzt einen Fokus auf gesellschaftliche Verhaltensweisen, die in Szenarien abgebildet werden. Im Szenario „Beharrung“ zum Beispiel werden im privaten Bereich kaum neue Techniken eingesetzt und demgegenüber werden im Szenario „Suffizienz“ die Treibhausgasemissionen durch gesellschaftliche Verhaltensänderungen stark reduziert. Für mehr Informationen siehe Abbildung 34.

Die aktuelle Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (BMW, 2021) wurde im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums von einem Konsortium aus Fraunhofer ISI, Consentec, TU Wien und M-Five erstellt. Das Basisszenario sieht für das Jahr 2050 eine 80-prozentige Reduktion der Treibhausgasemissionen vor. Weitere drei Szenarien untersuchen eine 95-prozentige Reduktion der Treibhausgasemissionen durch erneuerbaren Strom, dem Import von Wasserstoff oder von Syntheseprodukten. Im Vergleich zu den meisten anderen Studien werden Wechselwirkungen mit dem europäischen Stromsystem stark berücksichtigt. Für mehr Informationen siehe Abbildung 31.

Weitere Details zur EU und nationalen Studien finden sich im Anhang A.1.1.

2.2 Methodische Unterschiede in den Studien und wesentliche Determinanten der Nachfrage

Nationale Studien: Methodik

Die nationalen Studien unterscheiden sich in ihrer Methodik zum Teil deutlich. Grob können die Studien in zwei Gruppen unterteilt werden: Studien, die das Gesamtsystem über alle Sektoren und Technologieoptionen hinweg optimieren sowie Studien, die mit Sektormodellen für die einzelnen Nachfragesektoren arbeiten und anschließend das Energieangebotssystem optimieren (siehe Tabelle 2).

Hinzu kommt die dena-Leitstudie (2018), welche keine Kostenoptimierung der Nachfragesektoren beinhaltet, sondern Technologieentwicklungen und Transformationspfade aus Stakeholderprozessen und Experteneinschätzungen ableitet. Nicht auf Basis von Expertenschätzungen oder ökonomischer Optimierung, sondern in Form von „Wenn-Dann“-Grenzfällen wird die Nachfrage in der Wasserstoffstudie NRW (2019) gesetzt. Zudem wird hier auf der Angebotsseite nur bezüglich der Energieträger Strom und Wasserstoff optimiert.

Tabelle 2: Überblick über die Methodik der Studien

Gesamtsystem- optimierung	Angebotsseitige Optimierung des Energiesystems		
	+ Sektormodelle	+ Expertenschätzungen	+ Setzung von „Wenn-Dann“-Grenzfällen
Transformationspfad wird jahresscharf ermittelt: - ISE (2020): Wege zu einem Klimaneutralen Energiesystem Backcasting-Ansatz nach Zieloptimierung für 2050: - Jülich (2019): Wege für die Energiewende	- BDI (2018): Klimapfade für Deutschland - Agora (2020): Klimaneutrales Deutschland - UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität Inkl. EU-Stromsystem und Netzmodellierung: - BMWi (2021): Langfristszenarien 2	Inkl. EU-Stromsystem und Netzmodellierung: - dena (2018): Integrierte Energiewende	- NRW (2019): Wasserstoffstudie NRW

Nationale Studien: Determinanten

THG-Ziele

Eine wichtige Determinante für den Wasserstoffbedarf ist das Treibhausgas-minderungsziel für das Jahr 2050. Während in 80 %-Szenarien ein Einsatz von Wasserstoff und Syntheseprodukten weniger signifikant ist, steigt deren Relevanz bei ambitionierteren Zielen. Um der Verschärfung der Minderungsziele in der Politik Rechnung zu tragen, werden in den nationalen Studien nur die Szenarien mit einem Minderungsziel von 95 % oder mehr ausgewertet. Agora (2020) betrachtet als einzige den Ausgleich von prozessbedingten Residualemissionen und somit eine 100 %ige THG-Minderung für das Gesamtsystem in 2050 entsprechend der aktuellen politischen Ziele. Eine vollständige Treibhausgasneutralität des Energiesystems mit verbleibenden prozessbedingten Restemissionen in Industrie und Landwirtschaft wird in UBA (2019) sowie dem Szenario Referenz100 von ISE (2020) beschrieben. Das Zwischenziel für das Jahr 2030 liegt in den meisten Studien bei einer Treibhausgas-minderung von 55 %. Ambitioniertere Zwischenziele haben Agora (2020) mit einer Minderung von 60 bis 65 % und die meisten Szenarien von UBA (2019) mit einer Minderung von 60 bis 69 % je nach Szenario. Lediglich das UBA (2019) GreenLate-Szenario bleibt bei dem 55 %-Ziel im Jahr 2030.

Carbon Capture and Storage (CCS)

Die Speicherung von abgedichtetem CO₂ in Deutschland ist umstritten, weshalb CCS in vielen Studien im Vorfeld ausgeschlossen wird, wenn nur die Reduktion energiebedingter Emissionen im Fokus steht. Um vollständige Klimaneutralität zu erreichen, müssen jedoch Optionen für negative Emissionen eingesetzt werden, um prozessbedingte Restemissionen aus der Industrie und Landwirtschaft auszugleichen. Agora (2020) betrachtet daher den Ausgleich von 62 Mio. t CO₂-Äq über Direktabscheidung aus der Luft (DACCS) oder über Abscheidung aus Biomasse (BECCS). In dena (2018) wird CCS für die Vermeidung von 16 Mio. t CO₂ prozessbedingten Restemissionen im In-

dustriesektor eingesetzt, nachdem andere Energieeffizienz- und Klimaschutzmaßnahmen ausgeschöpft sind. Es verbleiben im 95 %-Szenario 27 Mio. t CO₂-Restemissionen im Industriesektor sowie die Restemissionen der Forst- und Landwirtschaft. In BDI (2018) wird CCS in größerem Umfang eingesetzt und wird zur Vermeidung von 93 Mio. t CO₂ prozess- sowie energiebedingter Emissionen im Industrie- und Umwandlungssektor verwendet.

Einschränkende Annahmen im Verkehrssektor

Der Einsatz von Wasserstoff und Syntheseprodukten im Verkehrssektor wird in manchen Studien durch Setzungen und Annahmen stärker beeinflusst als in anderen. In UBA (2019) werden Brennstoffzellenantriebe nicht als Option berücksichtigt, sodass für den PKW- und Lkw-Verkehr nur direktelektrische Antriebsoptionen über Batterien und Oberleitungen bestehen. Syntheseprodukte werden ausschließlich im Luft- und Schiffsverkehr eingesetzt. Ähnlich dazu werden im Elektrifizierungsszenario von dena (2018) nur dort synthetisch erzeugte Energieträger zugelassen, wo es keine direktelektrischen Alternativen gibt. In NRW (2019) werden für 2050 als „Wenn-Dann“-Grenzfall 80 % batterieelektrische Fahrzeuge und 20 % Brennstoffzellenfahrzeuge im Elektrifizierungsszenario und vice versa im Wasserstoffsszenario gesetzt.

EE-Potentiale

In den Studien bestehen zum Teil signifikante Unterschiede in der Einschätzung der maximalen nationalen Potentiale für den Ausbau erneuerbarer Energien. Für Photovoltaik wird beispielsweise in dena (2018) ein maximales Potential bei 250 GW gesehen. In ISE (2020) wird dieses Potential hingegen mit max. 530 GW mehr als doppelt so groß eingeschätzt. Auch in Agora (2020) wird mit einem Einsatz von 355 GW für das Jahr 2050 ein Ausbau deutlich über dem Potential aus dena (2018) angenommen. Für Offshore-Windkraftanlagen besteht ebenfalls eine starke Potential-Spreizung zwischen 40 und 80 GW.

Die unterschiedlichen Annahmen zum EE-Ausbau können indirekte Auswirkungen auf die heimische Erzeugung und den Importbedarf von Wasserstoff und Syntheseprodukten haben. Klare Effekte lassen sich jedoch nicht ableiten, da eine Verknüpfung über die gesamte Endenergienachfrage besteht, welche unter anderem auch durch Annahmen zum Wirtschaftswachstum und zur Effizienzentwicklung beeinflusst wird.

Biomasse

Die Einschätzung der Biomassepotentiale in den Studien kann ebenfalls einen Einfluss auf den Wasserstoffbedarf haben, da Biomasse vor allem im Industrie- sowie im Gebäudesektor eine Ergänzung zum Energieträger Wasserstoff und Syntheseprodukten bildet. Die meisten Studien sehen die nationalen nachhaltigen Biomassepotentiale bereits heute als nahezu ausgeschöpft und die Importmöglichkeiten als begrenzt an. Dadurch bleibt der Biomasse-Einsatz bis 2050 auf einem ähnlichen Niveau. Hierbei findet jedoch i.d.R. eine deutliche Verschiebung innerhalb der Sektoren statt. Die Nutzung der begrenzten Ressource wird für die Zukunft in vielen Studien prioritär in der Industrie gesehen, während sie aktuell hauptsächlich im Umwandlungssektor angesiedelt ist. Eine Ausnahme bildet Jülich (2019), in der eine Steigerung des Biomasseeinsatzes durch eine Verdopplung der heute genutzten Ackerflächen vorgesehen ist. Demgegenüber werden in UBA (2019) die negativen Umweltauswirkungen des Biomasseanbaus allein für energetische Zwecke als nicht vertretbar bewertet, sodass dieser in allen in UBA (2019) beschriebenen Szenarien ab 2030 eingestellt wird.

Bilanzgrenzen

Einen Einfluss auf die Auswertung der Wasserstoff- und Syntheseprodukt nachfragen haben auch die unterschiedlichen Bilanzgrenzen in den Studien. So ist es für die Syntheseprodukt nachfrage relevant, ob der internationale Luft- und Schiffsverkehr mitberücksichtigt wird, da hier ein zusätzlicher Bedarf von 130 bis 150 TWh bis 2050 entstehen kann. Der internationale Luft- und Schiffsverkehr wird in dena (2018) nicht berücksichtigt. In NRW (2019) wird dieser nur in einer Sensitivitätsanalyse betrachtet (zur Vergleichbarkeit werden bei den später dargestellten Ergebnissen diese Szenarien über eine Abschätzung korrigiert). In Agora (2020) und ISE (2020) wird der internationale Schiffsverkehr nicht berücksichtigt.

Nicht-energetische Bedarfe

In den meisten Studien werden die Feedstocks für die Stahl- und Chemieindustrie, also die stoffliche Nutzung von Energieträgern, mitbilanziert. In ISE (2020) und Jülich (2019) wird allerdings nur die energetische Nutzung von Energieträgern abgebildet. Die nicht-energetische Verwendung in diesem Sektor ist jedoch eine starke Determinante für einen hohen Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf. In beiden Studien besteht eine Ausnahme bezüglich der Stahlindustrie, sodass der Wasserstoffbedarf für die Stahldirektreduktion jeweils im Ergebnis enthalten ist.

Sanierungsrate und -tiefe

Unterschiede in den Studien bestehen insbesondere bei den Ambitionen (Sanierungstiefe), der Sanierungsrate sowie der Einschätzung der Erreichbarkeit hinsichtlich Reduktion des Nutzenergiebedarfs durch energetische Sanierung der Gebäudehülle. In manchen Studien werden Restriktionen bei der Dämmung der Gebäude, z. B. durch Denkmal- oder Ensembleschutz beachtet. Die Effekte der Restriktionen werden unterschiedlich bewertet.

Eine tabellarische Gegenüberstellung dieser und weiterer Determinanten für alle betrachteten Studien kann dem Anhang A.1.3 entnommen werden.

EU-Studien

Auch bei den EU-Studien bestehen diverse Unterschiede in den Methoden und Determinanten. Neben vergleichbaren Unterschieden bei den nationalen Studien ist bei den Studien der EU für die Nachfrage noch bedeutsam, ob sie Großbritannien noch miteinbeziehen (die älteren Studien) oder nicht (die neueren Studien). Weiterhin ist das Ambitionsniveau der Treibhausgasreduzierung oft unterschiedlich, sowohl für das Zieljahr 2050 wie auch bei den Zwischenjahren. Weitere Informationen zu den EU-Studien finden sich im Anhang A.2.

2.3 Defizite der Studien

In diesem Kapitel werden die identifizierten Defizite der Studien herausgearbeitet.

Zum Thema Infrastrukturen lässt sich Folgendes festhalten: Wenig oder gar nicht werden in den Studien behandelt:

- die Umstellung von Gasnetzen
- der Aufbau von Verteilnetzen für die Wärmeversorgung
- die Wasserstoffbeimischung oder die Thematik der Umstellung der Verteilnetze auf reine Wasserstoffnetze (muss gebietsweise erfolgen und erfordert einen Austausch von angeschlossenen Geräten)

Teilweise existieren zudem Defizite bei der Berücksichtigung anderer Transport- und Verteilnetzinfrastrukturen (Strom und Wärme). Die integrierte Betrachtung über mehrere Infrastrukturen hinweg ist bisher ebenfalls kaum erfolgt.

Gerade für die wichtige Transformationsphase 2030 und 2040 liegen deshalb beim Thema Infrastrukturen nur eingeschränkt Informationen vor.

Beim Thema der Wasserstoffherstellung wird blauer oder türkisfarbener Wasserstoff kaum thematisiert. Der Fokus der untersuchten Studien liegt auf grünem Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse. Im Übergang bis 2050 wird partiell auch der deutsche Netzstrommix für die Herstellung von Wasserstoff in den Studien genutzt. Durch die fossilen Anteile im Strommix kann der hergestellte Wasserstoff noch als „grauer“ Wasserstoff bezeichnet werden. An einer EU-Definition der grünen Eigenschaften von Wasserstoff wird derzeit noch gearbeitet. Fragen der Zusätzlichkeit der grünen Stromproduktion auf nationaler Ebene und Produzentenebene sowie geographische und zeitliche Korrelation von Erneuerbaren Erzeugungsanlagen und Wasserstoffproduktion müssen dabei noch geklärt werden. Ein wirtschaftlicher Vergleich von grünem mit blauem bzw. türkisfarbenem Wasserstoff (z. B. als Brückentechnologie oder komplementärer Energieträger) unterbleibt somit i.d.R. in den Studien. Diese Alternativen könnten aber im Übergang wirtschaftlich sein. Allerdings stellen sich hier Fragen der Akzeptanz. Auch muss beachtet werden, dass bei der Gewinnung und dem Transport von Gas erhebliche Treibhausgasemissionen entstehen können.

Die Konkurrenzsituation der Herstellung von synthetischen Kohlenwasserstoffen mit der Alternative aus der Weiternutzung von fossilen Brennstoffen in Verbindung mit CO₂-Abscheidung aus der Luft und Einlagerung wird ebenfalls nicht betrachtet. Sie könnte, wenn sie in größerem Umfang genutzt wird, allerdings ein wichtiger Game Changer für die Bewertung der Syntheseprodukte sein.

Beim Import von Wasserstoff- und Syntheseprodukten wird in den Studien üblicherweise mit durchschnittlichen Herstellkosten argumentiert, nicht über Preise. Wie man von Herstellkosten zu Preisen kommt, die z. B. Gewinnmargen, Risikoaufschläge von Kapitalgebern für Investitionen in geopolitisch weniger stabilen Regionen, oder wie die generelle Marktpreisbildung, z. B. ein Weltmarktpreis oder regionale Märkte durch Dominanz von Pipelinetransport, aussehen könnten, wird in den Systemstudien i.d.R. nicht betrachtet. Demgegenüber wird bei allen anderen importierten Energieträgern Preise oder Grenzkosten bei Strom angesetzt werden. Die angesetzten Kosten für importierten Wasserstoff- und Syntheseprodukte könnten damit im Vergleich zu den anderen Energieträgern unterschätzt werden.

Die den Analysen unterlegten techno-ökonomischen Annahmen z. B. zu Investitionen in Anlagen oder Anlagenlebensdauern sind oft intransparent, genauso wie Modellierungsdetails.

Oft werden rationale, rein ökonomische Kaufentscheidungen (Homo Oeconomicus) unterstellt, was mit realen Entscheidungen nicht immer übereinstimmt. Generell sind Kauf-/Investitionsentscheidungen wenig verstanden bzw. vereinfacht modelliert.

Der Einbezug nicht-ökonomischer Kriterien ist herausfordernd und wird stark unterschiedlich in den Studien vorgenommen. Manche Setzungen werden teilweise als notwendig erachtet, um anderen Aspekten außer einer „ökonomischen Optimierung“ Raum zu geben. Diese können aber zu deutlichen Unterschieden in den Ergebnissen führen, weil sie nicht homogen getroffen werden. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, wird beispielsweise der Einsatz von CCS (Carbon Capture and Storage) u. a. aus Gründen der Akzeptanz, Umweltverträglichkeit und langfristiger Tragfähigkeit in vielen Studien ausgeschlossen oder stark beschränkt. Teilweise werden auch Optionen der direkten Elektrifizierung im Straßenverkehr eingeschränkt oder ausgeschlossen.

Die Abbildung des Raffineriesektors, aber auch generell des Chemiesektors wird oft sehr vereinfacht vorgenommen, obwohl dies wichtige Sektoren für den Wasserstoffbedarf werden könnten. Der im

Raffinerieprozess benötigte Wasserstoff, z. B. die Entschwefelung oder das Hydrocracken, wird teilweise aus in Prozessen anfallendem Wasserstoff (Nebenprodukt) oder durch separat hergestellten Wasserstoff aus z. B. Erdgas gedeckt. Dieser lässt sich durch die Wasserelektrolyse ersetzen. Raffinerien sind sehr komplexe Anlagen mit vielfältigen Energie- und Materialflüssen. Viele Produkte finden in verschiedenen Sektoren Verwendung (Chemie/Schifffahrt/Bauwesen etc.). Diese Komplexität und Interaktion mit anderen Sektoren wird bisher in den meisten Systemstudien nur sehr grob wiedergegeben. So müsste die Frage beantwortet werden, wie andere wichtige Raffinerieprodukte für den nichtenergetischen Verbrauch wie Bitumen, Schmierstoffe oder Petrolkoks etwa für die Aluminiumerzeugung oder die Bauindustrie bereitgestellt werden können.

Die Chemieindustrie ist sehr heterogen und daher in Systemstudien nicht einfach abzubilden. In einigen Systemstudien werden z. B. keine Feedstocks (nichtenergetischer Verbrauch) betrachtet, sondern nur der Prozessenergiebedarf. Eine Analyse der zur Herstellung der Feedstocks benötigten Ressourcen fehlt häufig in den Systemstudien, ebenso wie die Emissionen bei der Entsorgung der Chemieprodukte.

Die Deckung des Kohlenstoffbedarfs für Syntheseprodukte wird oft vereinfacht bzw. nicht abgebildet. Gerade wenn CO₂ aus fossilen Kraftwerken oder CO₂ aus Industrieprozessen künftig nicht oder deutlich weniger zur Verfügung steht. Dies betrifft auch Transportfragen von Kohlenstoff und beeinflusst somit die Preisannahmen für Syntheseprodukte.

Des Weiteren werden die möglichen Effekte einer Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz in den Studien/Szenarien oft unterbeleuchtet.

3 Studienergebnisse hinsichtlich potentieller Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage

3.1 Vorbemerkung

Der im folgenden ausgewiesene Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf wird i.d.R. über Elektrolyse abgedeckt. Die heutige konventionelle Wasserstofferzeugung auf Basis fossiler Energieträger wird i.d.R. in den Studien nicht separat ausgewiesen. Weiterhin ist die Vergleichbarkeit zwischen den Studien/Szenarien teilweise schwierig. Dies liegt u. a. an folgenden Gründen:

- unterschiedliche Abgrenzung und Ausweisung der Endenergieträger (u. a. keine Trennung zwischen konventionellen, synthetischen und biogenen Gasen)
- unterschiedliche Abgrenzung der Nachfragesektoren (z. B. Wärme nicht separat ausgewiesen, Prozesswärme nicht sauber getrennt von Raumwärme etc.)
- unterschiedliche Detailtiefe (sektorale Differenzierung, zeitliche Auflösung etc.)

3.2 Auswertung der EU-Studien

Für die Auswertung der Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarfe in der EU werden zwei EU-Systemstudien und eine Metastudie analysiert. Aus den Studien werden Szenarien mit THG-Minderungsziele von über 90 % im Jahr 2050 ausgewertet. In der Summe werden 20 Szenarien für die EU ausgewertet. Diese unterscheiden sich bezüglich der THG-Minderungsprojektion folgendermaßen: 2030: 41 bis 77 %, 2040: 70 bis 93 % und 2050: 90 bis 100 %. In einer ersten Auswertung werden die Szenario-Gruppen deshalb nach THG-Minderungsziele in 2050 gegliedert in *Niedrig* (<95 %), *Mittel* (≥95 % & <100 %) und *Hoch* (100 %).

Auf Basis dieser Unterteilung und nach Höhe der Endenergienachfrage aufsteigend sortiert zeigen Abbildung 1 und Abbildung 2 die Endenergienachfrageszenarien für 2030 bzw. 2050. In Abbildung 1 sieht man, dass in 2030 die reine Wasserstoffnachfrage in der EU in den meisten der Szenarien die Wasserstoffnachfrage recht niedrig ist (Öko-Institut, 2017; JRC, 2018; EC, 2020). Die Bandbreite liegt zwischen 7 und 102 TWh. Dabei zeigt das Szenario JRC Zero (JRC, 2018) die größte Wasserstoffnachfrage, welche zu 73 % aus dem Verkehrssektor generiert wird. Die Wasserstoffnachfrage einschließlich der Syntheseproduktnachfrage reicht von 15 bis 221 TWh und liegt somit ebenfalls auf einem recht geringen Niveau.

Die Nachfrage von Wasserstoff und Syntheseprodukt bis 2050 steigt gegenüber 2030 in den meisten Studien und Szenarien sehr deutlich. Sie erreicht Anteile von 0,2 % bis 20 % an der Endenergiebereitstellung, siehe Abbildung 2. Man erkennt dabei, dass diese Nachfrage tendenziell mit THG-Ambitionsniveau steigt. In der Regel erhöht sie sich auch mit der Endenergienachfrage. Die Endenergienachfrage unterliegt einer hohen Spreizung, welche durch Unterschiede im Bilanzraum (Einbezug vom internationalen Flug- und Schiffsverkehr und wechselnde Betrachtung von EU27 oder EU28) oder Unterschiede bei makroökonomischen Treibern wie dem unterstellten Anstieg des Brutto sozialproduktes und Effizienzmaßnahmen begründet ist. Oft setzen Studien/Szenarien mit niedriger H₂- und Syntheseproduktnachfrage stärker auf eine Direktelektrifizierung. Weiterhin wird ersichtlich, dass die angenommene Biomassenutzung, die in Anwendungskonkurrenz zu H₂ und Syntheseprodukten steht, einen relevanten Einfluss auf deren Höhe hat.

Abbildung 1: Gesamte Endenergienachfrage in der EU im Jahre 2030

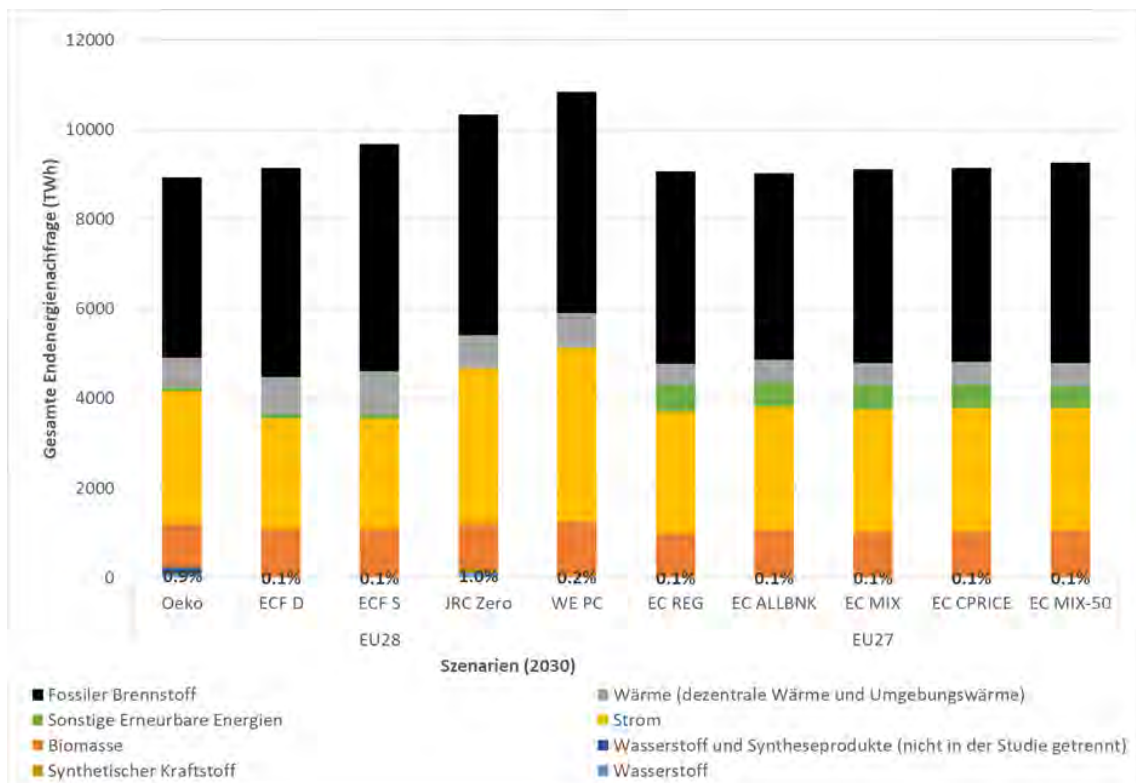
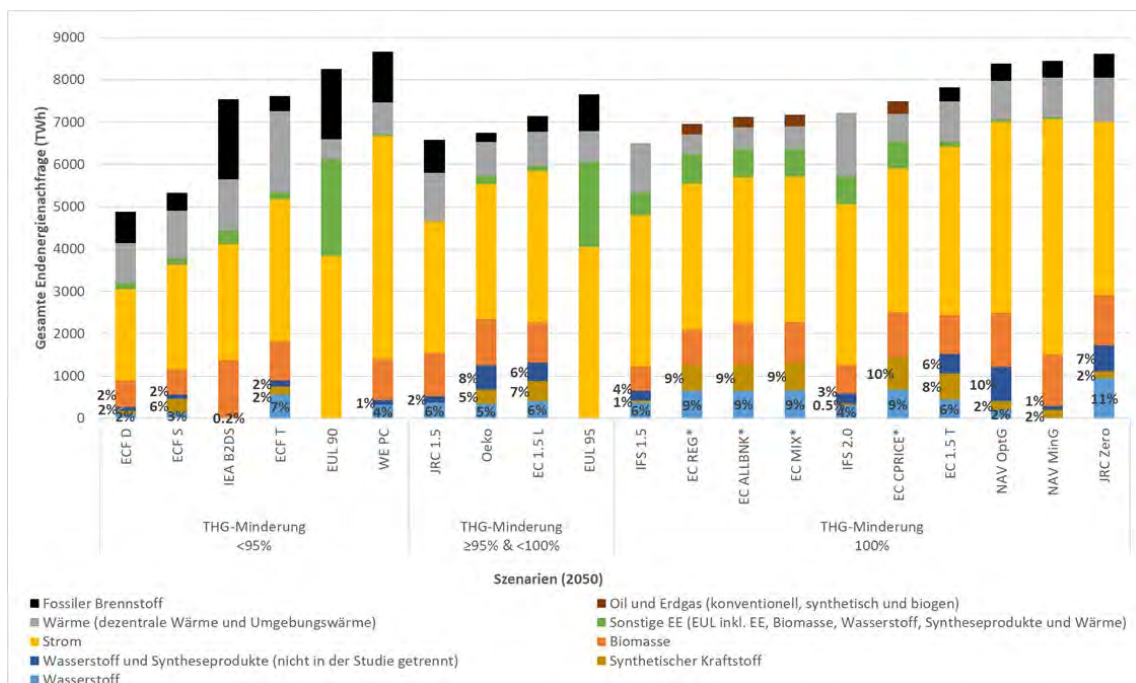


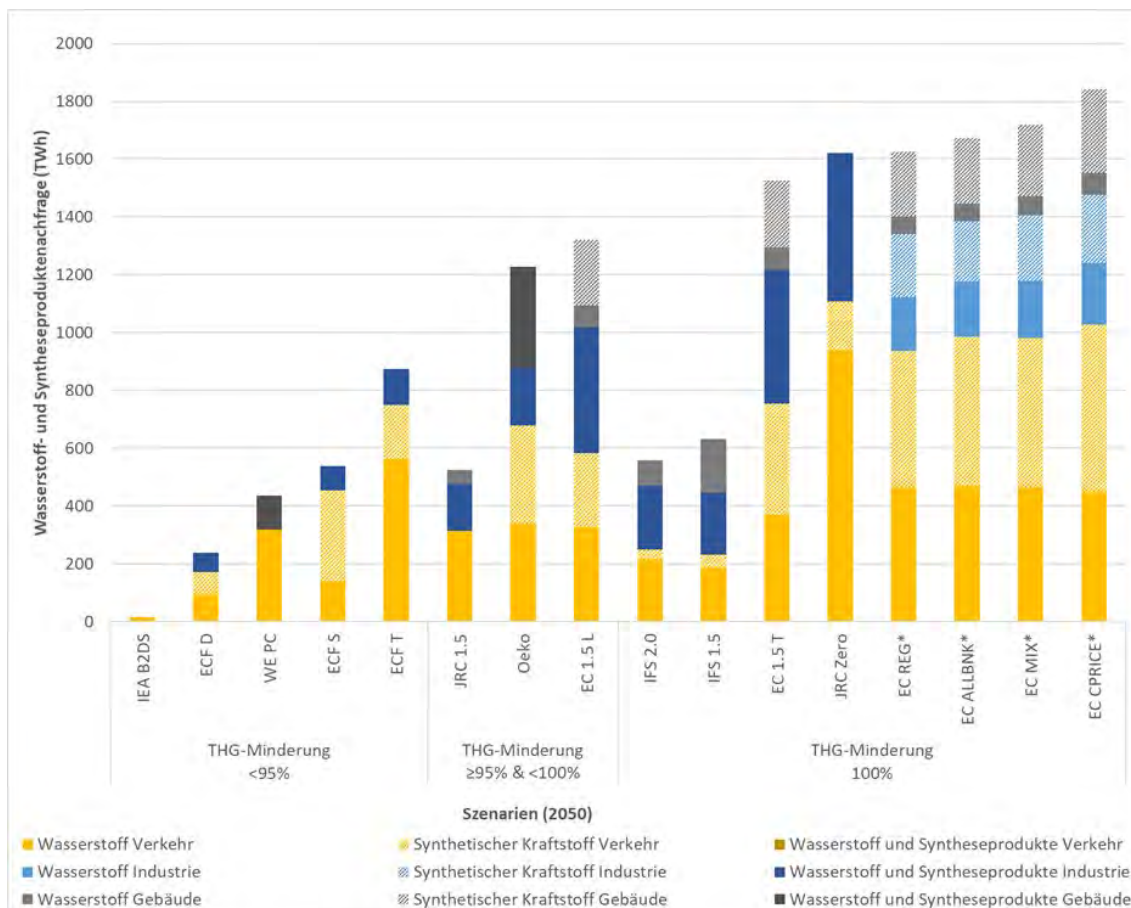
Abbildung 2: Gesamte Endenergienachfrage in der EU im Jahre 2050



Ein überwiegender Teil der Szenarien zeigt die größte Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage im Verkehrssektor (Wasserstoffnachfrage 17 bis 940 TWh, Syntheseproduktnachfrage 0 bis 577 TWh). Die H₂- und Syntheseproduktnachfrage in der Industrie variiert zwischen den Szenarien und

weist eine große Bandbreite von 0 bis 514 TWh auf. Im Gebäudebereich wird tendenziell ein etwas geringerer Bedarf für Wasserstoff und Syntheseprodukte in den Studien gesehen, der aber in einigen Studien/Szenarien recht hoch ist (von 0 bis 365 TWh).

Abbildung 3: Wasserstoff- und Syntheseproduktenachfrage in den Nachfragesektoren in der EU im Jahre 2050



Weiter Detailergebnisse zur EU finden sich im Anhang A.2. Zusätzlich ist eine Industriestudie „Industrial Innovation – Pathways to deep decarbonisation of industry“ (EC, 2019) ausgewertet. Die Auswertung befindet sich im Anhang A.3.

3.3 Auswertung der nationalen Studien und Szenarien

3.3.1 Gesamter Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf

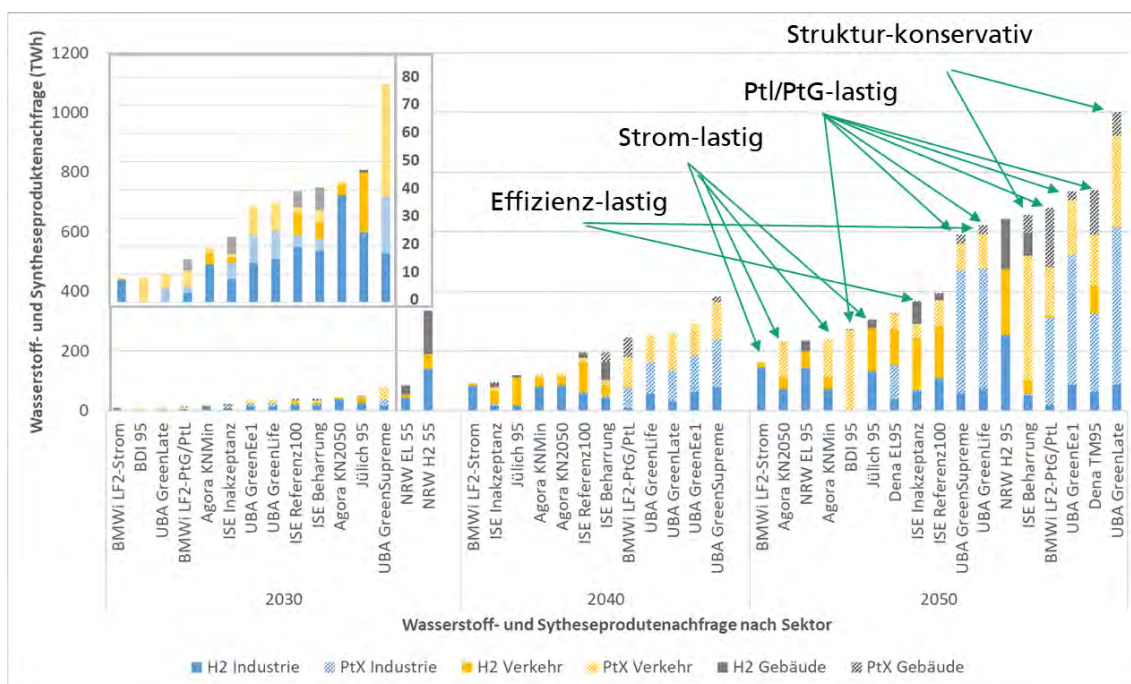
Ein Vergleich der Studienauswertung zum Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf in den Anwendungssektoren in Deutschland ist in Abbildung 4 dargestellt. In der Hochlaufphase wird i.d.R. recht früh eine Nachfrage in der Industrie in den Studien ausgewiesen. Danach folgen eine Nachfrage im Verkehrssektor und eher längerfristig in den meisten Szenarien für den Gebäudesektor. Die Ergebnisse für den Gebäudesektor weisen recht hohe Schwankungen zwischen den Szenarien auf. Unterscheide und Ausreißer lassen sich oft auf das Szenariodesign zurückführen. In den Szenarien aus NRW (2019) sind beispielsweise die „Wenn-Dann“-Grenzfälle zum Teil schwer zu plausibilisieren, da

hier anwendungsseitig keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stattgefunden hat. Auch sonstige nicht-ökonomische Kriterien, wie Akzeptanz und Suffizienz, die in anderen Szenarien teilweise eine größere Rolle spielen, sind teilweise schwer nachvollziehbar.

Bei den strukturkonservativen Szenarien, die sich z. B. durch geringe Akzeptanz von neuen Technologien wie Elektromobilität oder Wärmepumpen auszeichnen, werden die Optimierungen auf der Nachfrageseite durch die angesprochenen nicht-ökonomischen Kriterien ergänzt. Es wird angenommen, dass diese dazu führen, dass neue Technologien nicht oder nur sehr begrenzt künftig zum Einsatz kommen werden. Ähnliches ist zu den Effizienz- und Suffizienzsznarien zu sagen. Sie zeichnen sich ebenfalls durch starke Setzungen auf Basis nicht-ökonomischer Betrachtungen aus, beispielsweise durch einen deutlichen Rückgang der motorisierten Individualmobilität. Solche Szenarien zeigen extremere Lösungsräume auf.

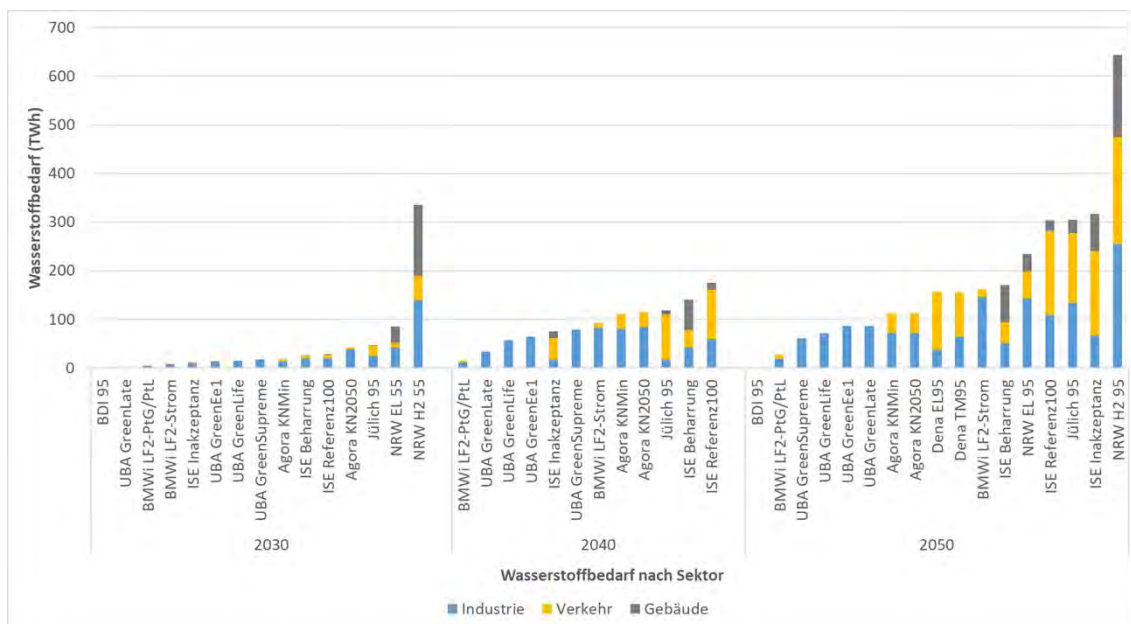
In den Studien/Szenarien ist eine Substitutionsbeziehung von Strom vs. Wasserstoff/Syntheseprodukte erkennbar, was u. a. ebenfalls eine Folge des Szenariodesigns ist.

Abbildung 4: Wasserstoff- und Syntheseproduktenachfrage in den Nachfragesektoren in Deutschland in 2030, 2040 und 2050



In der Abbildung 5 ist nur der Wasserstoffbedarf separat dargestellt. Im Hochlauf wird in vielen Szenarien recht früh eine Nachfrage in der Industrie gesehen, danach dann im Verkehrssektor und im Gebäudebereich. Im Verkehr werden im Jahr 2030 eher die Syntheseprodukte gesehen.

Abbildung 5: Wasserstoffnachfrage in den Nachfragesektoren in Deutschland in 2030, 2040 und 2050



Die Bandbreiten an H₂, Syntheseprodukten und Biomasse zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Potentielle Wasserstoff-, Syntheseprodukte- und Biomassepotentiale in den Nachfragesektoren in Deutschland 2030, 2040 und 2050

	2030	2040	2050
Wasserstoff, Syntheseprodukte und Biomasse	34 bis 232 TWh	119 bis 382 TWh	234 bis 740 TWh
Nur Wasserstoff	0 bis 47 TWh	15 bis 176 TWh	0 bis 316 TWh
Nur Syntheseprodukte	0 bis 40 TWh (bis 60 TWh mit Syntheseprodukten als Rohstoffe)	0 bis 158 TWh (bis 303 TWh mit Syntheseprodukten als Rohstoffe)	0 bis 653 TWh (davon Rohstoffe bis 260 TWh)

Tabelle 3 zeigt, dass die Substitutionseffekte zwischen Wasserstoff, Syntheseprodukten und Biomasse bedeutsam sind. Starke Ausreißer stellen wiederum die Szenarien aus NRW (2019) dar (Wasserstoff-Nachfrage 85 und 355 TWh). Sie sind deshalb in der Tabelle nicht dargestellt.

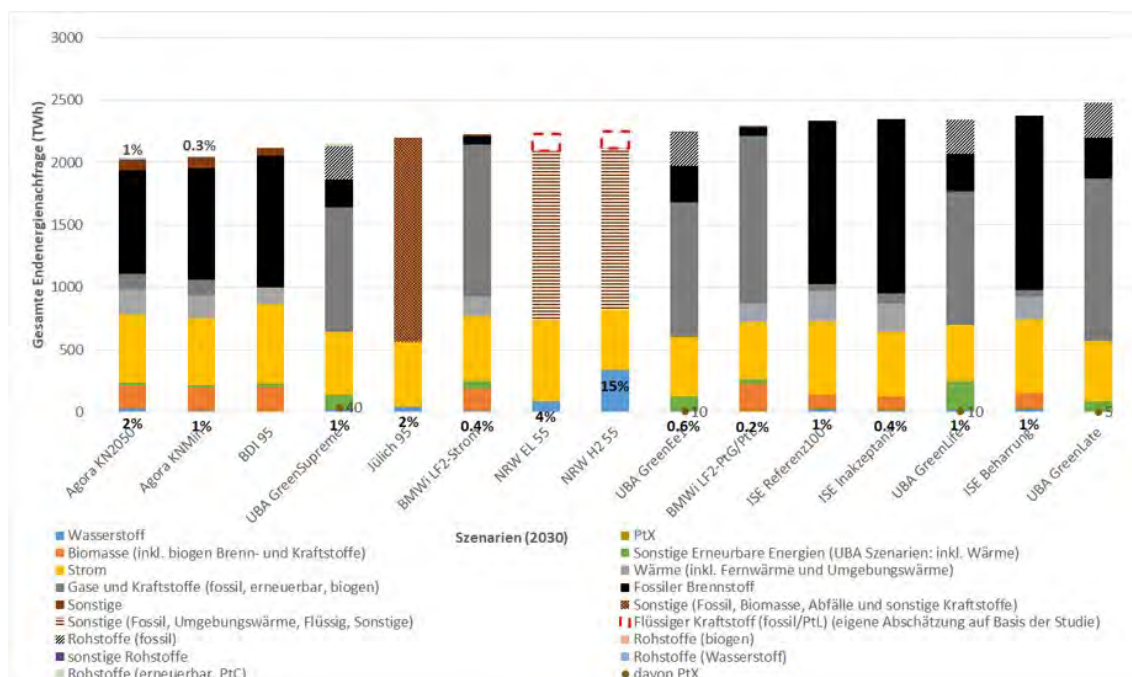
Abbildung 6: Nationaler Endenergieverbrauch in Deutschland in 2030

Abbildung 6 zeigt die Gesamt-Endenergienachfragen im Jahr 2030 aufgeschlüsselt nach Energieträgern. Die Gesamtergebnisse liegen hier relativ eng zusammen. Größere Umbrüche in der Struktur der Endenergieträger im Vergleich zu heute sind noch nicht zu erkennen. Nur wenige Szenarien weisen Werte für 2040 aus, die in Abbildung 7 dargestellt sind. Betrachtet man die Werte für 2040 so ist eine deutlich größere Nachfrage nach Wasserstoff und Syntheseprodukten gegenüber 2030 erkennbar (siehe Tabelle 3). Weiterhin führen die unterschiedlichen Szenarien-Philosophien zu einer Spreizung der Endenergienachfrage (Struktur-konservativ vs. starke Effizienz- und Suffizienzannahmen). Es ist aber zu betonen, dass Energieeffizienz in allen Studien/Szenarien eine sehr bedeutsame Rolle spielt. Die Endenergienachfrage liegt i.d.R. deutlich unter 2.000 TWh und damit unter dem Wert für 2030, obwohl i.d.R. ein weiteres Wirtschaftswachstum in den Studien angenommen wird. Der Anteil an Strom steigt zum Teil deutlich an.

Wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, steigt die Nachfrage nach Wasserstoff und Syntheseprodukten zum Jahr 2050 signifikant an. Szenarien mit hohem Wirtschaftswachstum, geringen Energieeffizienz- und Suffizienzeffekten sowie geringerer Kreislaufwirtschaft kommen i.d.R. zu hohen Endenergienachfragen und hohen Wasserstoff- und Syntheseprodukt nachfragen. Bis zum Jahr 2050 scheint die Nachfrage nach der Nutzung von Biomasse zu steigen, wenn nur die Nachfragesektoren betrachtet werden. Allerdings werden die Potentiale für Biomasse in den meisten Studien als konstant eingeschätzt, siehe Kapitel 2.2. Es erfolgt oftmals eine Verschiebung der Biomassenutzung vom Umwandlungssektor in den Industrie- oder den anderer Nachfragesektoren.

Wenn CCS in größerem Umfang, und nicht nur für den Ausgleich prozessbedingter Residualemissionen wie in Agora (2020) verwendet wird, zugelassen wird, verringert sich Wasserstoff- und Syntheseprodukt nachfrage signifikant (BDI, 2018; dena, 2018). Das Beschränken von Direktelektrifizierungstechnologien erhöht umgekehrt die Wasserstoff- und Syntheseprodukt nachfrage.

Abbildung 7: Nationaler Endenergieverbrauch in Deutschland in 2040

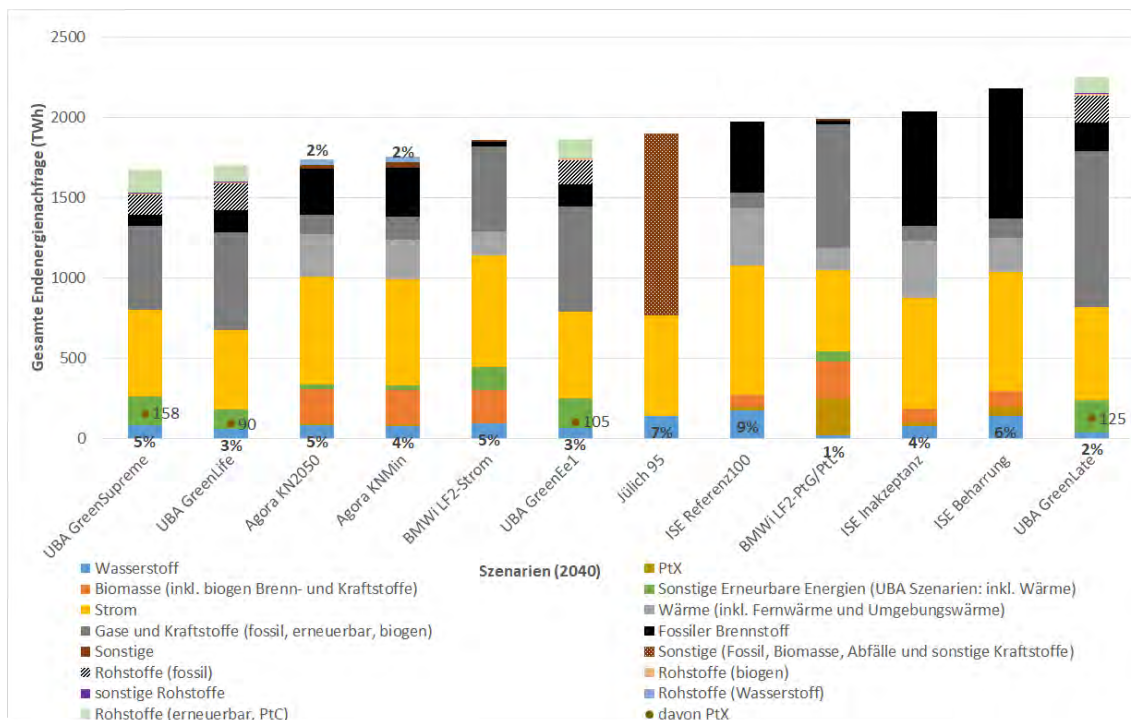
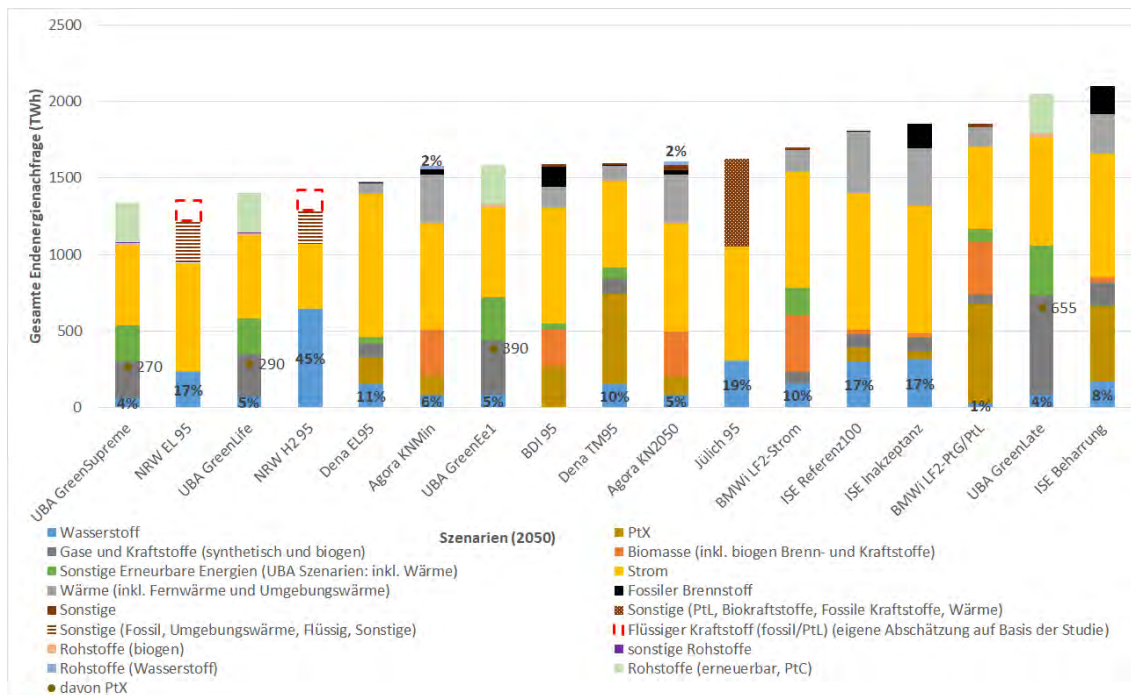


Abbildung 8: Nationaler Endenergieverbrauch in Deutschland in 2050

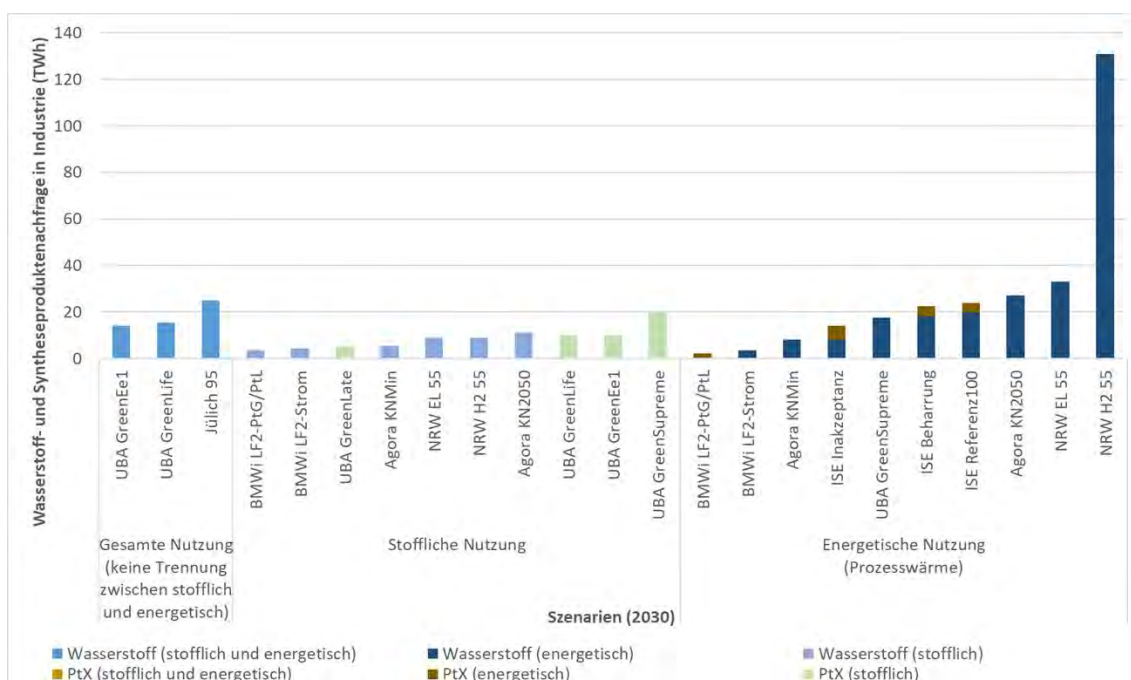


3.3.2 Sektoraler Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf im Industriesektor

In den nun folgenden Unterkapiteln wird näher auf die einzelnen Sektoren Industrie, Gebäude, Gewerbe-Handel-Dienstleistungen (GHD), Haushalte (HH), Verkehr und Umwandlung eingegangen.

Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die potentielle Bandbreite an Wasserstoff und Syntheseproduktenachfrage in der Industrie in den Jahren 2030 und 2050. Soweit dies in den Studien angegeben war, werden dabei die stoffliche und die energetische Nutzung unterschieden.

Abbildung 9: Wasserstoff- und Syntheseproduktenachfrage in der Industrie in 2030: Stoffliche und energetische Nutzung



Wenige Studien weisen Daten für den Industriesektor heruntergebrochen auf Branchenebene aus. Die entsprechenden Studien/Szenarien sehen einen hohen Wasserstoffeinsatz im Eisen- und Stahlsektor sowie im Chemiesektor, siehe Abbildung 11 und Abbildung 12. Chemische Grundstoffe haben von Natur aus eine stoffliche Dimension, häufig auf Basis von Kohlenstoff, die nicht durch einen nicht-stofflichen Energieträger ersetzt werden kann.

Der Wasserstoffbedarf tritt schon recht früh (2030) auf und nimmt dann über die Jahre zu. Weiterhin ist erkennbar, dass davon ein hoher Teil bei der stofflichen Nutzung gesehen wird.

Abbildung 10: Wasserstoff- und Syntheseproduktenachfrage in der Industrie in 2050: Stoffliche und energetische Nutzung

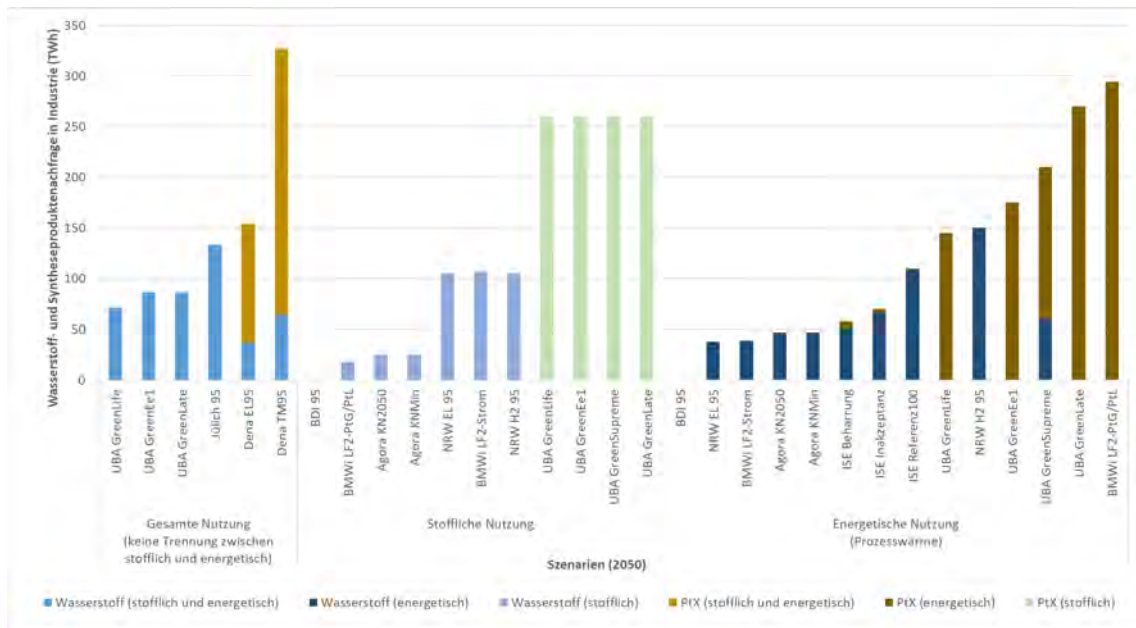


Abbildung 11: Industrie Energiebedarf sowie stoffliche Wasserstoffbedarfe in 2030

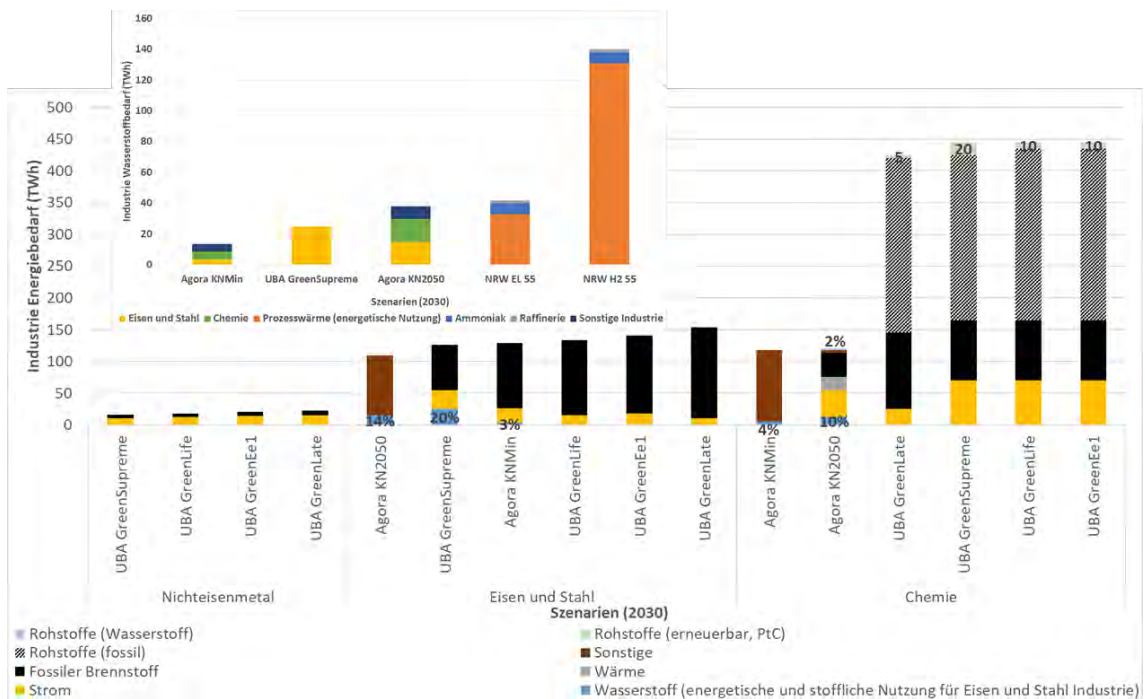
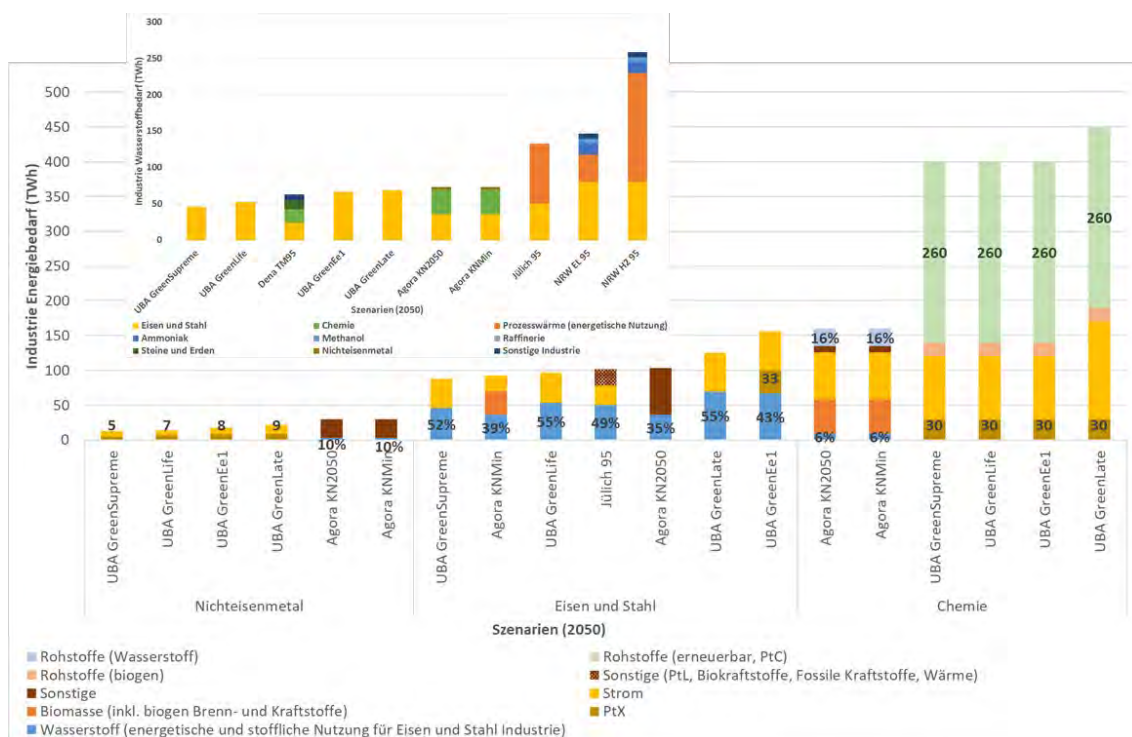


Abbildung 12: Industrie Energiebedarf sowie stoffliche Wasserstoffbedarfe in 2050



3.3.3 Sektoraler Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf im Gebäudesektor, Gewerbe-Handel-Dienstleistungssektor (GHD) und Haushaltesektor (HH)

Mit Fokus auf das Stützjahr 2030 wird für (fast) alle Studien und Szenarien deutlich, dass im Gebäude-/Gewerbe-Handel-Dienstleistungssektor (GHD) und Haushaltesektor (HH) i.d.R. nur eine sehr geringe bzw. keine Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage erkennbar ist, siehe Abbildung 13.

Abbildung 13 zeigt den Endenergieverbrauch im Gebäudesektor für das Jahr 2040. Ein deutlicher Anstieg des Wasserstoffbedarfs wird hier in ISE (2020) und Jülich (2019) gesehen, während die anderen Studien hingegen keinen signifikanten Wasserstoffbedarf ausweisen.

In 2030 ist der Anteil in allen Studien und Szenarien vernachlässigbar. In 2050 weisen die Studien und Szenarien eine starke Divergenz bezüglich des Wasserstoff- und Syntheseprodukteinsatzes auf, wie aus der Abbildung 15 ersichtlich wird. Der Anteil (Energie) von Wasserstoff in der dezentralen Wärmeversorgung (Gaskessel, Brennstoffzellen) liegt 2050 üblicherweise zwischen 0 % und 20 %. Je ambitionierter die Ziele und je geringer der Beitrag der Gebäudeenergieeffizienz, desto höher ist dieser. In vielen Studien und Szenarien dominiert in diesem Sektor die Stromnutzung und Umgebungswärme sowie Fernwärme. Der Gebäudeendenergieverbrauch ist in 2050 gegenüber 2030 in einigen Szenarien stark gesunken, in andern nicht. Unterschiede in den Sanierungsraten und Sanierungstiefen und der Entwicklung der Wohnfläche können hier wichtige Determinanten sein.

Abbildung 13: Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage im Gebäude-/GHD&HH-Sektor im Jahre 2030

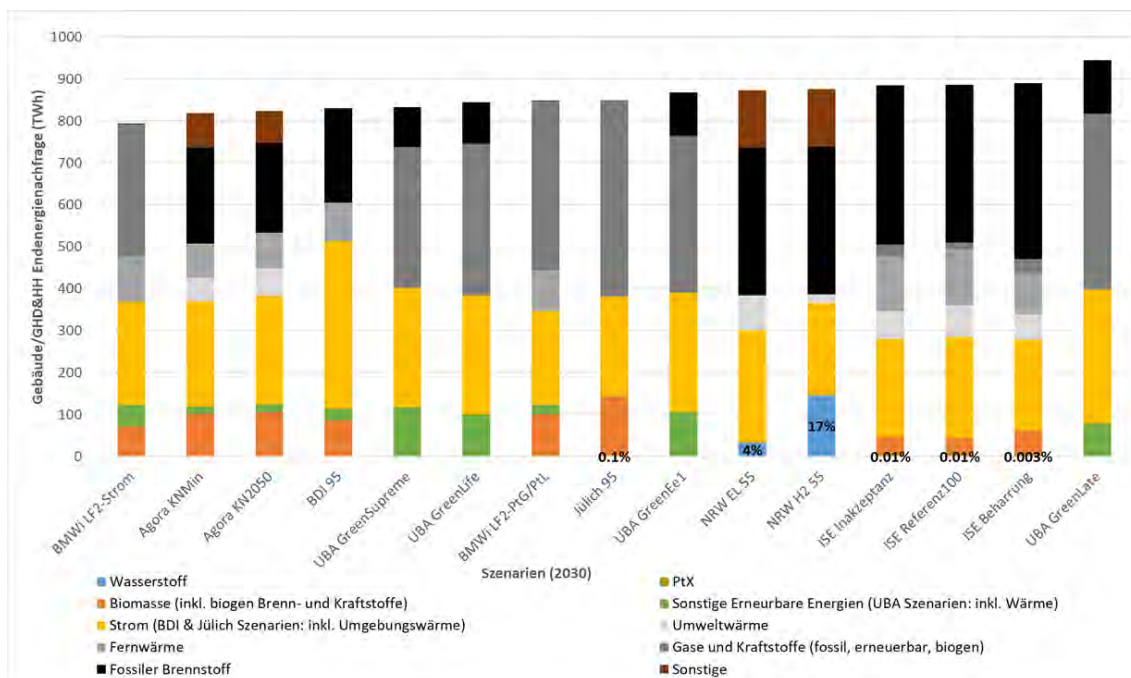


Abbildung 14: Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage im Gebäude-/GHD&HH-Sektor im Jahre 2040

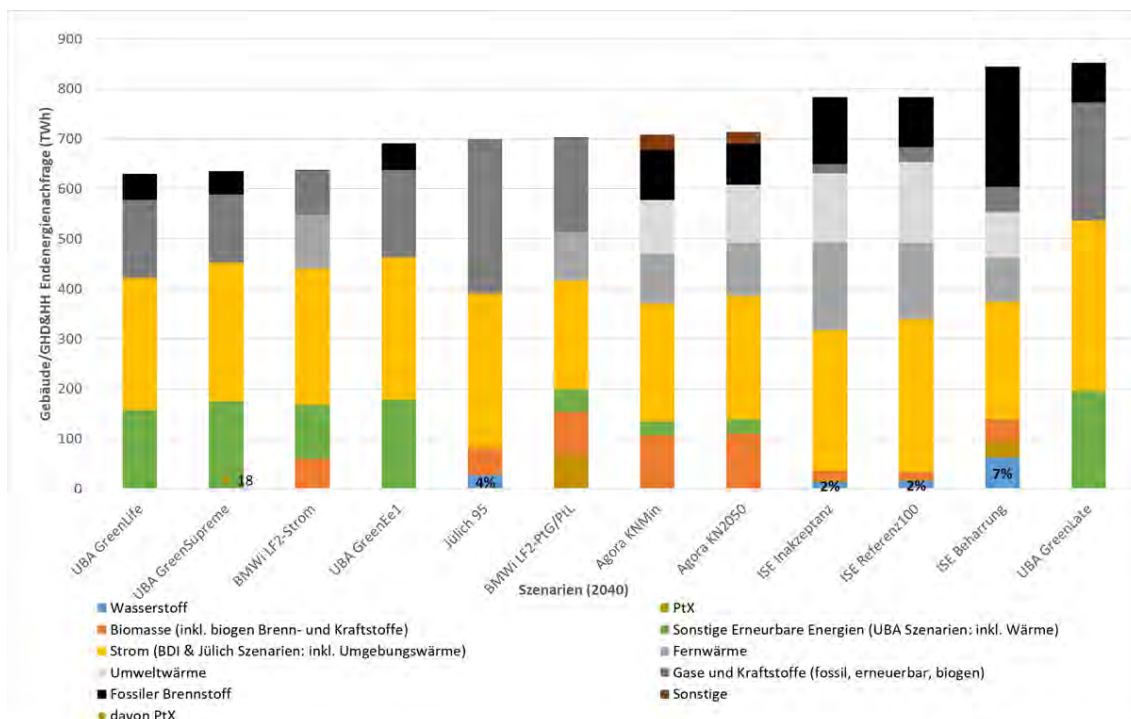
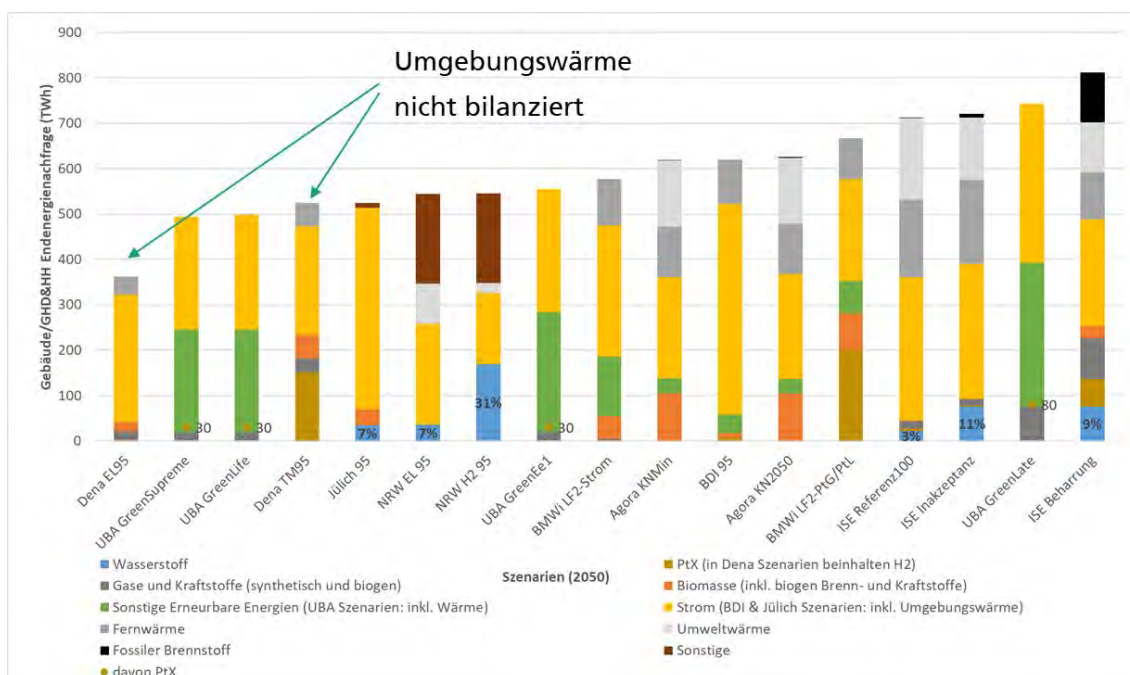


Abbildung 15: Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage im Gebäude-/GHD&HH-Sektor im Jahre 2050



Der Anteil der Fernwärme steigt bis 2050 in den meisten nationalen Studien deutlich an. Wie in der dezentralen Wärmeversorgung spielt die Elektrifizierung und Nutzung von Erneuerbaren (Umweltwärme, Geothermie, Solarthermie) dabei eine wichtige Rolle. Wasserstoff als Energieträger für Fernwärme wird nur in der Hälfte der Studien modelliert. Der Anteil variiert in diesen Studien zwischen 0 % und 30 % und liegt damit i.d.R. höher als bei der dezentralen Wärmeversorgung. Nutzbare Abwärmepotentiale, die sich aus der Umstellung auf H₂ in Industrieprozessen und bei der Produktion von H₂ in Elektrolyseuren ergeben, werden teilweise diskutiert, aber nicht quantifiziert.

3.3.4 Sektoraler Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf im Verkehr

Ab 2030 weisen die Studien/Szenarien einen Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf im Verkehr aus, der bis zu 57 TWh für Wasserstoff, Syntheseprodukte und Biomasse geht (siehe Abbildung 16). Nur das H₂-55-Szenario in NRW (2019) weist größere Anteile von Wasserstoff aus, die aber wegen der sehr hohen Anteile an Brennstoffzellen-Fahrzeugen als wenig plausibel eingestuft werden (vgl. Kapitel 2.2).

Die struktur-konservativen Szenarien sehen dabei einen höheren Bedarf im Verkehr, während die Szenarien mit hoher Effizienz und Suffizienz kaum einen Bedarf sehen. Von allen alternativen Kraftstoffen und Antrieben besitzen die strombasierten Antriebe den größten Anteil. Eine mögliche Rolle der Biomasse wird stark unterschiedlich gewertet, was auch in den anderen Nachfragesektoren der Fall ist. Abbildung 17 zeigt den Endenergieverbrauch im Verkehrssektor im Jahr 2040. Die alternativen Kraftstoffe gewinnen zu diesem Zeitpunkt größere Marktanteile. In vielen Studien dominiert jedoch weiterhin der Stromeinsatz. In 2050 kommen fossile Energieträger fast in keinem Szenario mehr vor, was in Abbildung 18 zu erkennen ist. Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe spielen neben Strom eine sehr wichtige Rolle. Die Marktanteile von Wasserstoff gegenüber Syntheseprodukten werden in den Szenarien stark unterschiedlich bewertet.

Abbildung 16: Gesamtenergiebedarf im Verkehr 2030

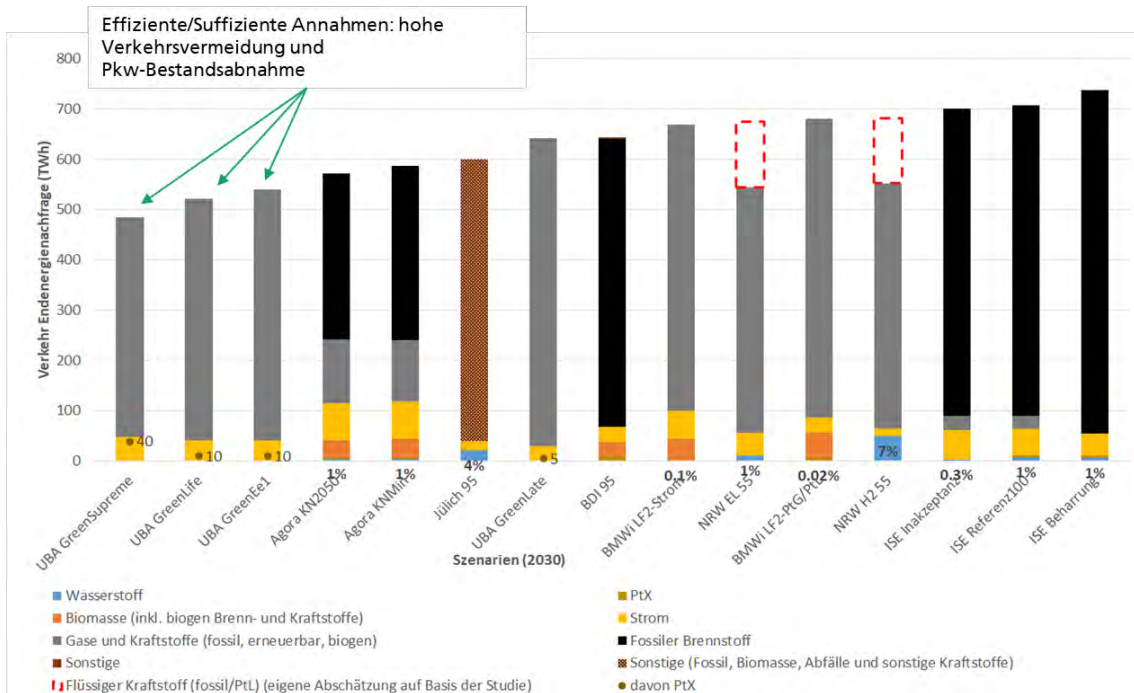


Abbildung 17: Gesamtenergiebedarf im Verkehr 2040

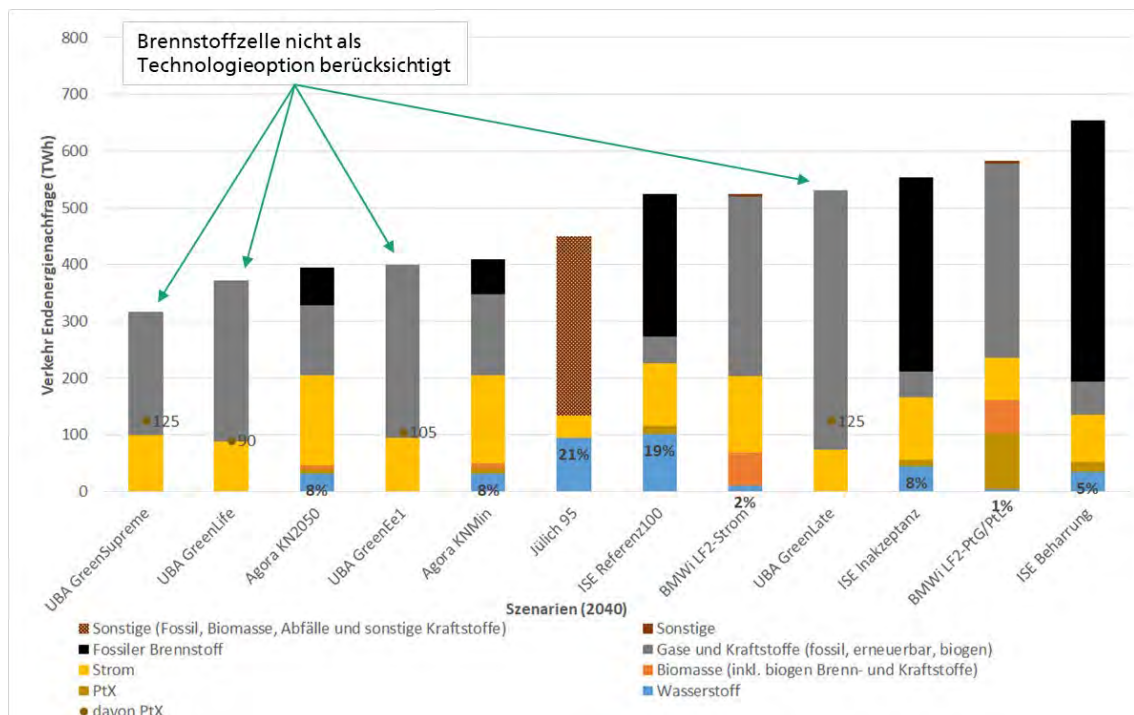
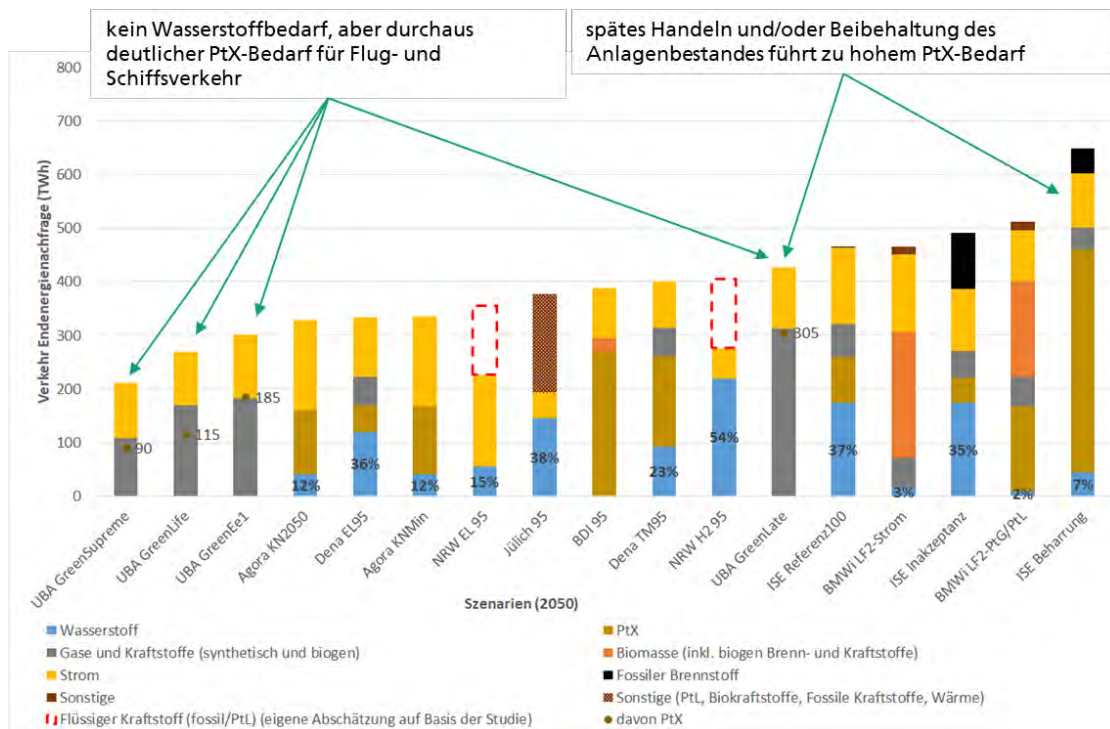


Abbildung 18: Gesamtenergiebedarf im Verkehr 2050



Nicht viele Studien weisen differenziert Daten für die einzelnen Verkehrsträger aus. Die vorhandenen Daten sind in Abbildung 19 bis Abbildung 21 für die Jahre 2030 bis 2050 dargestellt. Übereinstimmend werden im Schiff- und Flugverkehr nur Syntheseprodukte und Biomasse gesehen, mit hohen Anteilen im Jahr 2050. Strom wird im Straßenverkehr fast immer als relevant eingestuft. Wasserstoff wird im Straßenverkehr ebenfalls oft gesehen, aber mit sehr unterschiedlicher Relevanz. Seltener wird Syntheseprodukten eine Bedeutung im Straßenverkehr beigemessen. Höhere Stromanteile gehen mit einem niedrigeren Endenergiebedarf Hand in Hand, was in den Effizienzvorteilen dieser Lösung begründet ist. Gemessen an den Nachfragemengen spielt der Schienenverkehr nur eine stark untergeordnete Rolle.

Abbildung 19: Energiebedarf im Verkehr 2030 differenziert nach Anwendungen

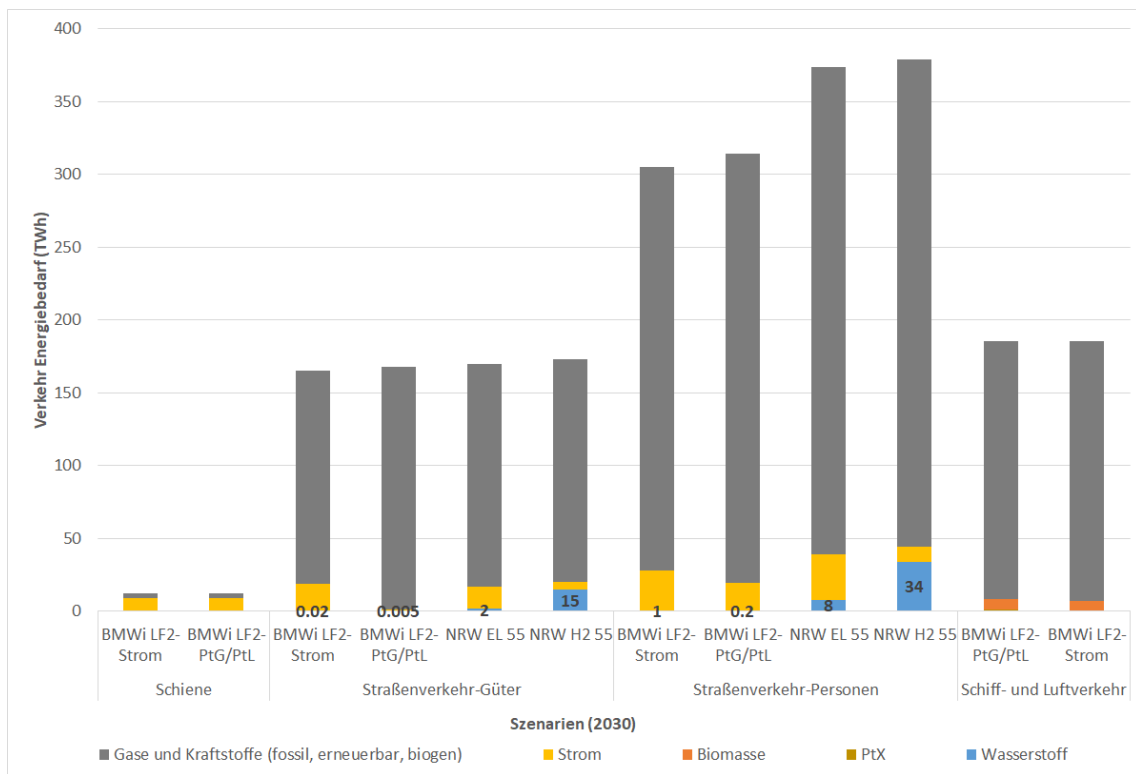


Abbildung 20: Energiebedarf im Verkehr 2040 differenziert nach Anwendungen

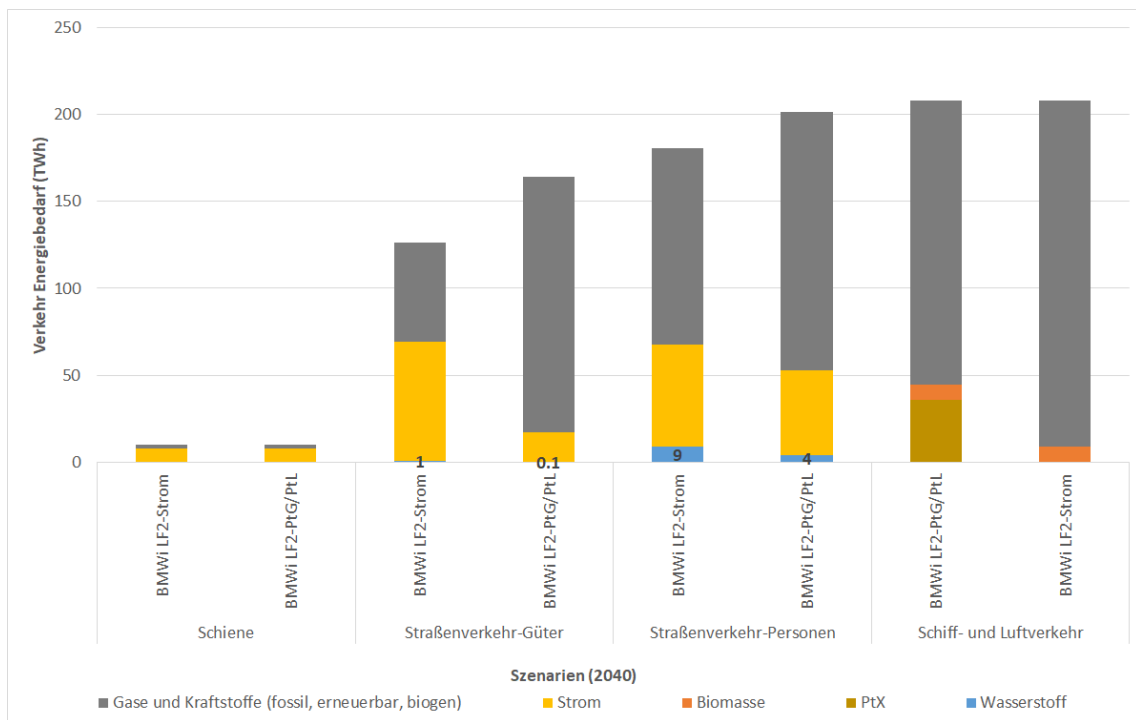
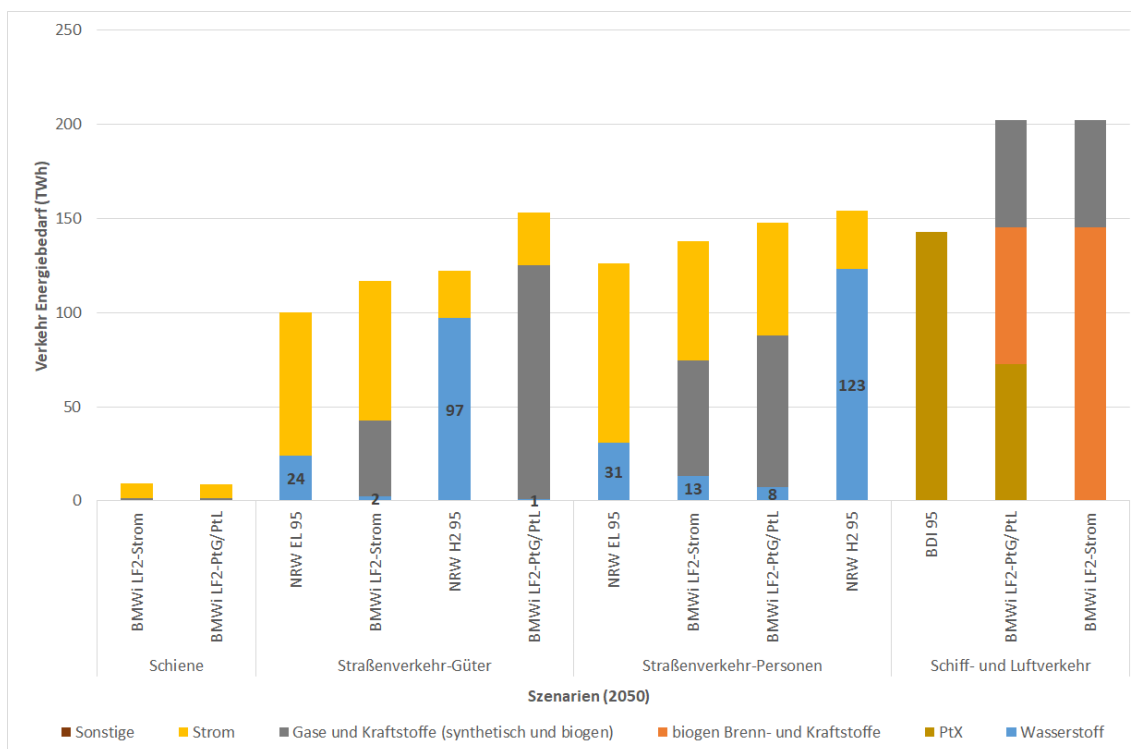


Abbildung 21: Energiebedarf im Verkehr 2050 differenziert nach Anwendungen

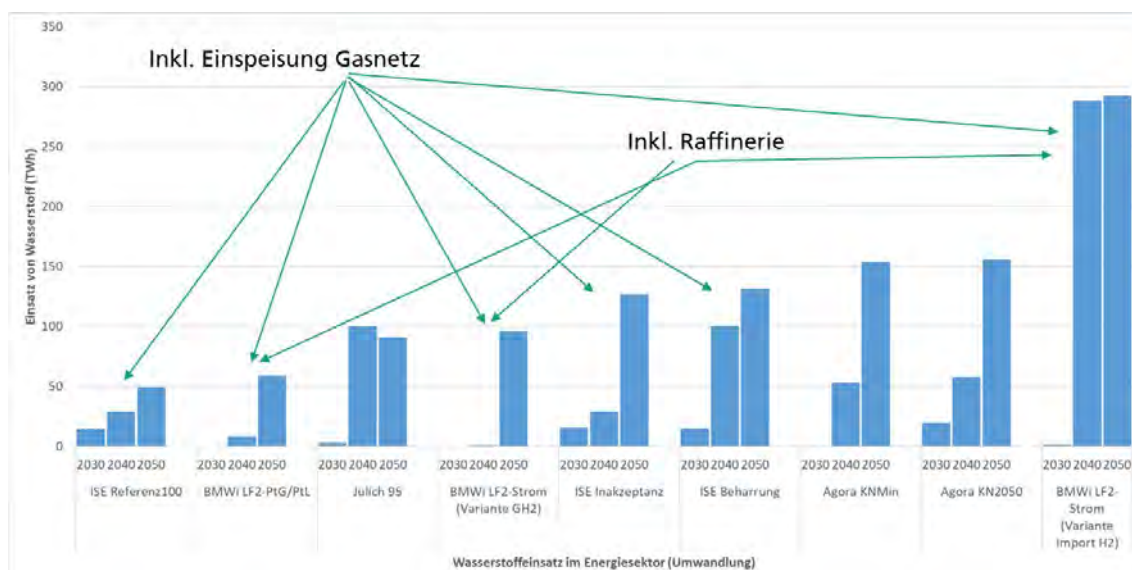


3.3.5 Sektoraler Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf im Umwandlungssektor

Auswertungen für den Umwandlungssektor durchzuführen, ist herausfordernd, da zwischen den Studien deutlich unterschiedliche Abgrenzungen erfolgen. Dies schränkt eine Vergleichbarkeit ein.

Der Bedarf wird deutlich differenziert bewertet, was auch an der unterschiedlichen Abgrenzung liegen kann. Die Ergebnisse für die Jahre 2030, 2040 und 2050 sind in Abbildung 22 dargestellt. Je mehr Direktelektrifizierung in den Nachfragesektoren erfolgt, umso höher ist i.d.R. der Wasserstoffbedarf. Dies ist darin begründet, dass Wasserstoff in diesem Fall eine größere Relevanz als Speichermedium zum Ausgleich der Schwankungen im Stromsystem bekommt.

Die Raffineriekapazität nimmt in allen Szenarien deutlich ab (um bis zu ca. 80 % im Vergleich zu 2015).

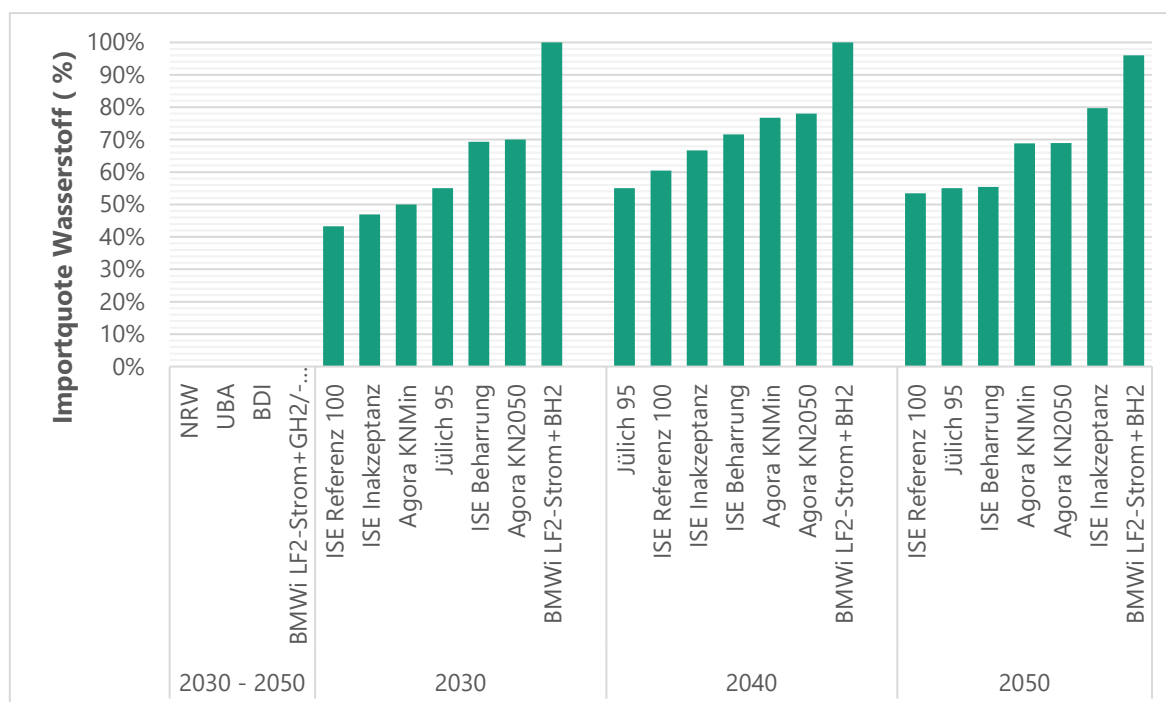
Abbildung 22: Wasserstoffnachfrage im Umwandlungssektor in Deutschland in 2030, 2040 und 2050

Weitere Detailergebnisse für Deutschland finden sich im Anhang A.4.

3.4 Importquoten und nationale Elektrolysekapazitäten

Durch die begrenzten Potentiale für erneuerbare Energien im Inland wird der Import von Energieträgern auch in Zukunft für Deutschland eine wichtige Rolle spielen. Statt fossiler Brennstoffe wie Öl oder Erdgas, werden im Zuge der Defossilisierung jedoch zunehmend Wasserstoff und Syntheseprodukte importiert werden.

In NRW (2019), UBA (2019) sowie BDI (2018) werden keine Wasserstoff-Direktimporte vorgesehen. In den Szenarien dieser Studien wird Wasserstoff nur indirekt als Bestandteil von Syntheseprodukten importiert. Dena (2018) gibt ebenfalls an, dass der Import hauptsächlich auf Syntheseprodukte beschränkt ist, ein genauer Wert ist hier jedoch nicht angegeben. In BMWi (2021) werden für das Nachfrageszenario zwei verschiedene Angebotsszenarien betrachtet, in denen Wasserstoff nicht (LF2-Strom+GH2) bzw. fast ausschließlich (LF2-Strom+BH2) importiert wird. Jülich (2019), ISE (2020) und Agora (2020), welche vom Erscheinungsdatum her die neueren Studien sind, gehen hingegen von signifikanten Wasserstoff-Direktimporten aus. Die Importquoten, also die importierte Menge an Wasserstoff bezogen auf die Gesamtmenge, sind in Abbildung 23 dargestellt. Im Jahr 2030 ergibt sich in den drei Studien eine Bandbreite zwischen 43 % und 70 % Importen für Wasserstoff. Der Anteil der Importe steigt im Jahr 2040 und erreicht seinen Höhepunkt. Hier liegt die Importquote in allen Szenarien der drei genannten Studien über 50 %. Dies gilt auch für das Jahr 2050, in dem die Importquoten jedoch gegenüber 2040 zurückgehen. Die Bandbreite liegt hier zwischen 53 % und 80 %.

Abbildung 23: Importquote Wasserstoff in 2030, 2040 und 2050

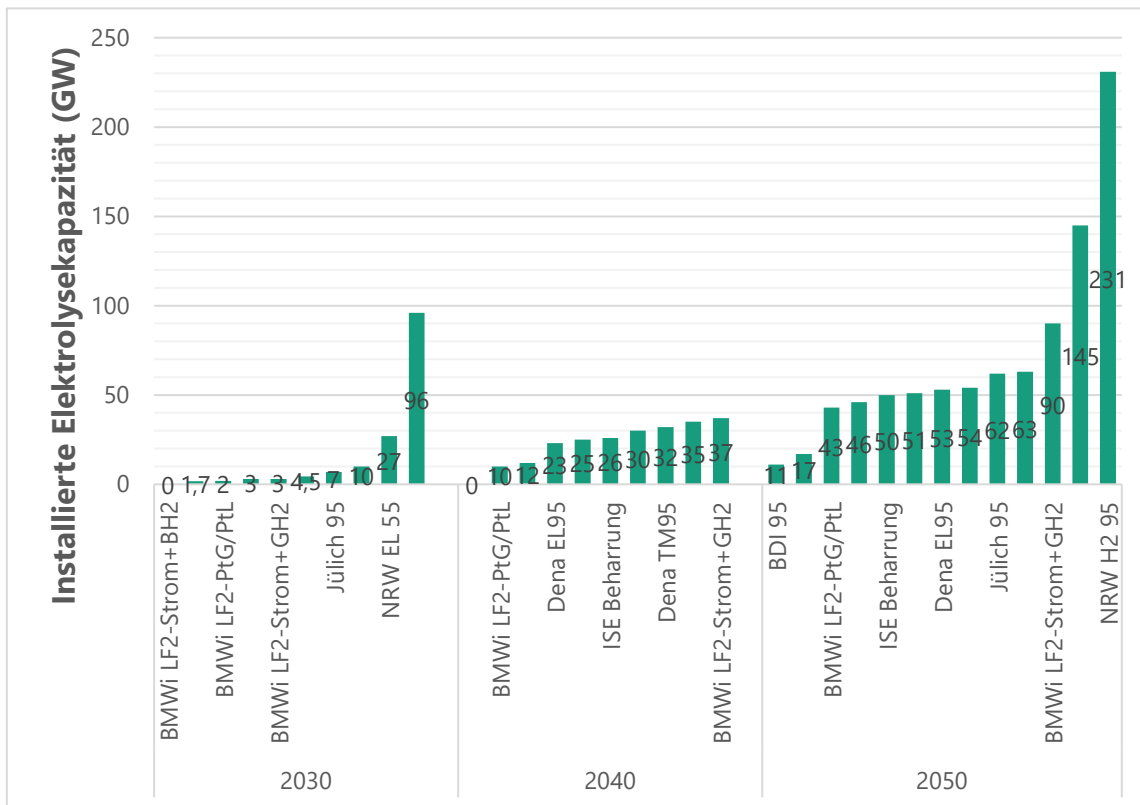
Die Importquote für Syntheseprodukte ist nicht in allen Studien im Detail angegeben. Jedoch lässt sich insgesamt eine deutliche Tendenz zu sehr hohen Importquoten für Syntheseprodukte feststellen. Für UBA (2019), das PtG/PtL-Szenario in BMWi (2021) und Jülich (2019) liegt die Importquote für Syntheseprodukte in 2030 zwischen 90 % und 100 %. In Agora (2020) wurde die Importquote für alle Zwischenjahre exogen auf 100 % gesetzt. Auch dena (2018) und BDI (2018) gehen davon aus, dass Syntheseprodukte hauptsächlich importiert werden, auch wenn sich hier keine konkreten Zahlenwerte angeben lassen. In den Szenarien aus UBA (2019) hingegen entwickelt sich bis 2050 zunehmend auch ein Heimmarkt für Syntheseprodukte, sodass die Bandbreite der Importquote in diesen Szenarien auf 79 % bis 94 % sinkt (siehe Abbildung 54 im Anhang).

In Bezug auf die Herkunftsländer der Wasserstoff- und Syntheseprodukteimporte machen die meisten Studien keine konkreten Angaben. Importe sollen aus Ländern mit besserer Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien erfolgen, die Preise und Transportkosten werden grob allgemein abgeschätzt. In UBA (2019) wird Nordafrika als Beispielregion modelliert. Eine Ausnahme bildet Jülich (2019), indem dort eine vergleichsweise detaillierte Analyse der weltweiten Potentiale und des Transports von Wasserstoff per Pipeline und Flüssiggastanker vorgenommen wird. Als geeignete Wasserstoff-Lieferländer für Deutschland werden hier Irland, das Vereinigte Königreich, Norwegen und Island identifiziert.

Der Wasserstoffbedarf, der nicht über Importe gedeckt wird, muss aus inländischer Produktion erzeugt werden. Die hierfür benötigten Elektrolysekapazitäten sind in Abbildung 24 dargestellt. Für das Jahr 2030 lässt sich eine Bandbreite von 1,7 bis 10 GW angeben, wobei zwei Szenarien über dem 5-GW-Ziel der Nationalen Wasserstoffstrategie liegen. Als Ausreißer kann das Angebotsszenario in BMWi (2021) LF2-Strom+BH2 angesehen werden, welches aufgrund einer Importquote von 100 % keinen Bedarf für inländische Elektrolysekapazität sieht. Zudem werden die NRW-Szenarien als Ausreißer betrachtet, da hier trotz extrem hoher Wasserstoffbedarfe die Importquote exogen auf 0 % gesetzt wurde.

Die benötigten Elektrolysekapazitäten steigen nach 2030 stark an. Für das Jahr 2040 liegen fast alle Studien bereits über dem Ziel der Nationalen Wasserstoffstrategie von mindestens 10 GW. Die Bandbreite liegt zwischen 10 GW und 35 GW. Für 2050 steigt die benötigte Elektrolysekapazität auf 43 GW bis 63 GW an. Auf beiden Seiten des Spektrums sind sowohl jüngere als auch ältere Studien bezogen auf das Erscheinungsjahr vertreten.

Abbildung 24: Installierte Elektrolysekapazität im Land in 2030, 2040 und 2050



4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das Ziel der Studie ist die Erstellung einer vergleichenden Metastudie zur zukünftigen potentiellen Nachfrage von Wasserstoff und auf Wasserstoffbasis basierender Syntheseprodukte bis 2050. Hierzu werden aktuelle Systemstudien im geographischen Raum der Europäischen Union mit Fokus auf Deutschland und einem längerfristigen Zeitraum bis 2050 ausgewertet. Insgesamt werden hierfür acht nationale und vier europäische Studien mit einer Reihe an Szenarien hierfür zu Grunde gelegt.

Die folgenden Schlussfolgerungen basieren auf den Auswertungen der Studien, die eine (stark techno-ökonomische) Systemsicht aus einer Energieperspektive haben und nicht alle Aspekte eines Transformationspfades (z. B. heimische Arbeitsplätze und Wertschöpfung, bestehende Regulierung, beschlossene Fördermaßnahmen etc.) einnehmen. Weiterhin ist zu betonen, dass diese Studien mit Szenarien arbeiten. Szenarien sind keine Vorhersagen der Zukunft. Sie bilden auf mögliche Entwicklungen und techno-ökonomische Pfade unter verschiedenen Annahmen ab. Eine Vielzahl an Unsicherheiten existiert dabei. Weiterhin verfolgen die Szenarien immer bestimmte Zielsetzungen, beispielsweise auch die Auswirkung von extremeren Annahmen, deren Eintrittswahrscheinlichkeit als nicht sehr hoch eingeschätzt werden kann, zu analysieren.

Es ist zusätzlich noch auf die Aktualität zu verweisen. Es wurden zwar nur Studien aufgenommen, die von 2018 oder jüngeren Datums sind, aber unter Berücksichtigung der Bearbeitungs- und Veröffentlichungszeiten ist klar, dass sehr aktuelle Entwicklungen in den Studien nicht abgebildet werden konnten. Es ist zu betonen, dass die für Deutschland analysierten Szenarien alle mindestens eine 95 %-Minderung der Treibhausgase bis 2050 unterstellen. Es sind damit ambitionierte Klimaschutzszenarien, die den aktuellen politischen Zielen folgen.

Als wesentliche, bestimmende Faktoren der Nachfrage nach Wasserstoff und Syntheseprodukten konnten aus der Studienauswertung die folgenden identifiziert werden:

- Das Treibhausgasreduzierungslevel: mit dem Ambitionslevel steigt i.d.R. der Bedarf nach Wasserstoff- und Syntheseprodukten.
- Die Bilanzgrenzen: Stoffliche Nachfrage in der Industrie sowie energetische Nachfrage im internationalen Flug- und Schiffsverkehr werden nicht oder nur teilweise oder vollständig betrachtet. Diese Sektoren haben aber einen hohen Einfluss. Ebenfalls werden i.d.R. graue Emissionen und Vorkettenemissionen nicht mit betrachtet, diese können aber relevant sein.
- Die Nutzung von Carbon Capture and Storage (CCS): In großem Umfang genutzt, mindert es die Nachfrage deutlich. CCS wird aber in wenigen nationalen Studien als relevant angesehen, in den EU-Studien allerdings spielt diese Technologie in einigen Szenarien eine Rolle.
- Nutzung von (nachhaltig nutzbarer) Biomasse: Hohe Mengen mindern die Wasserstoff-Nachfrage. In wenigen Studien wird eine größere Nutzung ausgewiesen. Der mögliche Einfluss auf die Nachfrage ist nicht so groß wie bei CCS.
- Kostenannahmen für die verschiedenen Technologien und Energieträgerpreise.
- Technologieoptionen: Manche Studien/Szenarien schließen gewisse Technologien z. B. aus Akzeptanzgründen aus.

- Zielrichtung der Studien/Szenarien:
 - ist teilweise die bewusste Setzung von extremen Annahmen („Was passiert, wenn“), z. B. extreme Ablehnung neuer Technologien/Ausschluss neuer Technologien, sehr starke Rolle von Energieeffizienz oder Suffizienz, und/oder
 - teilweise durch den Verzicht auf eine ökonomische Optimierung geprägt (stattdessen werden Setzungen vorgenommen).

Aus Sicht der Autor:innen lassen sich hieraus folgende Empfehlungen ableiten: Die mögliche Rolle von CCS als Game Changer sollte aufmerksam beobachtet und weiter analysiert werden. Bei Biomasse sind die zur Verfügung stehenden nachhaltigen Potentiale für Deutschland und deren sektorale Verteilung zu klären.

Weiterhin wird empfohlen, dass man Szenarien mit extremen Annahmen sowie Szenarien, die auf eine ökonomische Optimierung verzichten und stark mit Setzungen arbeiten, bei Berücksichtigung von plausiblen Bandbreiten der Nachfrageentwicklung ausschließen sollte. Dies ist bei den quantitativen Angaben, die im Folgenden aufgeführt sind, bereits berücksichtigt. Die Daten zu den „Ausreißern“ finden sich im Anhang.

Der gesamte Wasserstoff- und Synthesebedarf wird unterschiedlich gesehen. In der Mehrzahl der Studien in größerem Umfang erst bei Treibhausgasminderungszielen von mehr als 80 % und dann stark ansteigend.

In den meisten 95 %-Minderungsszenarien bzw. Treibhausgas-neutralen Szenarien ergibt sich langfristig (bis 2050) ein relevanter Bedarf an Wasserstoff und Syntheseprodukten, mit i.d.R. höheren Syntheseproduktbedarfen. Hieraus lässt sich schließen, dass Wasserstoff- und Syntheseprodukte wichtige Bausteine einer ambitionierten Klimapolitik sind.

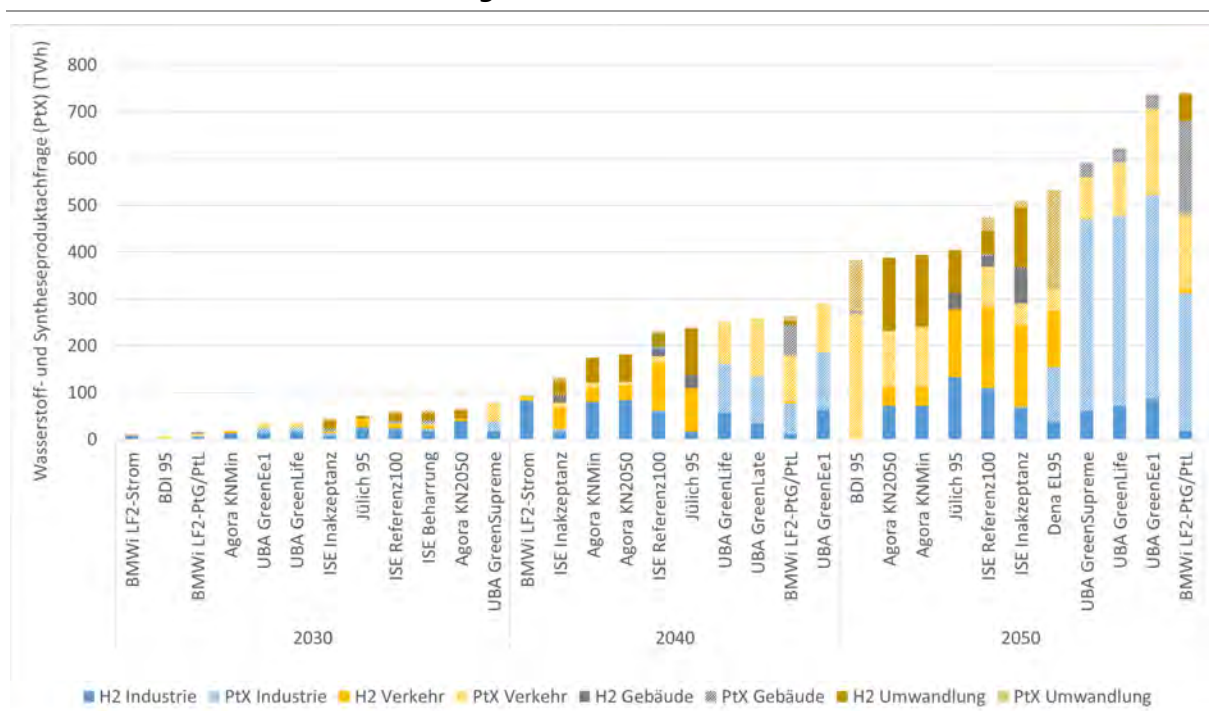
Bei der Herkunft lässt sich festhalten, dass der gemeinsame Bedarf in 2040 und 2050, teilweise schon 2030, nach vielen Studien überwiegend (> 50 %) aus ausländischen Quellen gedeckt wird. Dabei liegt bei Syntheseprodukten die Importquote i.d.R. höher als bei Wasserstoff. Bei Szenarien mit höheren Bedarfen wird i.d.R. ebenfalls eine höhere Importquote gesehen.

Hieraus lässt sich folgern, dass rechtzeitig mit der Entwicklung von Strategien und der Umsetzung gestartet werden sollte. Der Aufbau von entsprechenden Produktions- und Transportkapazitäten ist zeit- und kapitalintensiv. Viele Fragen beim Import von Wasserstoff und Syntheseprodukten von innerhalb und außerhalb der EU erscheinen aus Sicht der Autor:innen dieser Metastudie noch nicht gelöst zu sein.

Im Jahr 2030 kommt der Zeitpunkt, ab dem größere Nachfragemengen erwartet werden. Zu diesem Zeitpunkt liegt die Bandbreite Wasserstoff- und Syntheseprodukte in den Systemstudien/Szenarien zwischen sehr geringer Nachfrage bis 80 TWh (ohne extreme Ausreißer nach oben zu berücksichtigen). In vielen Studien/Szenarien ist er allerdings kleiner als 50 TWh. Damit wird der nationale Wasserstoffbedarf (etwas) niedriger gesehen als in der NWS. Dies kann evtl. auch an unterschiedlichen THG-Minderungsambitionsniveaus liegen. Hier besteht ein Klärungsbedarf.

In 2050 liegt die Bandbreite des Bedarfs für Wasserstoff- und Syntheseprodukte in den Metastudien/-szenarien bei 400 bis knapp 800 TWh (ohne extreme Ausreißer nach unten und oben zu berücksichtigen). In allen Szenarien liegen dabei die Bedarfe an Wasserstoff und Syntheseprodukten deutlich unter den heutigen Bedarfen an fossilen Brenn- und Kraftstoffen (Endenergiebedarf 2020: 2.500 TWh, 2030: 2.100 bis 2.500 TWh, 2050: 1.400 bis 2.100 TWh).

Abbildung 25: Übersicht über Wasserstoff- und Syntheseproduktachfrage (PtX) in den verschiedenen Sektoren (ohne extreme Ausreißer bei den Studien/Szenarien zu berücksichtigen)



Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass Wasserstoff und Syntheseprodukte notwendig für die Energiewende, aber gleichzeitig wertvolle Energieträger sind. Dies wird auch daran ersichtlich, dass die Preise für Wasserstoff und Syntheseprodukte – wenn sie in den Studien ausgewiesen werden – deutlich über denen heutiger konventioneller Energieträger liegen (siehe Werte in Abbildung im Anhang A.1.3).

Im Folgenden werden potentielle Bedarfe in einzelnen Sektoren betrachtet. Dabei erfolgt aus Sicht der Autor:innen eine Bewertung von einzelnen Anwendungen als No-Regret-Option. Das hierfür zugrunde gelegte Verständnis von No-Regret ist: In einer treibhausgasneutralen Welt und unter Berücksichtigung der Beschränktheit von nachhaltiger Biomasse sowie dem Ausschluss von CO₂-Abscheidung und -Speicherung in größerem Umfang wird der Einsatz von Wasserstoff und/oder Syntheseprodukten aufgrund fehlender wirtschaftlicher technologischer Alternativen unter heutigen Gesichtspunkten als unbedingt notwendig angesehen (siehe zur Konkurrenzsituation in den einzelnen Anwendungsbereichen Anhang A.5). Die Wahl als No-Regret-Option wird durch die nationalen und europäischen Studien gestützt, wo in fast allen Studien der Einsatz von Wasserstoff und/oder Syntheseprodukten in diesen Anwendungsbereichen in einer treibhausgasneutralen Welt als notwendig erachtet wird.

Die Einordnung als No-Regret bedeutet allerdings nicht, dass andere Maßnahmen wie Effizienzstrategien, Substitutionsstrategien oder Materialeffizienz in diesen Bereichen nicht auch einen wichtigen Beitrag zur Treibhausgasreduzierung leisten können. Weiterhin können in den Anwendungsfeldern, die hier nicht als No-Regret-Optionen eingeordnet werden, Wasserstoff und/oder Syntheseprodukte künftig auch eine wichtige Rolle spielen. Beispielsweise weil sie wirtschaftlicher sind oder eher akzeptiert werden als Konkurrenzoptionen. Hierbei ist die Bewertung nicht eindeutig, da die ausgewerteten Systemstudien teilweise unterschiedliche Ergebnisse hervorbringen und

darüber hinaus zahlreiche Konkurrenztechnologien existieren, die teilweise als sinnvoller eingestuft werden.

Der Verkehr weist in vielen Studien einen sehr hohen Bedarf auf (2050: 150 bis 300 TWh, ohne extrem Ausreißer nach oben zu berücksichtigen). In 2030 ist die Nachfrage im Verkehr noch gering und wird dann eher bei den Syntheseprodukten gesehen. Dies könnte nach Ansicht der Autor:innen der Metastudie evtl. auf die Notwendigkeit, die THG-Emissionen schnell zu mindern, zurückzuführen sein. Ein unbestritten hoher Bedarf wird im internationalen Flug- und Schiffsverkehr gesehen (Syntheseprodukte, zusammen mit biogenen Kraftstoffen 2050 liegen bei 150 bis 200 TWh, ohne extreme Ausreißer). Dieses Anwendungsfeld wird wegen fehlender Alternativen von den Autor:innen dieser Metastudie als No-Regret-Strategie eingeordnet. Mittel- und langfristig sollten deshalb Syntheseprodukte im ausreichenden Maße im internationalen Flug- und Schiffsverkehr zur Verfügung gestellt werden. Damit dies gelingen kann, sollte man die Weichen dafür frühzeitig stellen, und es sollten Anreizsysteme für einen marktbasieren Hochlauf eingeführt werden.

Zunehmend wird in einem Teil der Studien eine größere Rolle von Wasserstoff im Schwerlastverkehr gesehen, auch schon kurzfristig (2030). Somit wird hier eine recht hohe Wahrscheinlichkeit für den Wasserstoffeinsatz gesehen. Allerdings existiert eine Konkurrenzsituation mit der Direktstromnutzung durch Oberleitungs-Lkw und/oder Batterie-Lkw.

Nach der Auffassung der Autor:innen sollten aufgrund der hohen Relevanz an Treibhausgasemissionen Lösungen für den Schwerlastverkehr eher kurzfristig gefunden werden. In den nächsten drei bis vier Jahren sollte entschieden werden, welche der alternativen Lösungen dafür umgesetzt werden sollen, weil u. a. der Infrastrukturaufbau Zeit benötigt, und dann ambitioniert in die Umsetzung gestartet werden.

Bei PKW und leichten Lkw ist eine starke Spreizung in den Studienergebnissen bezüglich der Relevanz von Wasserstoff zu erkennen. Wenn Studien hier einen Wasserstoffeinsatz sehen, dann erst nach 2030 in größerem Umfang. In älteren Studien wurde dies oft noch positiver eingeschätzt.

Aus Sicht der Autor:innen ist die Marktsituation nicht eindeutig zu bewerten. Falls Wasserstoff im Verlauf jedoch an Relevanz gewinnen wird, dann ist eher mit einer mittelfristigen Einführung (nach 2030) zu rechnen. Allerdings gibt es in wichtigen Exportländern der Automobilindustrie teilweise ambitioniertere Markteinführungsszenarien, die in Strategieüberlegungen einfließen sollten.

Der potentielle Bedarf an Wasserstoff und Syntheseprodukten in der Industrie wird ebenfalls in den meisten Studien als hoch eingeschätzt (in 2050 Wasserstoff, Syntheseprodukte und biogene Brennstoffe bis zu 500 TWh). In vielen Studien wird bereits 2030 ein vergleichsweise relevanter H₂-Bedarf von bis zu knapp 50 TWh gesehen. Hier siehe somit viele Studien den ersten größeren Markt.

Die Einsatzbereiche, die in nahezu allen Studien von Relevanz sind, und deshalb von den Autor:innen als No-Regret-Strategie eingeordnet werden:

- Wasserstoff-Direktreduktion von Eisenerz zur Herstellung von Stahl
- Ammoniaksynthese
- Ethylen (meist über Methanol-to-Olefins-Route).

Hieraus ist nach Ansicht der Autor:innen ableitbar, dass die stoffliche Nutzung gerade in den treibhausgasintensiven Industriesektoren in den nächsten Jahren weiter vorangebracht werden, damit sie mittel- und langfristig großflächig umgesetzt werden kann; dies hängt auch mit den langen Investitionszyklen in den entsprechenden Industriebranchen zusammen. Eine Umsetzung erster Projekte sollte erfolgen, und Anreizsysteme für einen marktbasieren Hochlauf sollten eingeführt werden.

Die energetische Nutzung in der Industrie wird in den Studien/Szenarien deutlich unterschiedlich bewertet und teilweise als weniger relevant angesehen. Dies liegt u. a. an der bestehenden Konkurrenz zum Stromeinsatz, gerade bei niedrigen und mittleren Temperaturniveaus. Bei der energetischen Nutzung gerade im höheren Temperaturbereich herrscht noch eine unklare Situation, welche Alternativen hier vielversprechend sind. Hier sollte aus der Perspektive der Autor:innen in den nächsten Jahren eine Klarheit geschaffen werden. Einzelne Demo-/Pilotprojekte für Nutzung von Wasserstoff und Syntheseprodukten sollten umgesetzt werden.

Die Gebäudewärme weist in manchen der Studien einen relevanten potentiellen Bedarf auf, allerdings mit großen Schwankungsbreiten (bis 2050 bei Wasserstoff, Syntheseprodukten und biogenen Brennstoffen mit bis zu 200 TWh). Dies liegt teilweise daran, dass in manchen Studien Setzungen bei der Nachfrage erfolgen. Hier herrscht ein Konkurrenzdruck, z. B. verursacht aus der Kombination von Energieeinsparmaßnahmen und Wärmepumpen oder Wärmenetzen. Ein möglicher Bedarf wird in den Studien auch eher auf der längerfristigen Zeitschiene gesehen, nach 2030. In manchen Studien wird er auch auf erst nach 2040 verortet. Hier besteht noch ein größerer Klärungsbedarf (Diskussion über Anwendungen hier haben erst begonnen), aber zeitlich existiert nach Ansicht der Autor:innen kein großer Druck. Es sei denn in Fällen, in denen höhere Investitionen für relevante Infrastrukturen kurzfristig anstehen.

Ob eine Mischlösung von Wärmepumpen/Wärmenetzen/Wärmedämmung einerseits und Gasen andererseits sinnvoll sind, ist wegen der Notwendigkeit paralleler Infrastrukturen nach Autor:innenmeinung noch zu klären.

Im Umwandlungssektor (Strom- und Wärmeerzeugung, Raffinerien) wird in den meisten Studien im Vergleich zum Verkehr und der Industrie ein eher etwas geringerer Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf ausgewiesen. Im Jahr 2050 liegt dieser zwischen 50 und 150 TWh.

Bei der Stromerzeugung spielt das Thema der Rückverstromung eine wichtige Rolle. Hier entsteht zunehmend ein Konsens, dass die Spitzenlastabdeckung langfristig über Wasserstoff erfolgt, aber i.d.R. wird kein oder nur ein geringerer Zubau bis 2030 (bis zu 20 TWh) in den Studien/Szenarien identifiziert. Deshalb wird dieser Bereich als No-Regret eingeordnet. Wasserstoff-KWK-Anlagen werden immer dann relevant, wenn die Wasserstoffkosten günstig werden. Weiterhin lässt sich festhalten, dass in Szenarien mit hoher Direktelektrifizierung i.d.R. mehr Wasserstoff im Stromsektor in den Studien/Szenarien ausgewiesen werden. Bei einer stärkeren Direktelektrifizierung benötigt man mehr Flexibilitätsmaßnahmen im Umwandlungssektor. Eine Umsetzung im größeren Maßstab erscheint auf der Basis der Studien- und Szenarienauswertung aber erst nach 2030 erforderlich zu sein. Es ergibt nach Autor:innenmeinung jedoch Sinn, heute schon Anreize für H₂-Readiness bei neu zu errichtenden Anlagen zu prüfen, um für die Zukunft entsprechend vorbereitet zu sein.

Die künftige Rolle der Raffinerien wird in den meisten Studien nicht genauer beschrieben, wahrscheinlich, weil die modellhafte Abbildung und Bewertung herausfordernd ist. Auch stellt sich hier die Frage, wie bei einem künftigen prognostizierten Rückgang der Raffineriekapazitäten aufgrund des Rückgangs an konventionellen Brenn- und Kraftstoffen andere wichtige Raffinerieprodukte für den nichtenergetischen Verbrauch bereitgestellt werden können. Allerdings bietet sich der frühe Einsatz von Elektrolysewasserstoff zum Ersatz des heutigen fossilen Wasserstoffs bei Raffinerien an. Er wird deshalb von den Autor:innen als No-Regret-Strategie bewertet. Die längerfristige Perspektive von Raffinerien in einer treibhausgasneutralen Welt ist noch zu klären. Bestimmte konventionelle Raffinerieprodukte wie Benzin oder Diesel werden künftig wahrscheinlich weniger nachgefragt werden, andere Produkte werden noch benötigt. Aber es handelt sich um komplexe Produktionssysteme mit Kuppelprodukten, sodass der Transformationspfad herausfordernd ist.

Zentrale Parameter für die kostengünstige Produktion grünen Wasserstoffs sind die Verfügbarkeit und die Kosten von regenerativ erzeugtem Strom, die Investitionen für die Elektrolyseure, deren Volllaststunden und kostengünstige Transportoptionen bzw. Infrastrukturen. Künftig wird man in einem relevanten Umfang Elektrolyseurkapazitäten benötigen. Um den künftigen potentiellen Bedarf nach Wasserstoff und Syntheseprodukten zu decken, sollte nach Meinung der Autor:innen die Elektrolysetechnologie deshalb weiter in den Markt gebracht werden. An inländische Installationskapazitäten wird in den meisten Studien/Szenarien bis 2030 eine Kapazität von < 5 GW gesehen und damit niedriger als der Wert in der NWS. Die Bandbreite 2040 beträgt 10 bis 35 GW, womit fast alle Studien damit über dem Ziel der NWS von 10 GW liegen. In 2050 wird eine mögliche Bandbreite von 43 bis 63 GW in den Studien/Szenarien gesehen. Hierbei sollte beachtet werden, dass Planung und Bau von derartigen Anlagen einen ausreichenden relevanten zeitlichen Vorlauf benötigen

Bei Syntheseprodukten kommen kostengünstige Investitionen in die weiteren Umwandlungsanlagen sowie Kosten für CO₂ (Gewinnung, Transport) hinzu. CO₂-Quellen sind deshalb notwendig und es sollte nach Ansicht der Autor:innen Technologien zur CO₂-Gewinnung weiterentwickelt und in den Markt gebracht werden (Bewertung: No-Regret-Strategie).

Wenn auch in den Studien nicht im Fokus, lässt sich aus Autor:innensicht aus den Wasserstoffbedarfen und den Importanteilen (aus anderen europäischen Ländern) ableiten, dass der Aufbau eines europäischen Wasserstoffnetzes (neues Netz, Nutzung bestehender Gasnetzinfrastrukturen) Sinn ergibt (Bewertung: No-Regret-Strategie). Da der Aufbau eines Wasserstoffpipelinenetzes sehr zeit- und kapitalintensiv ist, sollte zeitnah in die Planung und Umsetzung eingestiegen werden.

Die Frage alternativer Erzeugungspfade auf fossiler Basis durch Dampfreformierung bzw. Pyrolyse von Erdgas zu blauem und türkisfarbenem Wasserstoff wird in den Systemstudien kaum behandelt und man findet hierzu deshalb kaum Aussagen. Sie könnten aus der Perspektive der Autor:innen aber künftig durchaus eine relevante Rolle spielen, weil nach jetzigem Kenntnisstand zumindest der blaue Wasserstoff relevant günstiger sein könnte als der grüne Wasserstoff. Allerdings sind hier noch einige Fragen offen, z. B. nach der Akzeptanz einer solchen Lösung oder den Vorkettenemissionen. Deren potentielle Rolle sollte deshalb nach Autor:innenmeinung vertiefend analysiert werden. Dies sollte eher kurzfristig erfolgen, da sie evtl. nur als Übergangslösung, u. a. wegen Fragen der Vorkettenemissionen in einer treibhausgasneutralen Welt und der möglichen Begrenztheit der CO₂-Speicherpotentiale, in Betracht kommen könnten.

Zum Schluss soll noch die Rolle von Wasserstoff- und Syntheseprodukten generell als Klimaschutzmaßnahme aus der Perspektive der Autor:innen eingeordnet werden. Bezogen auf die Höhe des Beitrags zur THG-Minderung sowie der zeitlichen Einordnung lassen sich folgende Governance-Strukturen der Transformation des Energiesystems über ein hierarchisches Prinzip in vier Stufen formulieren (aber natürlich unter ökonomischer Optimierung):

- Oberste Priorität des „Energy-Efficiency-First“-Prinzips zur Minimierung der Nachfrage, ergänzt um Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz.
- Dekarbonisierung des Stromsektors, im Wesentlichen getrieben durch erneuerbare Energien.
- Direkte elektrische Nutzung und Einsatz von Biomasse unter Berücksichtigung ihrer begrenzten Verfügbarkeit und Nachhaltigkeitskriterien.
- Nutzung von Wasserstoff und Syntheseprodukten insbesondere in den Bereichen, in denen die Umsetzung der anderen drei Minderungsstrategien nicht möglich oder ökonomisch nicht sinnvoll oder aus Akzeptanzgründen nicht durchsetzbar ist.

A.1 Anhang

A.1.1 Studien-Übersicht

Tabelle 4: Übersicht der EU-Studien









Ebene	Kürzel	Studien
EU 	EC 2020	COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT – IMPACT ASSESSMENT
	JRC 2020	Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050
	EC 2019	Industrial Innovation – Pathways to deep decarbonisation of industry Part 2
	EC 2018	A Clean Planet for all

Tabelle 5: Übersicht der nationalen Studien

Ebene	Kürzel	Studien	
National 	BDI 2018	Klimapfade für Deutschland	
	dena 2018	dena Leitstudie – Integrierte Energiewende	
		Agora 2020	Klimaneutrales Deutschland
		UBA 2019	Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität
		BMWi 2021	Leitstudie – Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren
		ISE 2020	Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die Deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen
		Jülich 2019	WEGE FÜR DIE ENERGIEWENDE – Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategie
		NRW 2019	Wasserstoff Nordrhein-Westfalen

Notiz:

zusätzlich Aussagen aus den Metastudien „Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe“ (BMU, 2020)

A.1.2 EU-Studien – Studienprofile

Abbildung 26: Studienprofil: COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT – IMPACT ASSESSMENT (EC, 2020)

Verfasser:	European Commission
Auftraggeber:	-
Erscheinungsjahr:	2020
Zeitraum: bis 2050	(THG-)Minderungsziel: 50 % und 55 % (2030); 100 % (2050)
Schwerpunktregionen:	
<input checked="" type="checkbox"/> EU	<input type="checkbox"/> National
Methodik:	
<ul style="list-style-type: none"> Das Modellset PRIMES-GAINS-GLOBIOM: Energie- und Industrieemissionen werden mit dem PRIMES-Modell bewertet, einschließlich des PRIMES-TREMOVE-Modells, um weitere Einzelheiten zum Verkehrssektor zu erhalten. Die Nicht-CO₂-Emissionen (CH₄, N₂O und F-Gase) der Sektoren Abfall, Energie, Landwirtschaft und Industrie werden mit dem GAINS-Modell bewertet. Landnutzungsemissionen und -entfernungen werden mit dem GLOBIOM-Modell bewertet. 	
Szenarienbeschreibung:	
<ul style="list-style-type: none"> REG: Klimaneutralität 2050, THG-Reduktion 55 % bis 2030 mit Fokus auf politischen Maßnahmen CPRICE: Klimaneutralität 2050, THG-Reduktion 55 % bis 2030 mit Fokus CO₂-Bepreisung MIX: Klimaneutralität 2050, THG-Reduktion 55 % bis 2030 mit Fokus auf politischen Maßnahmen zusammen mit CO₂-Bepreisung ALLBNK: Klimaneutralität 2050, THG-Reduktion 55 % bis 2030 inkl. alle Bunker (auch außerhalb EU) 	

EN EN

Abbildung 27: Studienprofil: Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050 (JRC, 2020)


Verfasser:	Joint Research Center
Auftraggeber:	European Commission
Erscheinungsjahr:	2020
Zeitraum: bis 2050	(THG-)Minderungsziel: 90 % - 100 % (2050)
Schwerpunktregionen:	
<input checked="" type="checkbox"/> EU	<input type="checkbox"/> National
Methodik:	
<ul style="list-style-type: none"> Die Studie ist eine Metastudie und umfasst die Auswertung von 8 Studien mit insgesamt 16 Szenarien, die alle das Ziel der Treibhausgasneutralität haben. 	
Untersuchte Studien, u. a.:	
<ul style="list-style-type: none"> Eurelectric (2018). Decarbonisation pathways: Full study results. Szenarien: Eurelectric 90, Eurelectric 95 ECF - European Climate Foundation (2018). Net Zero by 2050: From Whether to How. Szenarien: ECF Technology, ECF Demand-focus, ECF Shared effort IEA - International Energy Agency (2017). Energy Technology Perspectives 2017 Catalysing Energy Technology Transformations. Szenario: IEA B2DS JRC (2018) Global Energy and Climate Outlook 2018: Sectoral mitigation options towards a low-emissions economy - Global context to the EU strategy for long-term greenhouse gas emissions reduction. Szenario: JRC 1.5C 	

Abbildung 28: Studienprofil: In-Depth Analysis in Support of the COMMISSION COMMUNICATION COM(2018) 773 – A Clean Planet for all – A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy (EC, 2018) – Übersicht (oben) und Methodik (unten)

<p>Verfasser: European Commission</p> <p>Auftraggeber: -</p> <p>Erscheinungsjahr: 2018</p>	
<p>Zeitraum: 2010-2050 (THG-)Minderungsziel: 95 % und 100 %</p>	
<p>Schwerpunktregionen:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EU <input type="checkbox"/> National</p>	
<p>Methodik:</p> <p>➢ Das PRIMES-Modell simuliert das europäische Energiesystem und die europäischen Märkte und liefert detaillierte Energiebilanzen, CO₂-Emissionen, Investitionen in Angebot und Nachfrage, Durchdringung der Energietechnologie, Preise und Kosten</p>	
<p>Szenarienbeschreibung:</p> <p>➢ 1.5TECH: Klimaneutralität 2050, alle Technologieoptionen; THG-Reduktion bis 2050 100 %.</p> <p>➢ 1.5LIFE: Klimaneutralität 2050, alle Technologieoptionen und Fokus Kreislaufwirtschaft; THG-Reduktion bis 2050 100 % (95 % exkl. LULUCF Senkung).</p>	

<p>Modellname und Institutionen</p> <p>➢ PRIMES-GAINS-GLOBIOM Modell für das gesamte Energiesystem (GHG-Emissionen aus allen Sektoren), Partielles Gleichgewichtsmodell mit der Annahme eines Gleichgewichtes unter den EU-Mitgliedstaaten, agentenbasiert mit verlinkten Untermodellen (E3M Lab)</p> <p>➢ FORECAST (ISI) – Simulationsmodell für den Industriesektor</p> <p>Wichtige Elemente von PRIMES</p> <p>➢ Partielles Gleichgewichtsmodell für Energie</p> <p>➢ Interne Investitionsentscheidung in allen Sektoren</p> <p>➢ Mikroökonomische Entscheidungen in einzelnen Sektoragenten</p> <p>➢ Preismechanismus ist zentrales Element zum Ausgleich von Angebots- und Nachfragefunktionen (integrierte Nachfrageprognosen)</p> <p>➢ Politische Entscheidungen zur Senkung der Emissionen sind teilweise mitabgebildet</p> <p>➢ Abbildung von 35 europäischen Ländern</p> <p>Grenzen des Modells</p> <p>➢ Nationale Annahmen in einzelnen Sektoren sowie Entscheidungsgrundlage schwer einsichtig.</p> <p>➢ Betrieb und stündliche Abbildung nur bedingt gegeben. Technische Abbildung nur bedingt.</p> <p>➢ Politische Rahmenbedingungen sind nicht komplett implementiert, nur teilweise</p> <p>➢ Wenig Infrastruktur und räumliche Abbildung</p> <p>➢ Kein Optimierungsmodell</p> <p>➢ 5 Jahresschritte von 1990 bis 2050</p> <p>Art der Szenarien:</p> <p>➢ Normativ gesetzt</p>	
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Abbildung 29: Studienprofil: Industrial Innovation – Pathways to deep decarbonisation of industry Part 2 (EC, 2019)

<p>Verfasser: ICF / Fraunhofer ISI</p> <p>Auftraggeber: European Commission, DG Climate Action</p> <p>Erscheinungsjahr: 2019</p>	
<p>Zeitraum: 2015 – 2050 (THG-)Minderungsziel: 80-95 %</p>	
<p>Schwerpunktregionen:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EU <input type="checkbox"/> National</p>	
<p>Methodik:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Detaillierte, branchenspezifische Bottom-up-Modellierung der europäischen energieintensiven Industrie bis 2030/2040/2050, wirtschaftliche Optimierung ➤ Branchen: Stahl, Chemie, Zement, Papier etc. 	
<p>Szenarienbeschreibung:</p> <p>8 Szenarien, die verschiedene Lösungsräume aufzeigen ("Wenn-Dann")</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Referenzszenario: Fokus auf existierende Technologien, langsamer technologischer Fortschritt ➤ Fokus auf Carbon Capture and Storage ➤ Fokus auf Clean Gas (erneuerbarer Wasserstoff, synthetisches Methan) ➤ Fokus auf Bioökonomie und Kreislaufwirtschaft ➤ Fokus auf direkte Elektrifizierung ➤ Fokus auf Energieeffizienz (bestverfügbare Technik) ➤ 2 Mischszenarien (80 % / 95 %) - Mix aus vorangestellten Lösungsoptionen - Technologieoffen 	

A.1.3 Nationale Studien – Studienprofile

Abbildung 30: Studienprofil: Klimapfade für Deutschland (BDI, 2018) – Übersicht (oben) und Methodik (unten)



<p>Verfasser: The Boston Consulting Group (BCG), Prognos Auftraggeber: Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. Erscheinungsjahr: 2018</p>	
<p>Zeitraum: 2015 – 2050 (THG-)Minderungsziel: 80 und 95 % (normativ)</p>	
<p>Schwerpunktregionen: <input type="checkbox"/> EU <input checked="" type="checkbox"/> National</p>	
<p>Methodik:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Sektormodell & Stromsystemoptimierung ➢ Bottom-up kostenbezogene Optimierung nach gesamtwirtschaftlichen Kriterien (Ausgaben) ➢ THG-Senkung zu minimalen Kosten: reiner Kostenansatz, keine Berücksichtigung weiterer Kriterien ➢ Breite Industriebeteiligung 	
<p>Szenarienbeschreibung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Referenzpfad (RS): Derzeitige Anstrengungen (Maßnahmenumsetzung, politische und regulatorische Rahmenbedingungen und Technologieentwicklung) werden fortgesetzt ➢ 80 %-Pfad (KS80): THG-Reduzierung bis 2050, gegenüber dem Referenzjahr 1990, um 80 % ➢ 95 %-Pfad (KS95): THG-Reduzierung bis 2050, gegenüber dem Referenzjahr 1990, um 95 % 	
<p>Modellname und Institutionen</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Sektorale Bottom-up-Modelle für die Energienachfrage sowie kraftwerksscharfes europäisches Strommarktmodell und das makroökonomische Modellsystem von Prognos ➢ Sektormodelle werden nur über das Strommodell zusammengeführt, keine Interaktion zwischen den Sektoren möglich <p>Zielstellung der Modelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ THG-Senkung zu minimalen Kosten: reiner Kostenansatz, keine Berücksichtigung weiterer Kriterien <p>Wichtige Elemente des Modells</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ In den Klimapfaden werden nur Technologien berücksichtigt, die aus heutiger Sicht bis 2050 einsatzreif und in ihrer Wirkung quantifizierbar sind ➢ Energieeffizienz nimmt zentrale Stellung ein <p>Grenzen des Modells</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Deutschland, EU-Strommarkt, kein Stromnetz abgebildet ➢ Abbildung von Stützjahren ➢ Kein Gesamtsystemoptimum <p>Wichtig für die Ergebnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> Ø Energieeffizienz, Elektrifizierung und CCS sind wichtige Bestandteile Ø Bestehende politische Rahmenbedingungen werden nicht berücksichtigt Ø Moderater CO₂-Preis wird vorgegeben 	

Abbildung 31: Studienprofil: dena-Leitstudie – Integrierte Energiewende (dena, 2018) – Übersicht (oben) und Methodik (unten)


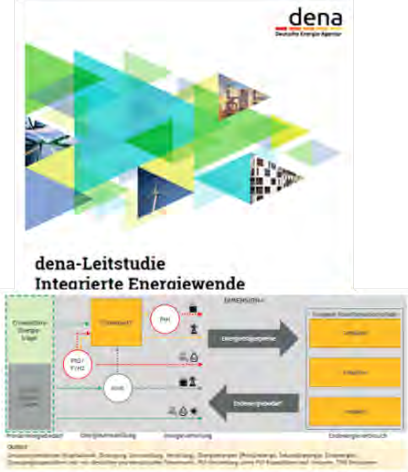
<p>Verfasser: Deutsche Energie-Agentur</p> <p>Auftraggeber: -</p> <p>Erscheinungsjahr: 2018</p> <hr/> <p>Zeitraum: 2010 – 2050 (THG-)Minderungsziel: 80 und 95 % (normativ)</p> <p>Schwerpunktregionen:</p> <p><input type="checkbox"/> EU <input checked="" type="checkbox"/> National</p> <p>Methodik:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Expertenschätzung und Energiemodell ➤ Keine Optimierung, sondern Szenarien- und Technologiesetzung aus Stakeholderprozess <p>Art der Szenarien:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Referenzpfad: Fortschreibung historischer Trends sowie aktueller Politik- und Technologieentwicklungen ➤ Elektrifizierungsszenario: breite Elektrifizierung in allen Sektoren; THG-Reduktion bis 2050 um 80 % / 95 % ➤ Technologiemix-Szenario: Variation an eingesetzten Technologien, THG-Reduktion bis 2050 um 80 % / 95 % 	
<p>Modellname und Institutionen</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Modell DIMENSION: nur für den Strommarkt (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH) <p>Zielstellung der Modelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Keine Optimierung, sondern Szenarien- und Technologiesetzung aus Stakeholderprozess ➤ Die Entwicklung der Transformationspfade erfolgte explorativ und ohne Berücksichtigung der damit verbundenen Kosten. ➤ Die exogenen Endenergiebedarfe der Verbrauchssektoren Gebäude, Industrie und Verkehr gehen in das Gesamtenergiesystemmodell DIMENSION+, kein Gesamtsystemoptimum <p>Wichtige Elemente der Modellierung</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Expertenschätzung und Setzungen in jedem Sektor ➤ Erst Endenergiesektoren mit Setzungen <p>Grenzen des Modells</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Deutschland ➤ Kosten und Technologien in der Industrie nicht realistisch abschätzbar ➤ Nachgelagerte Netzbetrachtung ➤ Abbildung von Stützjahren <p>Wichtig für die Ergebnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Import von PTL/PTG als Lösung da keine anderen Technologieoptionen von Experten denkbar/machbar ➤ CCS nur für Industrie (16 Mt im Jahr 2050) 	

Abbildung 32: Studienprofil: Leitstudie – Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung der nachhaltigen Entwicklung sowie regionaler Aspekte – Übersicht (oben) und Methodik (unten) (BMW, 2021)

<p>Verfasser: Fraunhofer ISI, Consentec, Ifeu, TU Wien, M-FIVE Auftraggeber: Bundeswirtschaftsministerium Erscheinungsjahr: 2021 (noch nicht veröffentlicht)</p>	
<p>Zeitraum: 2015 – 2050 (THG-)Minderungsziel: 80 und 95 % (Restemissionen Landwirtschaft und Abfall)</p>	
<p>Schwerpunktregionen: <input type="checkbox"/> EU <input checked="" type="checkbox"/> National</p>	
<p>Methodik:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Kombination von mehreren sektoralen Bottom-up-Simulationsmodellen auf der Nachfrageseite mit einem europäischen System-Optimiermodell auf der Angebotsseite, das mit detaillierten Stromnetzmodellen gekoppelt ist ➢ Analyse von Szenarienvariationen, um aus dem Vergleich Rückschlüsse auf bestimmten Fragen zu ziehen 	
<p>Art der Szenarien:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Referenzszenario: Fortschreibung historischer Trends sowie aktueller Politik- und Technologieentwicklungen ➢ Basisszenario: THG-Reduktion bis 2050 um 80 % ➢ Diversere Varianten, um bestimmte Fragen zu betrachten (geringer Netzausbau, mehr Wind offshore etc.) ➢ Drei 95 %-Szenarien: "Fokus Strom und grüner H₂", "Fokus Strom und H₂-Import" und "Fokus PtG/PtL" 	

<p>Modellname und Institutionen</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Sektormodelle: Forecast, INVERT, ASTRA, eLoad, Enertile, Lastflusssimulation, Verteilnetzmodelle, Strategische Umweltverträglichkeitsprüfung ➢ Fraunhofer ISI, Consentec, Ifeu, TU Wien, M-Five, TEP 	
<p>Zielstellung der Modelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Erkenntnisgewinn aus dem Vergleich unterschiedlicher plausibler Transformationspfade ➢ Nachfrageseitig Verknüpfung von Sektormodellen (detaillierte, sektorale Bottom-up-Simulationsmodelle mit Abweichungen vom volkswirtschaftlichen Optimum) ➢ Zentrale Stellung des Strommarktmodells Enertile in Kopplung mit Stromnetzmodellen zur Zusammenführung 	
<p>Wichtige Elemente der Modelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Nachfrage über Sektormodelle simuliert ➢ Rückkopplung über Energieträgerpreise und Iteration des CO₂-Preises zur Zielerreichung ➢ In 95 %-Szenarien eher normative Vorgaben entsprechend Gesamtstrategie des Pfads ➢ Detaillierte Netz- und Kraftwerkseinsatzrechnung 	
<p>Grenzen des Modells</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Kein geschlossenes gesamtsystemisches Optimum, sondern iterativer Prozess ➢ Abbildung von Stützjahren 2020, 2030, 2040, 2050 ➢ Enertile für EU+MENA, sonst Deutschland 	
<p>Wichtig für die Ergebnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Erheblicher Einfluss des europäischen Stromsystems, Einfluss der detaillierten Sektorenmodelle 	

Abbildung 33: Studienprofil: Klimaneutrales Deutschland (Agora, 2020) – Übersicht (oben) und Methodik (unten)




<p>Verfasser: Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut Auftraggeber: Agora Energiewende Erscheinungsjahr: 2020</p> <p>Zeitraum: 2018 - 2050 (THG-)Minderungsziel: 60/65 % (2030); 100 % (2050)</p> <p>Schwerpunktregionen: <input type="checkbox"/> EU <input checked="" type="checkbox"/> National</p> <p>Methodik: ➤ Sektormodell plus Stromsystemoptimierung ➤ Modellverbund – Modellverbund aus sieben Modellen (Strommarkt, Private Haushalte, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft, LULUCF, Abfall).</p> <p>Szenarienbeschreibung: realistisch-ambitionierte und nicht verzichtfokussierte Szenarien (nur Zwischenwert in 2030 anders) ➤ KN2050: Hauptszenario Klimaneutral 2050, THG-Reduktion um 65 % im Jahr 2030 ➤ KNmin: Minimalvariante Klimaneutral 2050, THG-Reduktion um 60 % im Jahr 2030</p>	 <p>Klimaneutrales Deutschland In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU Green Deals STUDIE</p> <p>Logos: Agora, Agora, Stiftung Klimaneutralität, prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut</p>
<p>Modellname und Institutionen ➤ Strommarktmodell von Prognos: Modell optimiert bis zum Jahr 2050 stundenscharf den Einsatz der einzelnen Kraftwerksblöcke in Europa. ➤ Private Haushalte: die Energienachfrage ist nach Energieträgern und Verwendungszwecken differenziert/analysiert und in die Zukunft fortgeschrieben ➤ GHD: Simulationsmodell für die Entwicklung des Endenergieverbrauchs in den Gewerbesektoren ➤ Verkehr: TEMPS (bottom-up) ➤ Industrie: WISEE-EDM4 des Wuppertal Instituts</p> <p>Zielstellung des Modellverbundes ➤ Plausibler Transformationspfad auf Basis von unterschiedlichen Sektormodellen ➤ Unklar, wie die Modelle miteinander interagieren</p> <p>Wichtige Elemente des Modells ➤ Energienachfragen liefern Stromnachfrage an Strommarktmodell ➤ Abbildung von Stützjahren in Fünfjahresschritten</p> <p>Grenzen des Modells ➤ Kein geschlossenes gesamtsystemisches Optimum ➤ Abbildung von Stützjahren in Fünfjahresschritten ➤ Keine Netzmodellierung</p> <p>Wichtig für die Ergebnisse ➤ CCS für Ausgleich Restemissionen aus Landwirtschaft und industriellen Prozessen ➤ Moderater CO₂-Preis vorgegeben ➤ Fortschreibung aktueller Trends</p>	 <p>Klimaneutrales Deutschland In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU Green Deals STUDIE</p> <p>Logos: Agora, Agora, Stiftung Klimaneutralität, prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut</p>

Abbildung 34: Studienprofil: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität (UBA, 2019) – Übersicht (oben) und Methodik (unten)

<p>Verfasser: Umweltbundesamt Auftraggeber: - Erscheinungsjahr: 2019</p>	
<p>Zeitraum: 2018 - 2050 (THG-)Minderungsziel: 55 % (2030); 95 % (2050)</p>	
<p>Schwerpunktregionen: <input type="checkbox"/> EU <input checked="" type="checkbox"/> National</p>	
<p>Methodik: > Sektormodell plus Stromsystemoptimierung > Modellverbund - Iteratives Vorgehen des Modellverbunds aus fünf Modellen (Transport, Gebäude, Landwirtschaft & LUC, Energie, Rohstoffe) und der Detailanalysen</p>	
<p>Szenarienbeschreibung: Szenarien mit Variation von Verhalten, Materialeffizienz, Rohstoffverbrauch, Energieverbrauch</p> <ul style="list-style-type: none"> • GreenEe1 & 2 - Energy efficiency: Erschließung der „Ee-Potentiale“ über alle Anwendungsbereiche • GreenLate - Late transition: verzögerte Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen • GreenMe - Material efficiency: ähnlich „Ee“ aber zusätzliche Steigerung der Rohstoffeffizienz • GreenLife - Lifestyle changes: wie „Ee“ + „Me“ sowie ambitioniertere umweltbewusste Lebensweise • GreenSupreme: wirksamste Annahmen aus anderen Szenarien verbunden mit schnellem Transf.-pfad 	

„Green“: Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral


<p>Modellname und Institutionen > Die Modellierungen im Verkehrsbereich basieren auf TREMOD (Transport Emission Model) (IFEU), im Bereich Raumwärme und Kältebedarfe auf GEMOD (Gebäude-Modell) (IFEU) und im Bereich Landwirtschaft auf ALMOD (Agriculture and LULUCF-Modell). In Kombination mit den industriellen branchenspezifischen Analysen sowie dem Abfallbereich wurde die Energiemodellierung mit SCOPE (Sektorübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems) durchgeführt.</p> <p>Zielstellung der Modelle > Zuerst Modellierung der Endenergiesektoren, dann Zusammenführen über den Stromsektor mit Modell SCOPE > Nur Kostenoptimierung im Stromsektor</p> <p>Wichtige Elemente der Modelle > Rückkopplungsschleifen über SCOPE, TREMOD und GEMOD</p> <p>Grenzen des Modells > Kein geschlossenes gesamtsystemisches Optimum > Keine Netzmodellierung > Abbildung von Stützjahren 2020, 2030, 2040, 2050 > Industrieabbildung mittels branchenspezifischer Analysen</p> <p>Wichtig für die Ergebnisse > Kein CCS > Brennstoffzelle im Modell keine Option (weder Pkw noch Lkw) > Feedstock für Industriesektoren modelliert und in EEV <u>mitbetrachtet</u></p>	
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------

Abbildung 35: Studienprofil: Wege zu einem Klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen (ISE, 2020) – Übersicht (oben) und Methodik (unten)



<p>Verfasser: Fraunhofer ISE Auftraggeber: Eigenforschungsprojekt Erscheinungsjahr: 2020</p>	
<p>Zeitraum: 2020 – 2050 (THG-)Minderungsziel: 55 % (2030); 95 % und 100 % (2050)</p>	
<p>Schwerpunktregionen: <input type="checkbox"/> EU <input checked="" type="checkbox"/> National</p>	
<p>Methodik:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Gesamtsystemoptimum - Transformationspfad ➢ Modell - Regenerative Energien Modell (REMod): technisch und ökonomisch sinnvolle Transformationspfade zur Zielerreichung, optimiert nach THG-Obergrenze, Transformationskostenminimierung und gesetzlichen bzw. gesellschaftlichen Rahmenbedingungen 	
<p>Szenarienbeschreibung:</p> <p>Zielszenarien mit Referenz und verhaltensorientierten Szenarien</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Beharrung: starke Widerstände gegen den Einsatz neuer Techniken im Privatbereich ➢ Inakzeptanz: starker Widerstand gegen den Ausbau großer Infrastrukturen ➢ Suffizienz: gesellschaftliche Verhaltensänderungen senken den Energieverbrauch deutlich ➢ Referenz/R100: ohne weitere, die Zielerreichung fördernde oder erschwerende Randbedingungen 	
<p>Modellname und Institutionen</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Energiesystemmodell REMod (Fraunhofer ISE) 	
<p>Zielstellung der Modelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Gesamtsystemmodellierung mit einem kostenoptimalen Transformationspfad von heute bis 2050 unter Berücksichtigung von allen Jahren innerhalb der Transformation ➢ Komplette Sektorenkopplung durch integrierte Abbildung aller Sektoren im Modell ➢ CO₂-Budget muss jedes Jahr eingehalten werden 	
<p>Wichtige Elemente der Modelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Geschlossene Modellierung über alle Sektoren in einem Modell mittels Optimierungsheuristik ➢ Stündliche Abbildung von heute bis 2050 als Simulation ➢ Berücksichtigung von 5 stundengenauen Wetterjahren (Extremjahre mit geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Energien abgebildet) ➢ Modellendogene Sanierungsrate ➢ Nachfrage Industrie, Verkehrsaufkommen und Strombasislast wird vorgegeben 	
<p>Grenzen des Modells</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Fokus Deutschland, mit Importen und Exporten ➢ Keine Netzmodellierung 	
<p>Wichtig für die Ergebnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Kein CCS ➢ Feedstock der Industrie <u>nicht</u> mitbetrachtet (nur energetischer EEV) 	

Abbildung 36: Studienprofil: WEGE FÜR DIE ENERGIEWENDE (Jülich, 2019) – Übersicht (oben) und Methodik (unten)



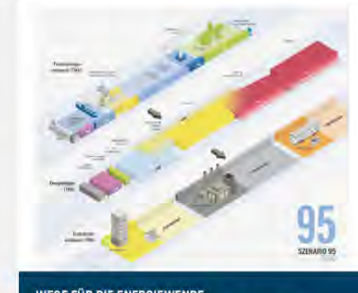

<p>Verfasser: Forschungszentrum Jülich</p> <p>Auftraggeber: -</p> <p>Erscheinungsjahr: 2019</p> <hr/> <p>Zeitraum: 2020 – 2050 (THG-)Minderungsziel: 80 und 95 % (normativ)</p> <p>Schwerpunktregionen:</p> <p><input type="checkbox"/> EU <input checked="" type="checkbox"/> National</p> <hr/> <p>Methodik:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Gesamtsystemoptimierung nach wirtschaftlichen Kriterien, Wettbewerb zwischen allen Minderungsmaßnahmen in allen Sektoren, keine Sektorziele ➢ Modellverbund: sektorübergreifende Energiesystemoptimierung (national) gekoppelt mit Modellen zur Simulation/Analyse des Europäischen Stromnetzes, eines weltweiten Wasserstoff- und Syntheseprodukte-Marktes sowie der EE-Potenziale und Wasserstoffinfrastrukturen im Inland ➢ Hohe Detaillierung von Wasserstoffherzeugung und -transport <hr/> <p>Szenarienbeschreibung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Szenario 80: 80 % Treibhausgasmindeung bis zum Jahr 2050 mit Mindestzielen der Bundesregierung für die Zwischenjahre 2030 und 2040 ➢ Szenario 95: 95 % Treibhausgasmindeung bis zum Jahr 2050 mit ambitionierteren Reduktionszielen für die Zwischenjahre 2030 und 2040 	 <p>WEGE FÜR DIE ENERGIEWENDE Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050</p> <p>M. Reinhard, P. Morawatz, P. Lippert, F. Kuhnert, R.-M. Heuser, K. Spindler, S. Cernuschi, T. Schick, M. Nauf, S. Ryberg, L. Kötter, D. Gajewski, L. Weiser, J. Lindner, T. Grube, H. Heinrich, P. Sauer und D. Stollen</p> <p>Energie & Umwelt / Energy & Environment Band/Volumen 499 ISBN 978-3-95806-483-6</p> <p>Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft</p> 
<p>Modellname und Institutionen</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ FINE-NESTOR (FZ): Das Modell bildet die nationale Energieversorgung ab, hinzu kommen Submodelle für den Modellverbund: ➢ Simulation des europäischen Höchst- und Hochspannungsnetzes EURO-Power <ul style="list-style-type: none"> ➢ Simulation des weltweiten Handels mit erneuerbaren Energieträgern (Wasserstoff, Syntheseprodukte) ➢ Analyse der Potenziale erneuerbarer Energien (national) ➢ Auslegung von Wasserstoffinfrastrukturen <p>Zielstellung der Modelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Optimierung nach gesamtwirtschaftlichen Kriterien (partielles Gleichgewichtsmodell) ➢ Myopisch und Backcasting-Ansatz aus dem Zieljahr -> dann Stützjahre <p>Wichtige Elemente der Modelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Geschlossene Optimierung ➢ Alle Sektoren zusammen in einem Optimierungsmodell <p>Grenzen des Modells</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Zieljahroptimierung (Grüne-Wiese-Ansatz) gekoppelt mit myopischen Ansatz für die Zwischenjahre ➢ Fokussierung auf Deutschland <p>Wichtig für die Ergebnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Kein CCS im Inland, Import von blauem Wasserstoff wird ausgeschlossen ➢ Nur energetische Nutzung der Energieträger mit Ausnahme von Feedstocks für Stahl ➢ Kein internationaler Flug- und Schiffverkehr 	 <p>WEGE FÜR DIE ENERGIEWENDE Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050</p> <p>M. Reinhard, P. Morawatz, P. Lippert, F. Kuhnert, R.-M. Heuser, K. Spindler, S. Cernuschi, T. Schick, M. Nauf, S. Ryberg, L. Kötter, D. Gajewski, L. Weiser, J. Lindner, T. Grube, H. Heinrich, P. Sauer und D. Stollen</p> <p>Energie & Umwelt / Energy & Environment Band/Volumen 499 ISBN 978-3-95806-483-6</p> <p>Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft</p> 

Abbildung 37: Studienprofil: Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen (NRW, 2019) – Übersicht (oben) und Methodik

<p>Verfasser: Ludwig Bölkow Systemtechnik (LBST)</p> <p>Auftraggeber: Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE-NRW)</p> <p>Erscheinungsjahr: 2019</p> <p>Zeitraum: 2015 – 2050 (THG-)Minderungsziel: 55 % (2030); 80 % und 95 % (2050)</p> <p>Schwerpunktregionen:</p> <p><input type="checkbox"/> EU <input checked="" type="checkbox"/> National</p> <p>Methodik:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Optimierung des Energieversorgungssystems nach gesamtwirtschaftlichen K ➢ Sektorziele und Energienachfragen (Wasserstoff/Strom) in den Sektoren werden exogen vorgegeben (nicht optimiert) ➢ Optimierung in zwei Schritten: Marktmodellierung (zeitliche Dimension) und anschließend Netzsimulation (räumliche Dimension) ➢ Explizite Modellierung der Energieträger Strom und Wasserstoff, weitere Energieträger werden in Sensitivitätsanalysen betrachtet <p>Szenarienbeschreibung:</p> <p>Jeweils 3 Szenarien (55 % THG-Minderung in 2030 sowie 80 % und 95 % THG-Minderung in 2050) für:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ EL: Referenz mit Fokus auf Elektrifizierung (Elektrolyse beim Verbraucher, keine Wasserstoff-Speicher und -Netze) ➢ H₂: zusätzlicher Einsatz von Wasserstoff (systemdienliche Elektrolyse, Wasserstoff-Speicher und -Netze) 	 <p>Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

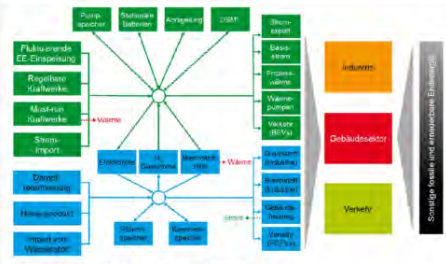

<p>Modellname und Institutionen</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Modellname unbekannt (LBST) <p>Wichtige Elemente des Modells</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Fokus auf Stromsystem und Wasserstoff-technologien ➢ Vereinfachte Abbildung der EE-Einspeisung, Stromnachfrage und Import/Export ➢ Lineare Optimierung von Investition und Betrieb im Zieljahr ➢ Nachgelagerte Netzsimulation (vereinfachter Ansatz) <p>Grenzen des Modells</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Starke Abhängigkeit von historischen Daten beim Strom (z. B. Residuallast, Stromimporte) ➢ Netzmodellierung stark vereinfacht ➢ Kaum Referenzen, kaum Beschreibung des Modells vorhanden ➢ Keine Optimierung der Anwendungssektoren (Verkehr, Industrie, Wärme) - Festlegung der Nachfrage über Setzungen, die kaum begründet werden <p>Wichtig für die Ergebnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Fokus auf Wasserstoffnutzung und viele Setzungen hierfür ➢ Keine Berücksichtigung von CCS ➢ Flug- und Schifffverkehr (nat. + int.) wird in Szenarien ausgeklammert und nur in der Sensitivitätsanalyse betrachtet ➢ Importe von Wasserstoff werden in Szenarien ausgeklammert und nur in der Sensitivitätsanalyse betrachtet ➢ Annahme: Biomasse-Potenzial bereits ausgeschöpft, konstante Fortschreibung bis 2050 	 <p style="text-align: center;">* DSM – Demand Side Management (Bedarfsmanagement)</p> <p style="text-align: center;">Grenzen des Energiesystems in der Modellierung</p>	 <p>Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abbildung 38: Studienprofil: Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe (BMU, 2020)

Verfasser:	Öko-Institut
Auftraggeber:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Erscheinungsjahr:	2020
Zeitraum: 2015 – 2050	(THG-)Minderungsziel: -
Schwerpunktregionen:	
<input type="checkbox"/> EU	<input checked="" type="checkbox"/> National
Methodik:	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Überblicksuntersuchung von überwiegend nationalen Studien aus dem Bereich Wasserstoff und THG-Minderung aus den Jahren 2017-2020 ➤ Erzeugung – Nachfrage – Infrastruktur – Regulativer Rahmen ➤ Die analysierten Studien und ihre betrachteten Szenarien sind u. a.: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Fraunhofer ISE (2020): "Beharrung", "Inakzeptanz", "Suffizienz", "Referenz" ➤ EC (2018): "Hydrogen", "COMBO", "1.5 Tech", "1.5 Life" ➤ dena (2018): "Elektrifizierung 95", "Technologiemix 95" ➤ BDI (2018): "95 %" ➤ Forschungszentrum Jülich (2019): "Szenario 95" 	
Szenarienbeschreibung:	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Keine eigene Entwicklung von Szenarien 	

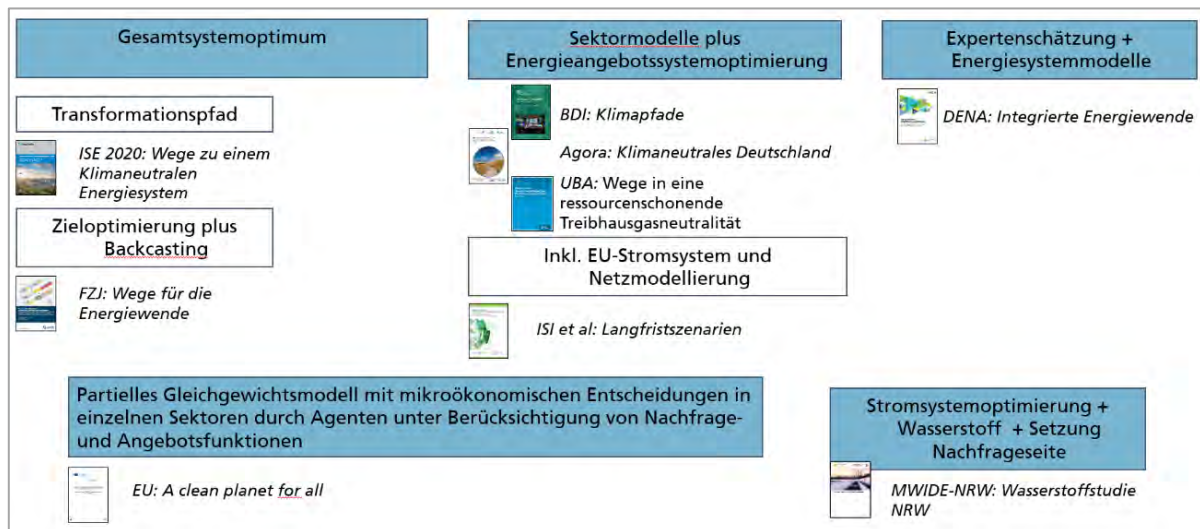
Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe
Eine Übersichtskartenschung
Berlin, 04.09.2020

Dr. Felix Chu, Mithras
Christoph Heinenmann
Dr. Tobias Heise
Peter Kasper
Dr. Norman Mendebrich
Cornelia Eberhard
Christof Vinga
Verena Cook (Übersetzung)

Öko-Institut e.V.
Postfach 1
70372 Stuttgart
Telefon +49 (0) 7141 90-1000
Telefax +49 (0) 7141 90-1001
E-Mail: oeko@oeko.de
www.oeko.de

Diese Studie wurde zur Mitte des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit gefördert. Sie gilt als Aufarbeitung des Öko-Instituts Arbeit.

Abbildung 39: Übersicht zum methodischen Ansatz in den Systemstudien für Deutschland



A.1.4 Nationale Studien – Ausprägung von Determinanten

Tabelle 6: Determinantenvergleich – nationale Studien (BDI, 2018; dena, 2018; Agora, 2020; UBA, 2019)

	BDI 2018	dena 2018	Agora 2020	UBA 2019
THG-Minderungsziele	2030: nicht vorh. 2040: nicht vorh. 2050: -95 %	2030: -55 % 2040: -75 % 2050: -95 %	2030: -60 bis 65 % 2040: nicht vorh. 2050: -100 %	2030: -55 bis -69 % 2040: -70 bis -88 % 2050: -95 bis -97 %
CCS (Ausgleich in Mio. t CO ₂ -Äq)	ja, bei Zement, Müllverbrennung, Stahl, Dampfreformierung und Raffinerien Ausgleich: 93 Mio. t CO ₂ -Äq	Ja, aber begrenzter Umfang Ausgleich: 16 Mio. t CO ₂ (aus Industriesektor 2050)	ja, Restemissionen aus Landwirtschaft und industriellen Prozessen Ausgleich: 62 Mio. t CO ₂ -Äq	nein, nicht berücksichtigt (keine Brückentechnologie)
Biomassepotentiale (sektorale Aufteilung: Industrie / Verkehr / Sonst)	620 PJ (172 TWh), nur in der Industrie	Verstromungspotential: ca. 25 GW Bioenergiepotential energetische Nutzung DE: 262 TWh Importpotential biogener Energieträger: 48 TWh	2030: 335 TWh (49 / 36 / 251) 2050: 343 TWh (187 / 0 / 157)	ab 2030 keine energetische Nutzung von Primärbiomasse
Eingeschränkte Annahmen im Verkehrssektor (direkte Elektrifizierung, Wasserstoffantrieb etc.)	33 Mio. E-Pkw, 2 Mio. Gas-Pkw 8.000 km Oberleitung, 69 % E-Lkw, 16 % Gas-Lkw, 125 TWh synthetische Kraftstoffe nationaler Verkehr, 143 TWh synthetische Kraftstoffe internationaler Verkehr	Im Elektrifizierungsszenario wird der politische Rahmen so gesetzt, dass perspektivisch nur elektrische Antriebe genutzt werden können. Im Technologiemixszenario sind klimaneutrale Kraftstoffe eine Option.	<ul style="list-style-type: none"> keine Verbrennungsmotoren ab 2035 2/3 Straßengüterverkehr BE-Lkw mit Oberleitung und 1/3 durch FC-Lkw PtL für Schiffs- und Luftverkehr sowie für Pkw-Restbestände ab 2050 	Vorrang von Batterie oder Oberleitungen: Brennstoffzelle nicht als Option berücksichtigt PtL (synth. Kraftstoffe) nur in Luft- und Schiffsverkehr Rest: Batterie/Oberleitung
BIP – CAGR¹⁾	1,2 % p.a. bis 2050	1,2 % p.a. (2020-2029) und 0,9 % p.a. (2030-2050)	1,3 % p.a.	2030 bis 2050: 0,7 % p.a. (DE); Supreme mit 0,0 % p.a.
Entwicklung Produktionskapazität	Wachstum Industrie: durchschnittlich 1,2 % p.a. energieintensive Branchen: verlangsamtes Wachstum	branchenspezifisches Wachstum (z. B. von -0,8 % p.a. für Stahl bis zu 2 % p.a. für Aluminium)	Zunahme: NE-Metalle, Papier, Polymere, Zellstoff, Glas, Steinwolle Reduktion: Ammoniak, HVC, Kalk, Zement, Rohstahl	Ee1+Late: steigend Ee2+Life: rückläufig Supreme: konstant

	BDI 2018	dena 2018	Agora 2020	UBA 2019
Maximale EE-Potentiale (TWh oder GW)	Potentialgrenzen: PV Dach: 130 TWh PV Freifläche: 140 TWh Wind Onshore: 240 TWh Wind Offshore: 300 TWh Biomasse: keine Angabe	Potentialgrenzen: PV: 250 GW Wind Onshore: ca. 180 GW Wind Offshore: ca. 40 GW Biomasse: ca. 25 GW	<i>Potentiale nicht angegeben</i> <i>EE-Einsatz 2050:</i> PV: 355 GW Wind Onshore: 130 GW Wind Offshore: 70 GW Biomasse: < 1GW	<i>Potentiale nicht angegeben</i> <i>EE-Einsatz 2050:</i> GreenLate: PV: 220 TWh (220 GW) Wind Onshore: 470 TWh (150 GW) Wind Offshore: 130 TWh (35 GW) Biomasse: k. A.
CO₂-Preise (€/t CO ₂)	55 €/t (2030) 124 €/t (2050)	bis zu 60 €/t CO ₂ äq. in 2050	beide Szenarien in 2050 ETS: 90€ ₂₀₁₉ /t CO ₂	keine Angaben
Stoffliche Nutzung von Energieträgern (Stahl/Chemie)	Ja / Ja Feedstocks in Stahl- und Chemieindust- rie werden berück- sichtigt	Ja / Ja Feedstocks in Stahl- und Chemieindust- rie werden berück- sichtigt	Ja / Ja Feedstocks in Stahl- und Chemieindust- rie werden berück- sichtigt	Ja / Ja Feedstocks in Stahl- und Chemieindust- rie werden berück- sichtigt
Kalte Dunkelflaute berücksichtigt (explizit erwähnt)	kalte Dunkelflaute wird nicht explizit er- wähnt	kalte Dunkelflaute wird berücksichtigt	kalte Dunkelflaute wird nicht explizit er- wähnt, aber Simula- tion erfolgt für unter- schiedliche Wetter- jahre und Problematik beachtet	kalte Dunkelflaute wird nicht explizit er- wähnt
Preise für wesentliche Energieträger 2050 (€/MWh)	PtL-Import inkl. Ver- teilung: 150 Nettostrompreis: 155 Ölpreis (Referenzszenario: USD 110 / barrel)	Kohle (2050): 10 Erdgas (2050): 30 Erdöl (2050): 35 PtX-Import (Diesel, Kerosin, Heizöl): 143 Strompreis für private Endverbraucher: 171-173	H ₂ -Kosten ²⁾ : (110)-170 Erdgas: 22 Erdöl: 55 Strompreis in DE: (55)- 62	PtL-Import: 118 Erdgas: 22 Erdöl: 42
Wasserstoff-Farben	Elektrolysewasser- stoff (grün, grau)	Elektrolysewasser- stoff (grün, grau)	Elektrolysewasser- stoff (grün, grau), Dampfreformierung (grau, blau)	Elektrolysewasser- stoff (grün, grau), Dampfreformierung (grau)

¹⁾CAGR = Compound Annual Growth Rate (jährliche durchschnittliche Wachstumsrate)

²⁾H₂-Bereitstellungskosten beim Endverbraucher (Transport, Betrieb, Investition, Strom)

Tabelle 7: Determinantenvergleich – nationale Studien (ISE, 2020; Jülich, 2019; NRW, 2019; BMWi, 2021)

	ISE 2020	Jülich 2019	NRW 2019	BMWi 2021
THG-Minderungsziele	2030: -55 % 2050: -95 bis -100 %	2030: -55 % 2040: -73 % 2050: -95 %	2030: -55 % 2050: -95 %	2030: -55 % 2050: -95 %
CCS (Ausgleich in Mio. t CO ₂ -Äq)	nein, kein CCS	nein, CCS und Import von blauem Wasserstoff ist ausgeschlossen; CCU ist aber erlaubt	nein, wird diskutiert, aber nicht modelliert	nein, kein CCS; in einer Variante aber Import von blauem Wasserstoff zulässig
Biomassepotentiale (sektorale Aufteilung: Industrie / Verkehr / Sonst)	2050: Biomasse spielt für Raumwärme und Trinkwarmwasser kaum noch eine Rolle. → Nutzung für Prozesswärme und biogene Kraftstoffe ist aus systemischer Sicht effizienter. Der Import von Biomasse bleibt auf heutigem Niveau.	Summe 2050: 461 TWh Primärenergieeinsatz Industrie (Prozesswärme): 265 Verkehr (Biokraftstoffe): 60 Energiesektor (Strom): 99 Gebäude (KWK): 36 → hierfür ist eine Verdopplung der heute genutzten Ackerflächen nötig	Bioenergie-Potential bereits heute weitestgehend ausgeschöpft → konstanter Wert auf heutigem Niveau für alle Szenarien	Potential 2050 in DE Rest und Abfallstoffe: 201 Anbaubiomasse: 105 Maximale Importe: 100
Eingeschränkte Annahmen im Verkehrssektor (direkte Elektrifizierung, Wasserstoffantrieb etc.)	keine diesbezügliche Setzung; Kapazitäten der jeweiligen Technologien mit Optimierung ermittelt	Gleichsetzung der Herstellkosten für BEV und FCEV (Kostenschätzung sehr unsicher und Ergebnisse diesbezüglich sensitiv)	Konst. EEV im Verkehr bis 2050; Setzung 2050 (außer Schiffs- u. Luftverkehr): EL-Szenario: 80 % BEV, 20 % FCEV H ₂ -Szenario: 20 % BEV, 80 % FCEV	Im Szenario „Fokus Strom“ sind elektrifizierungsförderliche Parameter gesetzt. Im Szenario „Fokus PtG/PtL“ eher Elektrifizierungshinderliche.
BIP – CAGR¹⁾	konst. Anstieg des BIP (über Energienachfrageprognosen)	1,2 % p.a. BIP real (Rahmendaten nach BDI 2018)	0,9 % p.a. BIP real (Rahmendaten nach dena 2018)	Bis 2025 1,3 % p.a., danach 0,9 % p.a
Entwicklung Produktionskapazität	Suffizienz: leichter Konsum- und Produktionsrückgang angenommen	durchschn. Entwicklung d. Industrie an Wirtschaftswachstum gekoppelt, Unterschiede in den Branchen (Rahmendaten nach BDI 2018)	konstante Produktionskapazität im Industriesektor bis 2050 (Ausnahme Raffinerien)	steigende Materialeffizienz und Ansätze von Kreislaufwirtschaft, insgesamt aber nur moderate Suffizienz
Maximale EE-Potentiale (TWh oder GW)	Potentialgrenzen: PV: 530 GW Wind Onshore: 230 GW Wind Offshore: 80 GW Biomasse: 300 TWh	<i>Potentiale nicht angegeben</i> EE-Einsatz 2050: PV: 193 TWh Wind Onshore: 543 TWh Wind Offshore: 154 TWh Biomasse: 446 TWh	<i>Potentiale nicht angegeben</i> EE-Einsatz 2050: PV: 539 TWh Wind Onshore: 616 TWh Wind Offshore: 385 TWh Biomasse: k. A.	maximales Potential Wind- und PV in Deutschland: ca. 1.200 TWh, genutzt werden davon 700 bis 900 TWh

	ISE 2020	Jülich 2019	NRW 2019	BMWi 2021
CO₂-Preise (€/t CO ₂)	CO ₂ -Vermeidungskosten werden endogen im Modell über CO ₂ -Budget berechnet	keine Angaben	werden nicht berücksichtigt	sektoral differenziert, im Umwandlungssektor bis auf 500 EUR/t steigend
Stoffliche Nutzung von Energieträgern (Stahl/Chemie)	Ja / Nein Nur energetische EEV und energiebedingten CO ₂ -Emissionen; Ausnahme ist der Rohstoffbedarf der Stahlindustrie.	Ja / Nein Modell bildet nur energ. Nutzung von Energieträgern ab, Ausnahme: Wasserstoffbedarf für Stahldirektreduktion.	Ja / Ja Feedstocks in Stahl- und Chemieindustrie werden berücksichtigt.	Ja / Ja Feedstocks für Stahl, Ammoniak und Ethylen werden berücksichtigt.
Kalte Dunkelflaute berücksichtigt (explizit erwähnt)	Kalte Dunkelflaute nicht explizit erwähnt, aber Daten zu 5 Wetterjahren mit Stundenwerten bilden sichere statistische Bandbreite, die Extremjahre mit geringer EE-Verfügbarkeit abbilden.	Einfluss einer kalten Dunkelflaute auf den Speicherbedarf und die installierte Erzeugungskapazität wird in einem Extra-Szenario untersucht.	kalte Dunkelflaute wird berücksichtigt	kalte Dunkelflaute wird berücksichtigt
Preise für wesentliche Energieträger 2050 (€/MWh)	H ₂ -Import: (213) 127 Fuel-Import: 240 CH ₄ -Import: 197 Erdgas: 23 Erdöl: 51 Strompreis in DE: modelliert	H ₂ -Import: 101-126 PtCH ₄ -Import: 174-205 PtL-Import: 169-202 Erdgas: 26 Diesel/Benzin: 37-40 Strompreis in DE: modelliert	H ₂ -Import (nur Sensitivitätsanalyse): 80-100 Erdgas: 37 Erdöl: 74 Stromkosten inkl. Übertragung: 35-50	nicht ausgewiesen
Wasserstoff-Farben	Elektrolysewasserstoff (grün, grau), Dampfreformierung (grau), Biowasserstoff (grün)	Elektrolysewasserstoff (grün, grau), Dampfreformierung (grau), Reversible Festoxidzelle (rSOC), Vergasung (Holz/Stroh)	Elektrolysewasserstoff (grün, grau), Dampfreformierung (grau)	Elektrolysewasserstoff (grün, grau)

¹⁾CAGR = Compound Annual Growth Rate (jährliche durchschnittliche Wachstumsrate)

A.2 Studienergebnisse – Auswertung der EU-Systemstudien

Übersicht

Abbildung 40: THG-Minderungsprojektionen der EU-Studien (seit 1990)

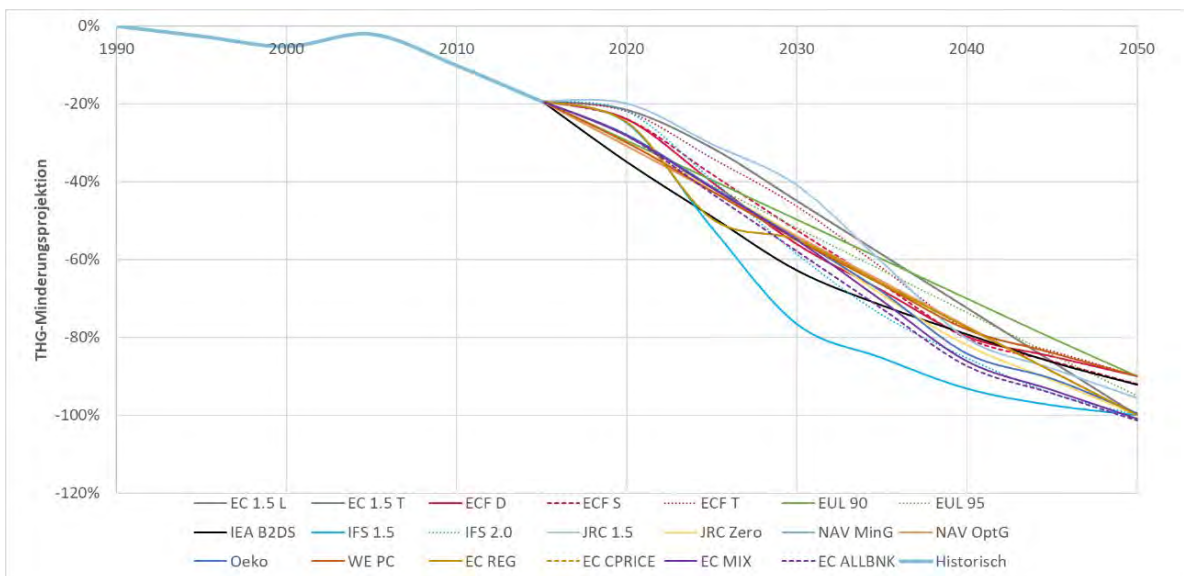
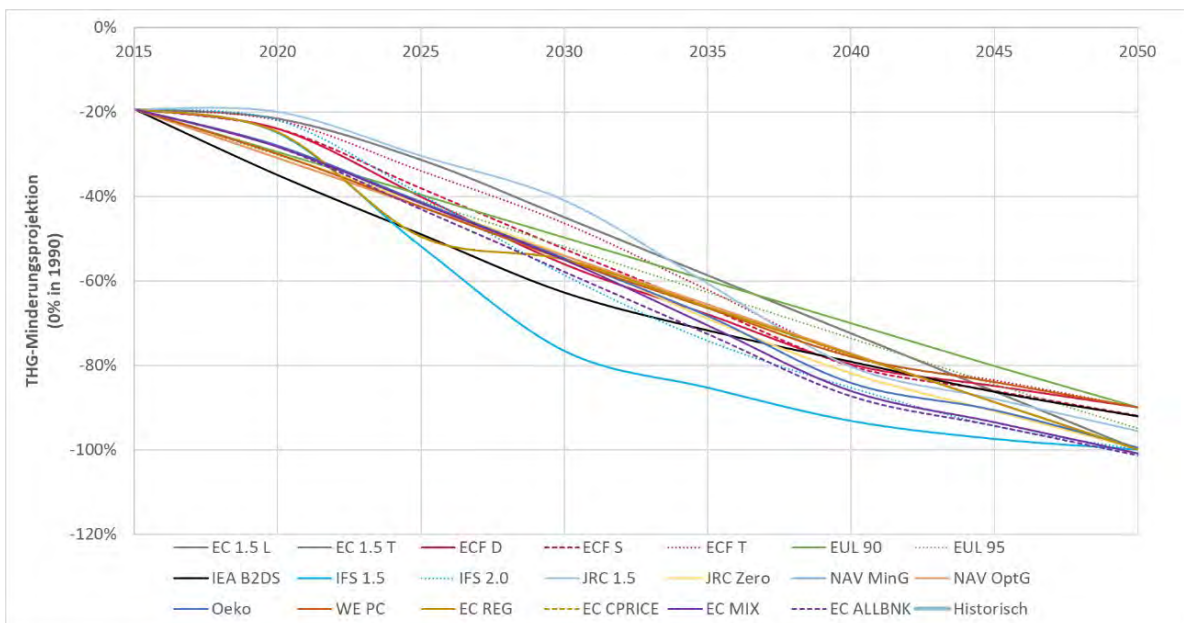


Abbildung 41: THG-Minderungsprojektionen der EU-Studien (seit 2015)



A.2.1 Gesamte Energienachfrage EU

- Einzelaspekte zur Gesamtnachfrage (Abbildung 2):
- EUL 90 & EUL 95 (Eurelectric, 2018) weisen eine sehr niedrige Wasserstoffnachfrage aus
 - setzen stark auf Direktelektrifizierung (u. a. hohe Anteile Elektromobilität und Wärmepumpe)
 - Annahme EUL 90: starke Senkung der Kosten von marktreifen Technologien bis 2030
 - Annahme EUL 95: höhere Wettbewerbsfähigkeit von Strom im Vergleich zu anderem Energieträger
 - keine Aufteilung zwischen Biomasse, Geothermie, Solarthermie und sekundäre Brennstoffe wie synthetischer Brennstoff, Wasserstoff usw.
- EC 1.5 & EC 1.5 (EC, 2018) weisen eine sehr hohe Nachfrage von Wasserstoff und Syntheseprodukt aus
 - hohe Nachfrage in allen Sektoren, besonders im Industrie- und Verkehrssektor
- NAV OptG & NAV MindG (Navigant) zeigen große Nachfragespreizung
 - unvollständige sektorale Daten: keine Daten zu Wärmesektor und nur ein Teil von Industrie ist berücksichtigt
 - Setzung von technologischen Lösungen (optimistischer/pessimistischer synthetischer Gas-einsatz)

A.2.2 Nachfrage in der Industrie EU für 2030 (oben) und 2050 (unten)

Abbildung 42: Industrienachfrage in der EU in 2030

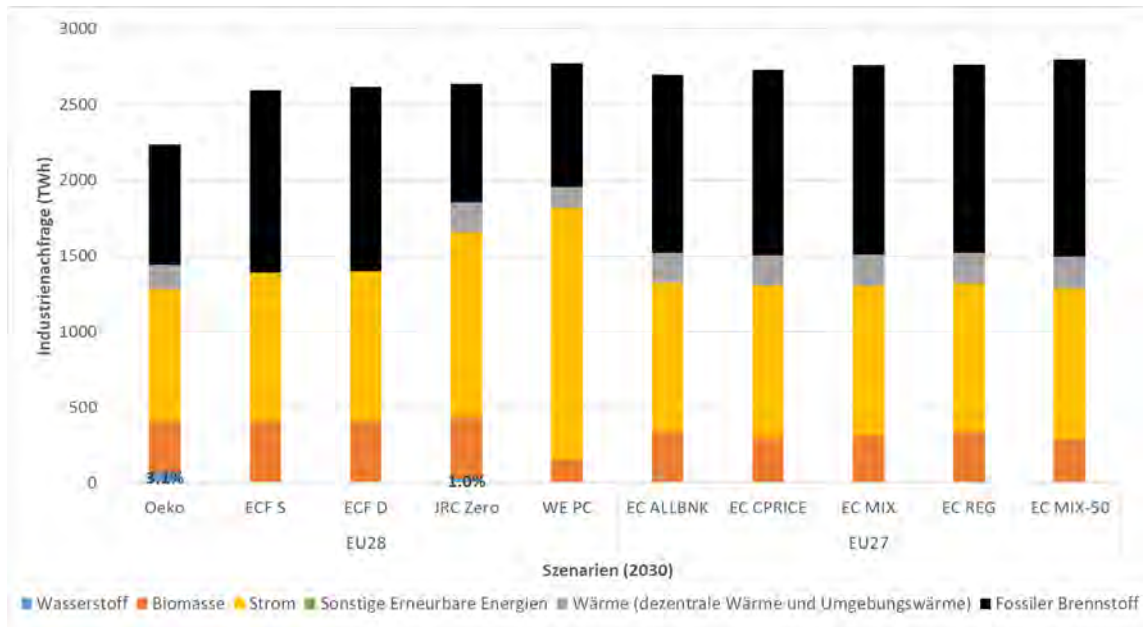
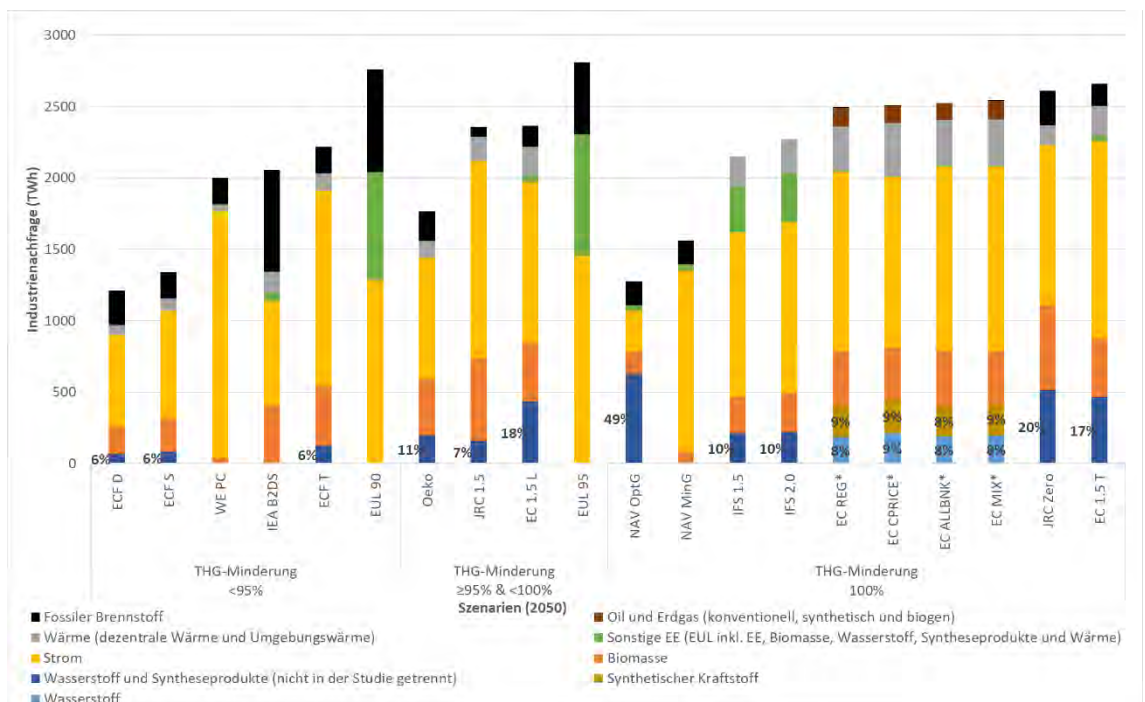


Abbildung 43: Industrienachfrage in der EU in 2050



Industrie – Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage in 2050 eher hoch, aber mit Abweichungen (Abbildung 42):

- bei 100 %-Szenarien eher 10 bis 20 % Nachfrage
- H₂- und Syntheseproduktnachfrage steigt tendenziell mit THG-Ambitionsniveau
- überwiegender Teil der Szenarien setzt stark auf Direktelektrifizierung im Industriesektor

Einzelaspekte zur Industrienachfrage:

- NAV OptG & NAV MinG (Navigant, 2019) zeigt niedrige Industrienachfrage
 - nur ein Teil von der energieintensiven Industrie ist in den Szenarien berücksichtigt
 - Dekarbonisierungsoption: Kostenoptimierung; kombiniert erneuerbare Energien und Low-carbon-Gas in bestehende Gasinfrastruktur
 - Annahmen NAV MinG: steigende direkte Anwendung von Strom in allen Sektoren; Gasinfrastruktur ist nicht mehr im Einsatz
 - Annahme NAV OptG: Erneuerbare und Low-carbon-Gas bieten Flexibilität für Stromerzeugung an; Wasserstoff wird neben großen Stromerzeugungsanlagen produziert und im Gasnetz gespeichert
- IFC 1.5 & IFC 2.0 (DLR, 2019) zeigt hohe sonstige erneuerbare Energie: inkl. Solarthermie und Geothermie und Sonstige
- EC REG, EC MIX, EC ALLBNK & EC CPRICE (EC, 2020) zeigen weitere Nutzung von fossilem Brennstoff
 - Dekarbonisierung erfolgt auch durch starke Einbindung von Technologien wie CCS und CCU
- IEA B2DS (International Energy Agency, 2017) weist höchste Nachfrage für fossilen Brennstoff auf (35 %)
 - 55 % der CO₂-Emission durch die Nutzung von fossiler Energie wird gespeichert (CCS)

A.2.3 Nachfrage im Gebäudesektor EU im Jahr 2030 (oben) und 2050 (unten)

Abbildung 44: Nachfrage im Gebäudesektor in der EU in 2030

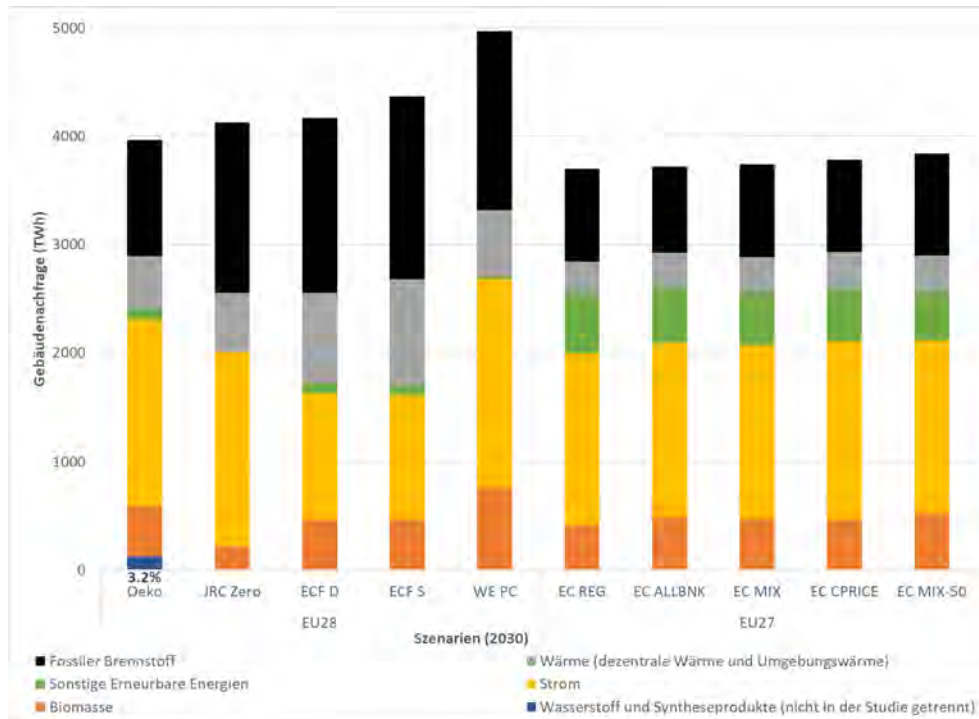
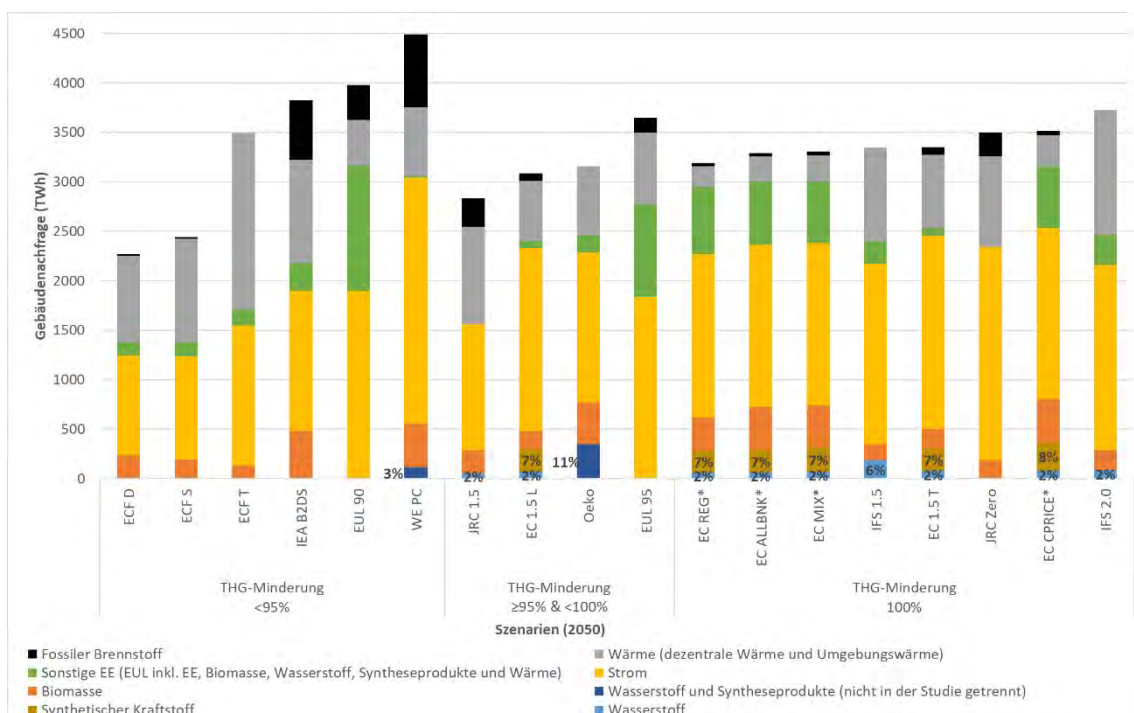


Abbildung 45: Nachfrage im Gebäudesektor in der EU in 2050



Der Gebäudesektor zeigt große Spreizung der Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage im Jahr 2050 (Abbildung 44):

- geringe Wasserstoffnachfrage im Gebäude-(Wärme-)Bereich bzgl. Szenarien mit niedrigem THG-Ambitionsniveau
- der überwiegende Teil der Szenarien setzt stärker auf Direktelektrifizierung: von 37 bis 62 %
- die Wärmenutzung hat bzgl. dezentraler Wärme einen tendenziell negativen Einfluss auf die Nachfrage

Einzelaspekte zur Gebäudenachfrage:

- sonstige erneuerbare Energie
 - ECF D, ECF S und ECF T (European Climate Foundation, 2018): enthält nur Solarthermie
 - EC 1.5 L und EC 1.5 T (EC 2018), Oeko (Öko-Institut, 2017), und IFS 1.5 und IFS 2.0 (DLR, 2019): Solarthermie und Geothermie und sonstiges
 - IEA B2DS (International Energy Agency, 2017): Biokraftstoff und Solarthermie
- NAV OptG & NAV MinG (Navigant, 2019)
 - unvollständige Daten in der Gebäudenachfrage

A.2.4 Nachfrage im Verkehrssektor EU im Jahr 2030 (oben) und 2050 (unten)

Abbildung 46: Nachfrage im Verkehrssektor in der EU in 2030

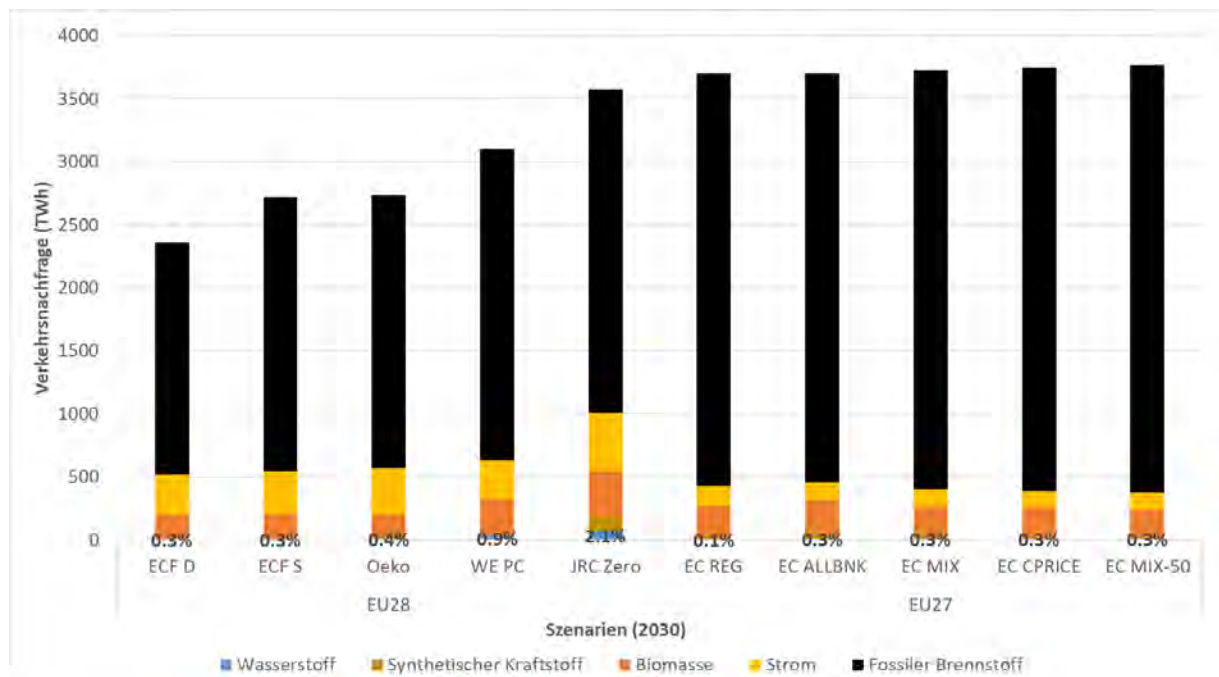
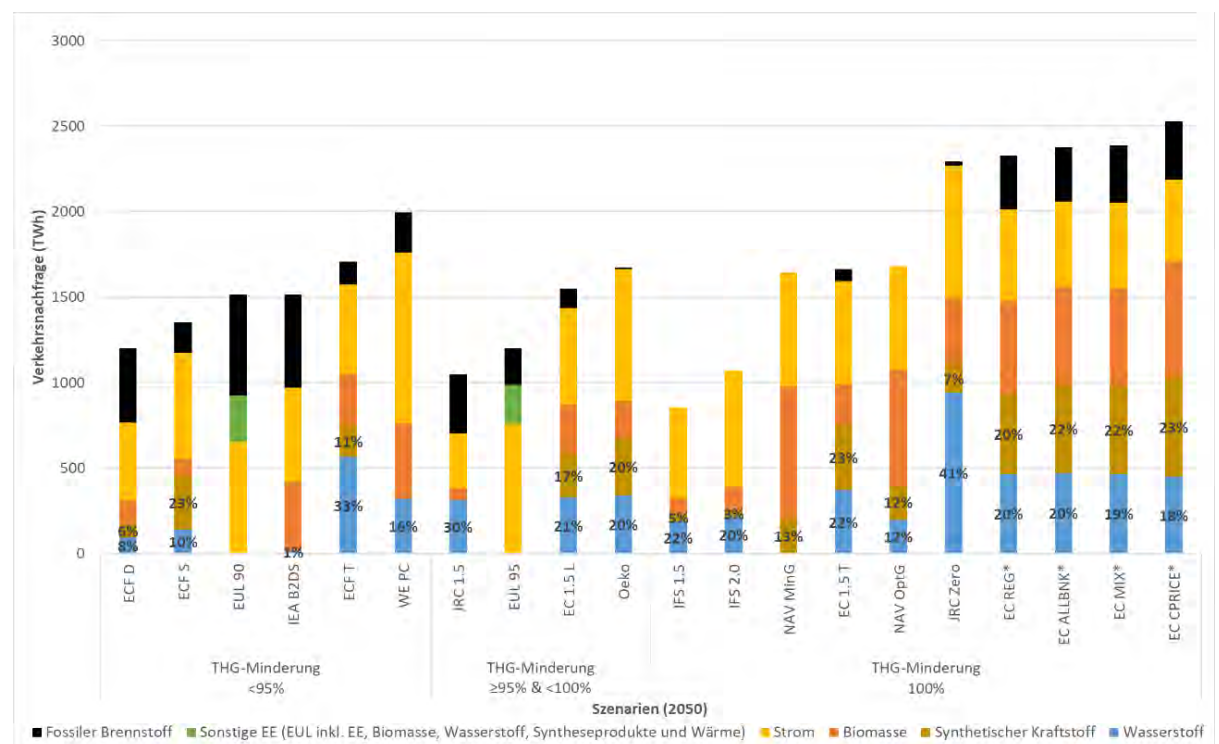


Abbildung 47: Nachfrage im Verkehrssektor in der EU in 2050



Verkehr – Wasserstoff und Syntheseprodukt spielen in der Verkehrsnachfrage im Jahr 2050 eine große Rolle (Abbildung 46):

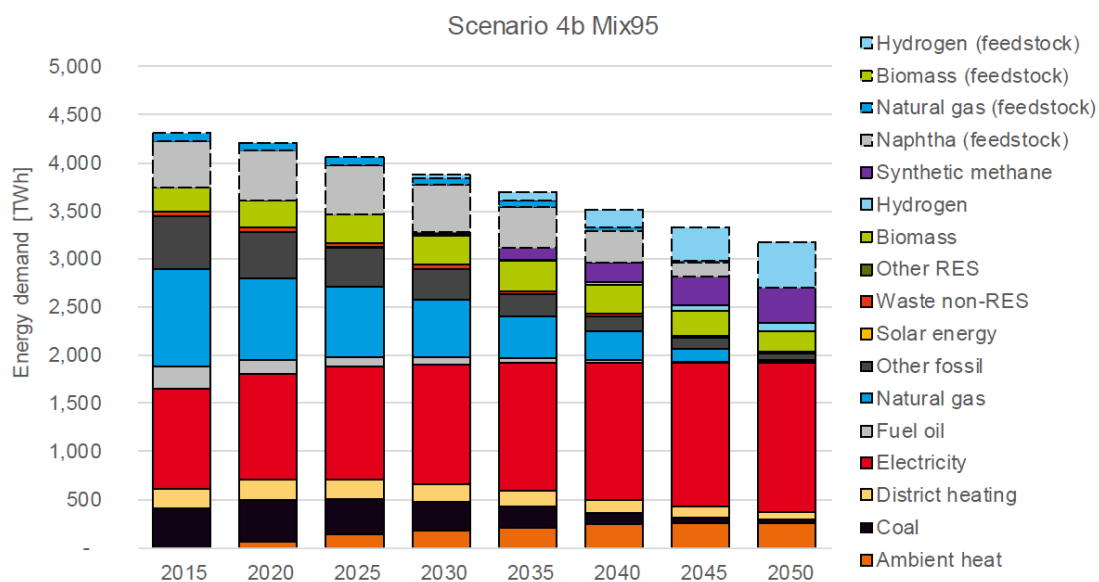
- gesamtverkehrsnachfrage zeigt große Differenzen
 - überwiegender Teil von den Szenarien enthält nur 60 % der Sektornachfrage (bzw. exkl. Energie für internationale Flüge und Schiffe)
- bei 100 % THG-Minderung:
 - reine Wasserstoffnachfrage eher bei ca. 20 %
 - Syntheseproduktnachfrage eher um 20 % (bei Einbezug des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs)

Einzelaspekte zur Verkehrsnachfrage:

- EUL 90 & EUL 95 (Eurelectric, 2018) weisen sehr niedrige Wasserstoffnachfrage im Verkehrssektor aus
 - keine Aufteilung zwischen sekundären Brennstoffen wie Biokraftstoffe und Wasserstoff und sonstiger erneuerbarer Energie
- unterschiedliche Dekarbonisierungsoptionen in 2050
 - ECF S, ECF D, ECF T (European Climate Foundation, 2018): weitere Nutzung von fossilem Brennstoff in 2050, aber starke Reduktion im Güterverkehr
 - EC 1.5 L und EC 1.5 T (EC, 2018): gesamte Verkehrsnachfrage sinkt, aber Pkw-Straßenverkehr steigt

A.3 Studienergebnisse – Auswertung der EU-Industriestudie

Abbildung 48: EU-Industrie Energienachfrage in 2050 aus der EU-Industriestudie (Quelle EC 2019)



Nachfrage nach Wasserstoff und Syntheseprodukten in der EU-Industriestudie 2050: (Abbildung 47):

- 950 TWh Wasserstoff (energetisch & stofflich) und synthetisches Methan im Jahr 2050 (95 %-Szenario; technologieoffen)
- Starker Anstieg des Strombedarfs
 - (+48 % 2050 ggü. 2015) exkl. Energieaufwand für Wasserstoff und synthetischem Methan
- Anteil fossiler Energieträger auf 8 % bzw. 221 TWh (2050) reduziert
- Wasserstoff wird in großen Mengen stofflich genutzt

Weitere Ergebnisse und Determinanten zur EU-Industriestudie:

- Max. -87 % CO₂-Reduktion 2050 ggü. 1990 im CCS-Szenario (ohne Wasserstoff)
- Max. -80 % CO₂-Reduktion 2050 ggü. 1990 im Biomasse-/Kreislaufwirtschaft-Szenario (ohne Wasserstoff, ohne CCS)
- Fossile Industrieproduktion in allen Szenarien rückläufig, außer im CCS-Szenario
- Amortisationszeiten von bis zu 10 Jahren werden angenommen
- CO₂-Preis von bis zu 200 Euro/t CO₂ (2050)
- Förderung von Wärme von bis zu 20 Euro/MWh bei Wärmepumpen und bis zu 100 Euro/MWh bei elektrischen Dampferzeugern
- Strombedarf der EU-Industrie kann sich trotz sinkender Produktionsmengen aufgrund der Erzeugung von Wasserstoff & synthetischem Methan bis 2050 ggü. 2015 nahezu verdreifachen
- Wasserstoffbedarf hat eine zentrale Bedeutung in der Stahl- und Chemieindustrie

A.4 Studienergebnisse – Auswertung der Nationalen Studien

A.4.1 Gesamte nationale Energienachfrage

Besonderheiten in einzelnen Studien – 2030 (Abbildung 6):

- Szenarien ISE (2020) – allgemein hohe Endenergienachfragen:
 - Nachfragen stark exogen (wie üblich durch Vorgaben/Prognosen) bedingt
 - Verbrauchsreduktionen oder Energieeffizienzpläne weniger stark betont (Industrienachfrage und Stromnachfrage konstant langfristig; Personenkilometer steigen an; Gebäudewärme berücksichtigt Rebound-Effekt)
- Obwohl die Szenarien in UBA (2019) den allgemeinen Fokus auf effizienten und suffizienten Annahmen (Verkehrsvermeidung, Bedarfsminderung, Materialeffizienz etc.) haben, sticht das „GreenLate“-Szenario 2030 hervor, das erst spät Maßnahmen zum Klimaschutz vorsieht.
- Die Szenarien in UBA (2019) verwenden ab 2030 keine Primärbiomasse mehr zur energetischen Nutzung.
- Szenarien NRW (2019)
 - gekennzeichnet durch einen hohen Grad an Setzungen – keine ökonomische Optimierung bei Anwendungen; Begründung für Setzungen werden kaum gegeben
 - Setzungen z. T. extrem, bspw. 18,5 % Wasserstoff in der Gebäudewärme und 40 % Wasserstoff in der Prozesswärme im H₂-Szenario
- dena (2018)
 - Weist für 2030 keine Daten im 95 %-Szenario aus (nur für das 80 %-Szenario)

Besonderheiten in einzelnen Studien – 2040 (Abbildung 7):

- NRW (2019) weist keine Daten für 2040 aus
- BDI (2018) und dena (2018) weisen für die Gesamt-Endenergieverbrauch (EEV) keine Daten für das Jahr 2040 aus
- Bei den Szenarien in UBA (2019) zeigt sich im Unterschied zu 2030 ab 2040 der Übergang von fossilen Rohstoffen zu erneuerbaren Rohstoffen.
- Die beiden Szenarien in Agora (2020) unterscheidet sich hinsichtlich des THG-Minderungsziels nur durch unterschiedliche Ausprägungen des Umwandlungssektors und, daher differenzieren der EEV und deren Aufteilung für 2040 kaum.
- Für die Szenarien in ISE (2020) zeigt sich ein deutlicher Trend der Substitution fossiler Energieträger durch Strom und Wasserstoff.

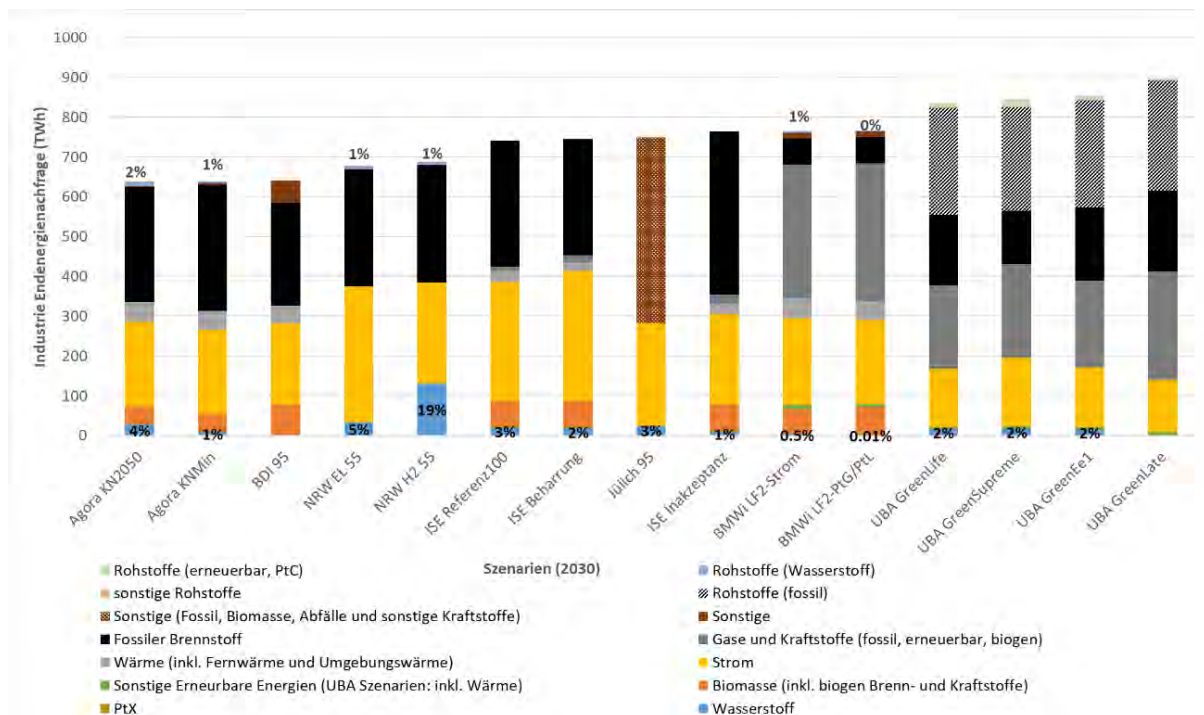
Besonderheiten in einzelnen Studien – 2050 (Abbildung 8):

- Szenarien ISE (2020) – allgemein hohe Endenergienachfragen:
 - Nachfragen stark exogen (wie üblich durch Vorgaben/Prognosen) bedingt

- Verbrauchsreduktionen oder Energieeffizienzpläne weniger stark betont (Industrienachfrage und Stromnachfrage konstant langfristig; Personenkilometer steigen an; Gebäudewärme berücksichtigt Rebound-Effekt) außer beim Szenario „Suffizienz“
- Die Szenarien in ISE (2020) ergeben einen insgesamt hohen Wasserstoff- und PtX-Bedarf für 2050.
- UBA-Szenarien (2019) – geringe Endenergienachfrage (außer „GreenLate“):
 - Fokus auf effizienten und suffizienten Annahmen (Verkehrsvermeidung, Bedarfsminde- rung, Materialeffizienz etc.)
 - deutlicher Bevölkerungsrückgang auf 71,9 Mio. im Jahr 2050
- Bei den Szenarien in UBA (2019) zeigt sich im Unterschied zu 2040 nun der abgeschlossene Übergang zu erneuerbaren Rohstoffen (kein fossiler Feedstock mehr).
- Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) sieht für 2050: 110 bis 380 TWh
- Strukturkonservative Szenarien basieren auf vielen Setzungen und sind nicht wirtschaftlich op- timiert – daraus folgen hohe Kosten für den Klimaschutz.
- Effizienz und Suffizienz unterstellen starke Verhaltensänderungen
- Szenarien in NRW (2019)
 - Gekennzeichnet durch einen hohen Grad an Setzungen – keine ökonomische Optimierung bei Anwendungen!
 - Setzungen z. T. extrem, bspw. 39,5 % Wasserstoff in der Gebäudewärme und 80 % Wasser- stoff in der Prozesswärme im Szenario „H₂“
 - Geringe Endenergienachfrage durch
 - starken Rückgang des Wärmebedarfs im Gebäudesektor von 875 TWh (historisch) auf 365 TWh (2050)
 - Ausklammerung des Imports von erneuerbarem Methanol für die Petrochemie
 - kein Wachstum im Industriesektor
- BDI (2018)
 - Import von 340 TWh synthetischen Brennstoffen
 - Biomasse-Nutzung hauptsächlich in der Industrie
 - CCS bei Industrie und Energiesektor
- dena (2018)
 - Stromnachfrage im Elektrifizierungsszenario von 1.156 TWh
 - CCS 16 Mt (nur Industrie)

A.4.2 Nationale Energienachfrage im Industriesektor

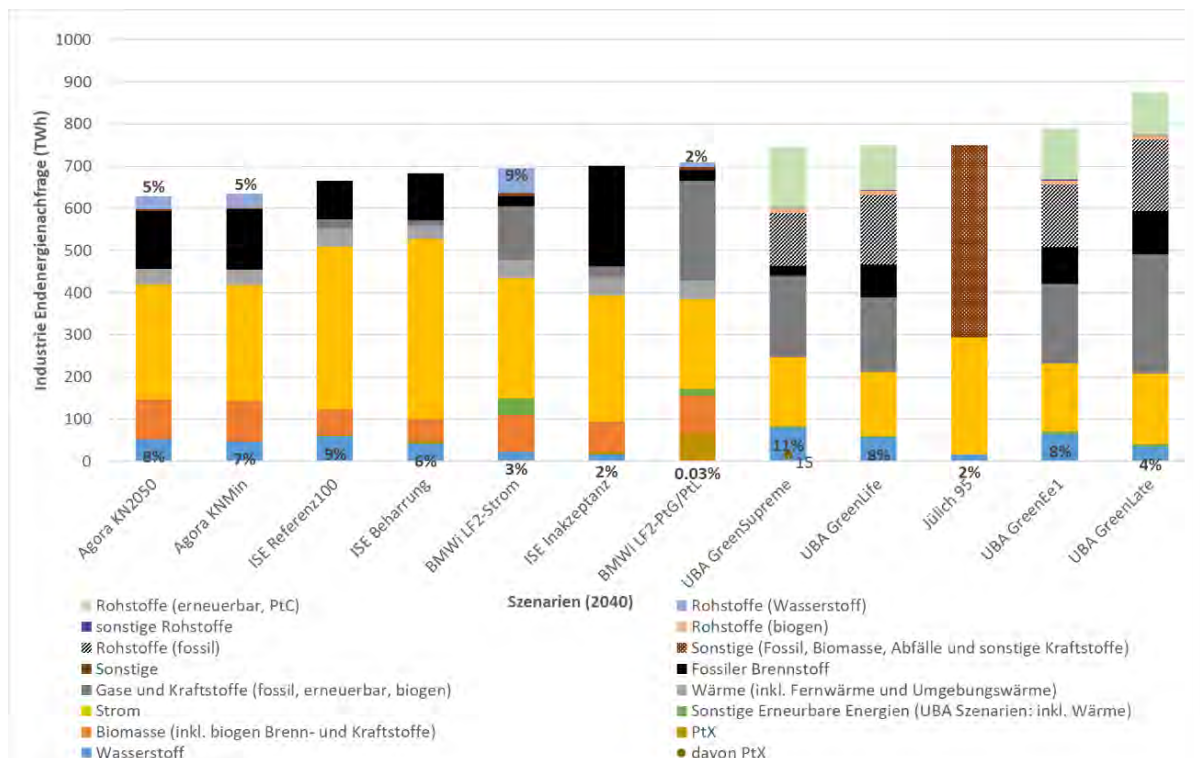
Abbildung 49: Nationale Endenergienachfrage im Industriesektor in 2030



Endenergieverbrauch im Industriesektor im Jahr 2030 (Abbildung 48):

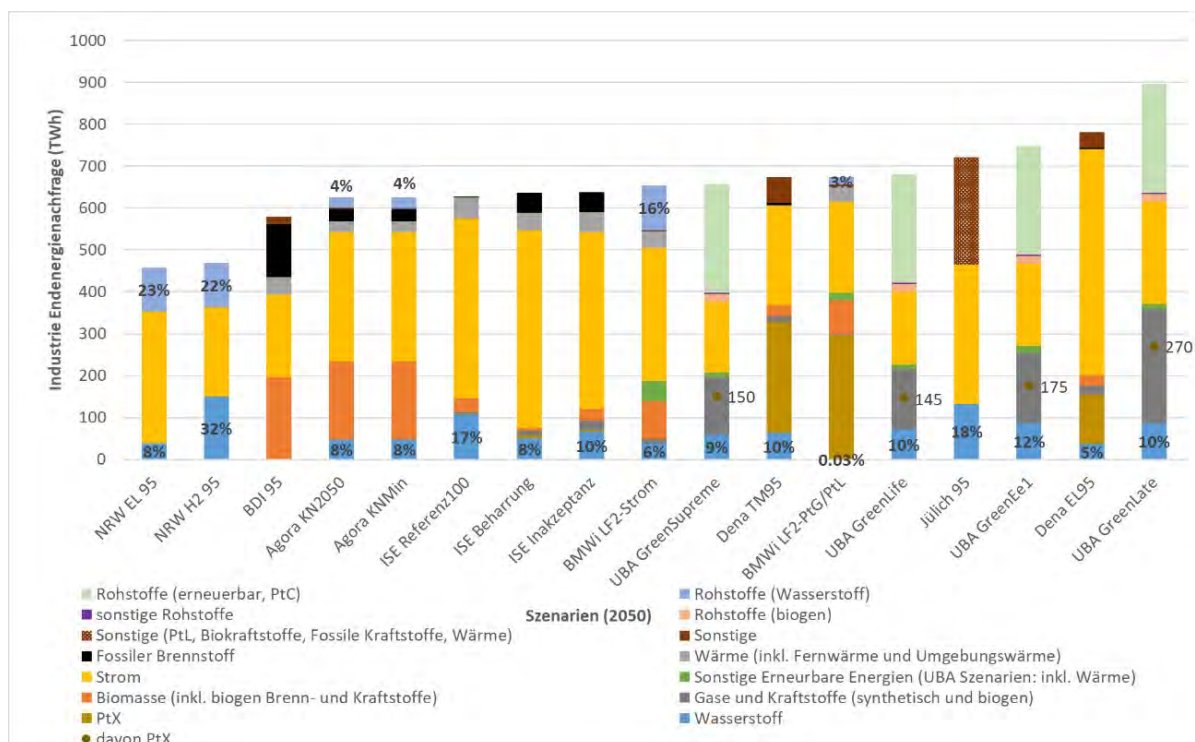
- Bandbreiten H₂, Syntheseprodukte und Biomasse – ohne NRW (2019):
 - H₂, Syntheseprodukte und Biomasse: 5 bis 90 TWh
(UBA (2019) Szenario „GreenLate“ – ISE (2020) Szenario „Beharrung“)
 - H₂: 0 bis 38 TWh
(BDI (2019) „95“ & UBA (2019) „GreenLate“ – Agora (2020) „KN2050“)
 - Syntheseprodukte: 0 bis 20 TWh
(7 Szenarien – UBA (2019) „GreenSupreme“)
- Wasserstoffnachfrage ist noch gering – Ausnahme: Szenarien in NRW (2019) bzw. nicht vorhanden in BDI (2018) und UBA (2019) „GreenLate“
- Strom nimmt weiterhin eine wichtige, aber keine übergeordnete Rolle ein – Ausnahme Szenarien in NRW (2019)
- fossile Energieträger haben weiterhin eine zentrale Bedeutung
- keine Biomassenachfrage in UBA (2019), NRW (2019) und Jülich (2019)

Abbildung 50: Nationale Endenergienachfrage im Industriesektor in 2040



Endenergieverbrauch im Industriesektor im Jahr 2040 (Abbildung 49):

- Bandbreiten H₂, Syntheseprodukte und Biomasse – ohne NRW (2019):
 - H₂, Syntheseprodukte und Biomasse: 92 bis 185 TWh (ISE (2020) „Inakzeptanz“ – UBA (2019) „GreenEe1“)
 - H₂: 11 bis 79 TWh (bis 84 TWh inkl. H₂ als Rohstoffe) (BMWi (2021) „LF2-PtG/PtL“ – UBA (2019) „GreenSupreme“, Agora (2020) „KN2050“)
 - Syntheseprodukte: 0 bis 15 TWh (bis 160 TWh inkl. Syntheseprodukte Rohstoffe) (4 Szenarien – UBA (2019) „GreenSupreme“)
- Die Bedeutung von fossilen Energieträgern nimmt im Vergleich zum Jahr 2030 deutlich ab.
- Alle Studien, die Angaben zum Jahr 2040 machen, sehen eine Bedeutung für H₂ in der Industrie.
- Szenarien in BMWi (2021) sehen bereits eine relevante PtX-Nachfrage
- Die Bedeutung von Strom nimmt in den meisten Szenarien zu.
- Der Anteil an Biomasse steigt, u. a. auch weil die Gesamtenergienachfrage abnimmt.

Abbildung 51: Nationale Endenergienachfrage im Industriesektor in 2050**Endenergieverbrauch im Industriesektor im Jahr 2050 (Abbildung 50):**

- Bandbreiten H₂, Syntheseprodukte und Biomasse – ohne NRW (2019)
 - H₂, Syntheseprodukte und Biomasse: 64 bis 521 TWh (ISE (2020) „Beharrung“ – UBA (2019) „GreenEe1“)
 - H₂: 18 bis 146 TWh (BMWi (2021) „LF2-PtG/PtL“ – BMWi (2021) „LF2-Strom“) – Ausnahme: BDI (2018) „95“ mit 0 TWh)
 - Syntheseprodukte: 0 bis 270 TWh (bis 530 TWh inkl. Syntheseprodukte Rohstoffe; 7 Szenarien mit 0 – UBA (2019) „GreenLate“)
- Nahezu alle Szenarien haben keine Nachfrage nach fossilen Energieträgern mehr – Ausnahmen: BDI (2018), Agora (2020) und ISE (2020)
- BDI (2018) und Agora (2020) sehen große Bedeutung für Biomasse im Industriesektor
- Dena (2018) „Elektifizierungsszenario“ und ISE (2020) „Beharrung“ haben hohe Anteile an direkter Stromnachfrage
- Höchster Anteil an fossilen Energien sieht BDI (2018)
- NRW (2019) „H₂“: Hoher H₂-Bedarf durch 80 % H₂ in der Prozesswärme (Setzung)

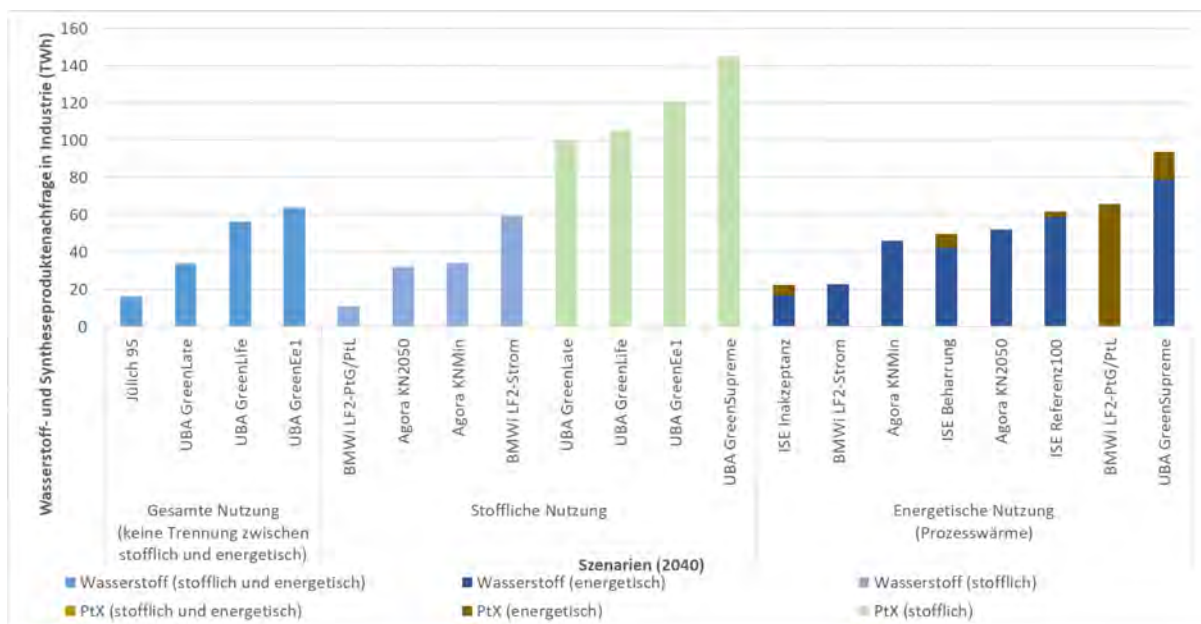
Besonderheiten in einzelnen Studien – Industrie 2050:

- BDI (2018)
 - CO₂-Reduktion im Industriesektor wird über CCS und den verstärkten Einsatz von Biomasse erzielt
 - als älteste der untersuchten Studien ist sie im Bereich Wasserstoff sehr zurückhaltend
- dena (2018)
 - Im Elektrifizierungsszenario wird 70 % des Endenergieverbrauchs im Industriesektor direkt über Strom abgedeckt. Im „Technologiemixszenario“ sind es nur 35 %.
 - Anwendung von CCS für 16 Mt CO₂
- Jülich (2019)
 - Wasserstoffeinsatz für HT-Prozesswärme (22 % H₂, 72 % Biomasse) sowie Stahlproduktion (23 M t über DRI-Route)
 - hohe Gesamtnachfrage durch hohe Steigerung der Bruttowertschöpfung
- NRW (2019)
 - Fortschreibung der Produktionsmengen im Industriesektor, kein Wachstum

Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage der Industrie in 2030: Stoffliche vs. Energetische Nutzung (Abbildung 9):

- Bandbreiten H₂ (außer BDI (2018) „95“ und UBA (2019) „GreenLate“ ohne H₂-Einsatz):
 - Gesamte Nutzung: 14-140 TWh
 - Stoffliche Nutzung: 0-11 TWh
 - Energetische Nutzung: 0-131 TWh
- Bandbreiten Syntheseprodukte (außer BDI (2018) „95“ ohne PtX-Einsatz):
 - Gesamte Nutzung: 0-20 TWh
 - Stoffliche Nutzung: 0-20 TWh
 - Energetische Nutzung: 0-11 TWh

Abbildung 52: Nationale Wasserstoff- und Syntheseproduktenachfrage in Industriesektor in 2040: stoffliche vs. energetische Nutzung



Wasserstoff- und Syntheseproduktenachfrage der Industrie in 2040: Stoffliche vs. Energetische Nutzung (Abbildung 51):

- Bandbreiten Wasserstoff:
 - Gesamte Nutzung: 11-84 TWh
 - Stoffliche Nutzung: 0-60 TWh
 - Energetische Nutzung: 0-79 TWh
- Bandbreiten Syntheseprodukte:
 - Gesamte Nutzung: 0-160 TWh
 - Stoffliche Nutzung: 0-145 TWh
 - Energetische Nutzung: 0-66 TWh

Wasserstoff- und Syntheseproduktenachfrage der Industrie in 2050: Stoffliche vs. Energetische Nutzung (Abbildung 10):

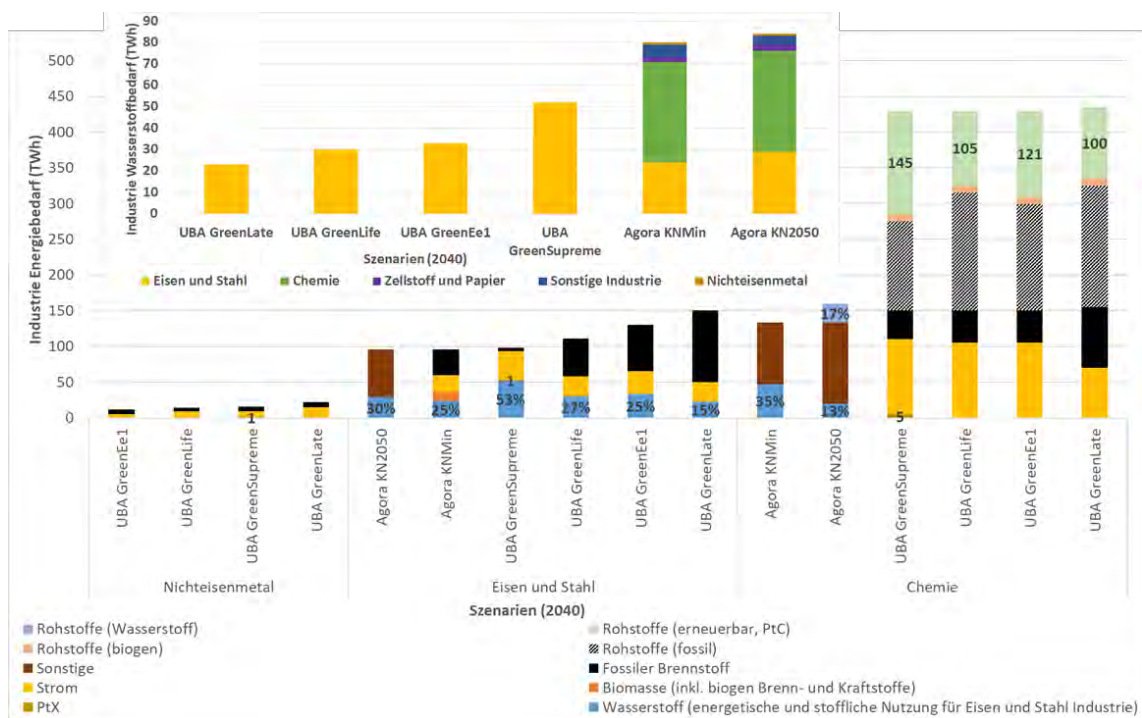
- Bandbreiten H₂ (außer BDI (2018) „95“ ohne H₂-Einsatz):
 - Gesamte Nutzung: 18-255 TWh
 - Stoffliche Nutzung: 0-107 TWh
 - Energetische Nutzung: 0-150 TWh
- Bandbreiten Syntheseprodukte (außer BDI (2018) „95“ ohne PtX-Einsatz):
 - Gesamte Nutzung: 0-530 TWh
 - Stoffliche Nutzung: 0-260 TWh
 - Energetische Nutzung: 0-294 TWh

Nationaler Energiebedarf in Industriebranchen

2030: Industrie Energiebedarf (Abbildung 11):

- nicht viele Studien weisen Daten differenziert nach Industriebranche aus
- Bandbreite H₂:
 - Eisen und Stahl: 0-25 TWh
 - Chemie: 0-15 TWh
 - Ammoniak: 0-7 TWh
 - Nicht-Eisenmetalle: 0 TWh
- Bandbreite Syntheseprodukte:
 - Eisen und Stahl: 0 TWh
 - Chemie: 0-20 TWh
 - Nicht-Eisenmetalle: 0 TWh
- ein Teil der Studien weisen Wasserstoffeinsatz stark in Eisen und Stahl und Chemie auf

Abbildung 53: Nationaler Energiebedarf (unten groß) und Wasserstoffbedarf (oben klein) in Industriebranchen in 2040



2040: Industrie Energiebedarf (Abbildung 52):

- Bandbreite Wasserstoff:
 - Eisen und Stahl: 23-52 TWh
 - Chemie: 0-47 TWh
 - Nicht-Eisenmetalle: 0-1 TWh
 - Sonstige Industrie: 0-6 TWh (Agora (2020): Mineralölverarbeitung)

- Bandbreite Syntheseprodukte:
 - Eisen und Stahl: 0-1 TWh
 - Chemie: 0-150 TWh
 - Nicht-Eisenmetalle: 0-1 TWh
- erhöhte Wasserstoffbedarfe in Eisen und Stahl und Chemie Industrie im Vergleich zu 2030
- einige Szenarien weisen einen kleinen Wasserstoff- und Syntheseproduktanteil in der Nicht-Eisenmetall-Industrie und in der Mineralölverarbeitung auf

2050: Industrie Energiebedarf (Abbildung 12):

- Bandbreite Wasserstoff:
 - Eisen und Stahl: 36-69 TWh
 - Chemie: 0-34 TWh
 - Nicht-Eisenmetalle: 0-3 TWh
 - Ammoniak: 0-15 TWh
- Bandbreite Syntheseprodukte:
 - Eisen und Stahl: 0-33 TWh
 - Chemie: 0-290 TWh
 - Nicht-Eisenmetalle: 0-9 TWh
- steigende Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarfe in Eisen und Stahl und Chemieindustrie

Nationale Energienachfrage im Gebäude-/GHD& HH-Sektor

2030: Sehr geringe bzw. keine Wasserstoff- und Syntheseprodukte-Nachfrage im Gebäude-/GHD&HH-Sektor (Abbildung 13):

- Bandbreiten H₂, Syntheseprodukte und Biomasse:
 - H₂, Syntheseprodukte und Biomasse: 0 bis 105 TWh
(4 Szenarien – Agora (2020) „KN2050“) – Ausnahme NRW (2019) „H₂ 55“: 146 TWh)
 - H₂: 0 bis 1 TWh
(Ausnahme NRW (2019): 33 & 146 TWh)
 - Syntheseprodukte: 0 bis 17 TWh
(11 Szenarien – ISE (2020) „Beharrung“)
- in NRW (2019) wurde der Wasserstoffbedarf exogen gesetzt (keine wirtschaftliche Betrachtung)
- dena (2018) enthält keine sektoralen Zwischenziele und daher keine sektoralen Daten für 2030 und 2040

2040: Im Gebäude-/GHD&HH-Sektor große Konkurrenz durch Biomasse und sonstige erneuerbare Energien (Abbildung 14):

- Bandbreiten H₂, Syntheseprodukte und Biomasse:

- H₂, Syntheseprodukte und Biomasse: 9 bis 154 TWh
(Jülich (2019) „95“ – BMWi (2021) „LF2-PtG/PtL“) – Ausnahme: 3 Szenarien in UBA (2019) mit 0 TWh)
- H₂: 0 bis 15 TWh
(8 Szenarien – ISE (2020) „Referenz“) – Ausnahme: ISE (2020) „Beharrung“ mit 63 TWh)
- Syntheseprodukte: 0-18 TWh
(7 Szenarien – UBA (2019) „GreenSupreme“) – Ausnahme: ISE (2020) „Beharrung“ und BMWi (2021) „LF2-PtG/PtL“ mit 34 & 66 TWh)
- deutlicher Anstieg des Wasserstoffbedarfs in 2040 in den Szenarien in ISE (2020)
- kein signifikanter Wasserstoffbedarf in 2040 in den meisten Szenarien außer in Jülich (2019) und ISE (2020)

2050: Im Gebäude-/GHD&HH-Sektor starke Divergenz bezüglich des Wasserstoff- und Syntheseprodukteinsatzes (Abbildung 15):

- Bandbreiten H₂, Syntheseprodukte und Biomasse:
 - H₂, Syntheseprodukte und Biomasse: 17-202 TWh
(BDI (2018) „95“ – dena (2018) „TM95“) – Ausnahme: BMWi (2021) „LF2-PtG/PtL“: 281 TWh)
 - H₂: 0 bis 36 TWh
(11 Szenarien – NRW (2019) „EL 95“) – Ausnahmen: ISE (2020) „Inakzeptanz“ und „Beharrung“, NRW (2019) „H₂ 95“ mit 76-169 TWh)
 - Syntheseprodukte: 0 bis 80 TWh
(6 Szenarien – UBA (2019) „GreenLate“) – Ausnahme: dena (2018) „TM95“ und BMWi (2021) „LF2-PtG/PtL“ 151 & 199 TWh)
- Szenarien in NRW (2019) sehen hohe Wasserstoffnachfrage, die jedoch kein Ergebnis der Optimierung ist, sondern auf Setzungen beruht
- Strom und Umgebungswärme sowie Fernwärme dominieren insgesamt im Gebäudesektor in 2050
- Der Gesamt-EEV ist gegenüber 2030 in einigen Szenarien stark gesunken, in anderen nicht (Spreizung)
 - z. T. keine Bilanzierung der Umgebungswärme
 - Unterschiede in den Sanierungsraten und der Entwicklung der Wohnfläche können weitere Determinanten sein
- Szenarien in dena (2018) fassen Wasserstoff und Syntheseprodukte (als PtX in der Abbildung dargestellt) für Gebäudesektor zusammen

Nationale Energienachfrage im Verkehrssektor

2030: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor (Abbildung 16):

- Bandbreiten H₂, Syntheseprodukte und Biomasse – ohne NRW (2019):
 - H₂, Syntheseprodukte und Biomasse: 3-57 TWh
(ISE (2020) „Inakzeptanz“ – BMWi (2021) „LF2-PtG/PtL“)
 - H₂: 0 bis 21 TWh
(6 Szenarien – Jülich (2019) „95“)

- Syntheseprodukte: 0-10 TWh
(4 Szenarien – UBA (2019) „GreenLife“ und „GreenEe1“) – Ausnahme: UBA (2019) „GreenSupreme“ 40 TWh)
- Struktur-konservative Szenarien und Szenarien mit hoher Effizienz und Suffizienz bilden Randbereiche
- nur NRW (2019) „H₂ 55“ weist größere Anteile von H₂ aus (nicht plausibel wegen hohen Anteilen an BZ-Fahrzeugen)
- von den Alternativen gewinnen die strombasierten größere Anteile
- eine mögliche Rolle der Biomasse wird stark unterschiedlich gewertet

2040: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor (Abbildung 17):

- Bandbreiten H₂, Syntheseprodukte und Biomasse – ohne NRW (2019):
 - H₂, Syntheseprodukte und Biomasse: 46-161 TWh
(Agora (2020) „KN2050“ – BMWi (2021) „LF2-PtG/PtL“)
 - H₂: 0 bis 101 TWh
(4 Szenarien in UBA (2019) – ISE (2020) „Referenz 100“)
 - Syntheseprodukte: 0 bis 125 TWh
(Jülich (2019) „95“, BMWi (2021) „LF2-Strom“ – UBA (2019) „GreenSupreme“ und „GreenLate“)
- die alternativen Kraftstoffe gewinnen größere Marktanteile, in vielen Studien noch dominiert von Strom
- Auswirkungen der Effekte der Struktur-konservativen Szenarien und Szenarien mit hoher Effizienz und Suffizienz werden deutlicher gegenüber 2030

2050: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor (Abbildung 18):

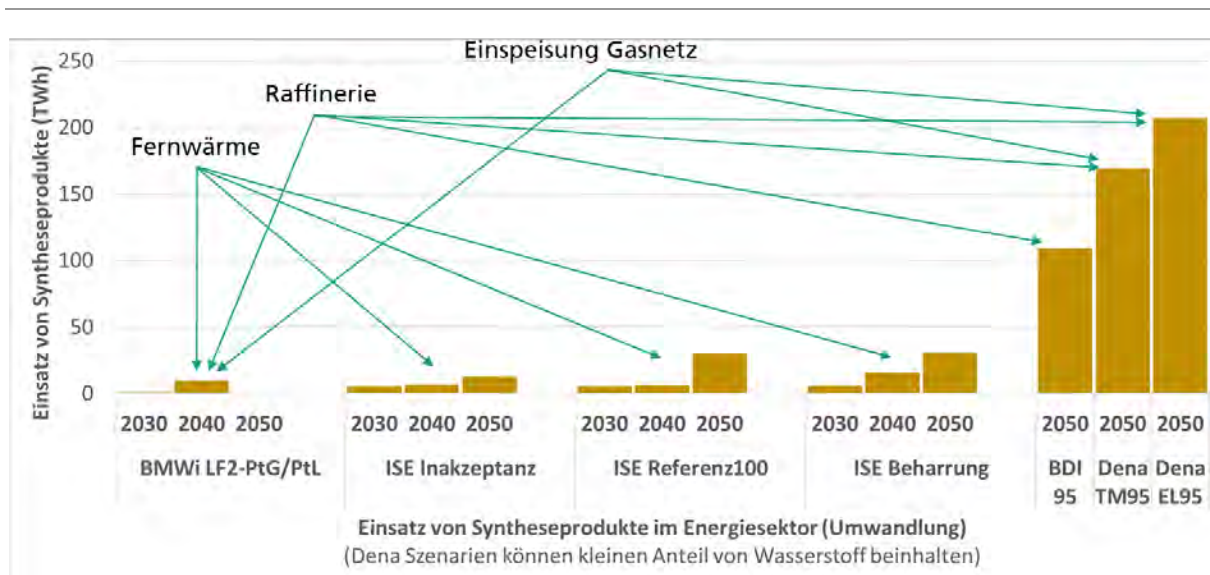
- Bandbreiten H₂, Syntheseprodukte und Biomasse – ohne NRW (2019), ISE (2020) „Beharrung“:
 - H₂, Syntheseprodukte und Biomasse: 110-400 TWh
(UBA (2019) „GreenSupreme“ – BMWi (2021) „LF2-PtG/PtL“)
 - H₂: 0 bis 174 TWh
(5 Szenarien – ISE (2020) „Inakzeptanz“, „Referenz100“)
 - Syntheseprodukte: 0 bis 268 TWh
(4 Szenarien- BDI (2018) „95“)
- fossile Energieträger kommen nicht mehr vor – Ausnahme ISE (2020) „Inakzeptanz“ und „Beharrung“)
- H₂ und synthetische Kraftstoffe spielen neben Strom eine sehr wichtige Rolle
- das Verhältnis von H₂ und Syntheseprodukten wird stark unterschiedlich bewertet
- Auswirkungen von struktur-konservativen Szenarien und Szenarien mit hoher Effizienz und Suffizienz ist sehr deutlich

Nationaler Wasserstoff- und Syntheseproduktbedarf im Energiesektor (Umwandlung)

Wasserstoffeinsatz im Energiesektor (Umwandlung) (Abbildung 22):

- deutlich unterschiedliche Abgrenzungen (Vergleichbarkeit eingeschränkt)
- Bandbreiten H₂-Einsatz:
 - 2030: 0-20 TWh (Agora (2020) „KNMin“ – Agora (2020) „KN2050“)
 - 2040: 1-288 TWh (BMWi (2021) „LF2-Strom“ (Variante GH2) – (Variante Import H₂))
 - 2050: 49-292 TWh (ISE (2020) „Referenz 100“ – BMWi (2021) „LF2-Strom“ (Variante Import H₂))
- je mehr Direktelektrifizierung in Nachfragesektoren, umso höher der H₂-Bedarf

Abbildung 54: Einsatz von Syntheseprodukten im Energiesektor (Umwandlung) in 2030, 2040 und 2050



Syntheseprodukteneinsatz im Energiesektor (Umwandlung) (Abbildung 53):

- deutlich unterschiedliche Abgrenzungen (Vergleichbarkeit eingeschränkt)
- Bandbreiten des Syntheseprodukteneinsatzes:
 - 2030: 1 TWh
 - 2040: 10 TWh
 - 2050: 0-207 TWh (BMWi (2021) „LF2-PtG/PtL“ – dena (2018) „EL95“)
- BDI (2018) sieht kein H₂ (bis max. 13 TWh in dena (2018)) im Umwandlungssektor

Importquoten Syntheseprodukte

Abbildung 55: Nationale Importquoten Syntheseprodukte in 2030, 2040 und 2050



Nationale Importquoten der Syntheseprodukte 2030 bis 2050 (Abbildung 54):

- Importquoten Syntheseprodukte
 - Bandbreite 2030: 90 bis 100 %
 - Bandbreite 2040: 93 bis 100 %
 - Bandbreite 2050: 79 bis 100 %
 - Trend: generell sehr hohe Importquoten für Syntheseprodukte, ab 2050 erschließt sich in den Szenarien in UBA (2019) z. T. auch ein Heimmarkt
- dena (2018): Importquote Wasserstoff- und Syntheseprodukte:
 - 2040: 22-23 %
 - 2050: 74 % („EL95“) bis 82 % („TM95“)
- BDI (2018): Importquote Wasserstoff- und Syntheseprodukte
 - 2050: 89 %
- Setzung Agora (2020): Importquote Syntheseprodukte = 100 % (2030-2050)
- NRW (2019) betrachtet Import von Syntheseprodukten nur in Sensitivitätsanalyse

A.5 Übersicht relevanter Einsatzgebiete von Wasserstoff und Syntheseprodukten sowie Konkurrenzsituation

Anwendungsbereich	Bisherige (fossil-basierte) Technologie/Energieträger	Direkte Elektrifizierungsoptionen	Wasserstoff/Synthesetechnologien/Energieträger	Sonstige erneuerbare Energieträger
Verkehr				
PKW	Otto- und Dieselmotoren Gasbetriebene PKW	Batteriebetriebene PKW	Brennstoffzellenfahrzeuge Synthetische Kraftstoffe	Biokraftstoffe
Lkw Verteilverkehr, kleine Gewichtsklassen	Otto- und Dieselmotoren Fahrzeuge	Batteriebetriebene LKW	Brennstoffzellenfahrzeuge Synthetische Kraftstoffe	Biodiesel, aufgereinigtes Biogas
Lkw schwerer Straßen-güterverkehr	Dieselmotoren Gasbetriebene Fahrzeuge	Oberleitungen auf Autobahnen Batteriebetriebene LKW mit Hochleistungs-laden	Brennstoffzellenfahrzeuge Synthetische Kraftstoffe	Biodiesel, aufgereinigtes Biogas
Schienenverkehr	Elektrischer Antrieb Dieselmotoren	Elektrifizierung nicht-elektrifizierter Strecken	Brennstoffzellenantriebe Batteriebetriebene Synthetische Kraftstoffe	Biodiesel
Flugverkehr, europäisch	Turbinen (Kerosin)	Batteriebetrieben (eingeschränkt)	Brennstoffzellenantriebe Synthetisches Kerosin	Biobasiertes Kerosin
Flugverkehr, kontinental	Turbinen (Kerosin)	Keine Technologien absehbar	Synthetisches Kerosin	Biobasiertes Kerosin
Schiffsverkehr, europäisch	Schiffsmotoren (Schweröl, Diesel), künftig mehr LNG	Batteriebetrieben (eingeschränkt)	Brennstoffzellenantrieb Synthetischer Diesel Synthetisches LNG	Biodiesel, aufgereinigtes Biogas
Schiffsverkehr, international	Schiffsmotoren (Schweröl, Diesel), künftig mehr fossiles LNG	Keine Technologien absehbar	Synthetischer Diesel Synthetisches LNG	Biodiesel, aufgereinigtes Biogas
Anwendungsbereich	Bisherige Technologie	Direkte Elektrifizierungsoptionen	Wasserstoff/Synthesetechnologien	Sonstige erneuerbare Energieträger
Industrie				
Industrielle Prozesswärme	Gasbrenner Dampf	Elektrodenkessel Induktionsheizung Plasmaverfahren Widerstandsheizung Wärmepumpen	Synthetische Brennstoffe Wasserstoff	Biomasse/-gas
Stahl (Primärroute)	Oxygenstahl/Hochofenroute (Koks, Kohle, fossile Gase)	Nur Prozesswärme	Direktreduktion mittels Wasserstoffes/Synthesegas + Elektrolichtbogenofen	Biomasse/-gas
Chemikalien	Erdöl- und erdgasbasierte Grundchemikalien	Nur Prozesswärme	Synthetische Grundstoffe	Biomasse/-gas
Ammoniak	Erdgasbasiert Erzeugung	Nur Prozesswärme	Wasserstoff (Kohlenwasserstoffe möglich)	Biomasse/-gas
Niedertemperaturwärme für Haushalte, Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen				
Niedertemperaturwärme	Öl-, Gasheizung, Fernwärme	Wärmepumpen, Widerstandsheizung	Synthetisches Gas substituiert Erdgas	Biomasse/-gas
Anwendungsbereich	Bisherige Technologie	Direkte Elektrifizierungsoptionen	Wasserstoff/Synthesetechnologien	Sonstige erneuerbare Energieträger
Stromversorgung				
Kurzfristige Stabilisierung des Stromnetzes, Bereitstellung von Flexibilität	Flexibler Kraftwerkseinsatz Demand Side Management (DSM)/Demand Side Response (DSR) Flexibilisierung der Nachfrage Netzausbau	Stromspeicher (Pumpspeicher, Batterien, ...)	Flexible Betriebsweise der Elektrolyse	Flexible Stromerzeugung aus Biomasse
Stabilisierung des Stromnetzes aufgrund strukturellen Fehlens erneuerbarer Stromerzeugung (z. B. Dunkelflaute)	Flexibler Kraftwerkseinsatz Demand Side Management (DSM)/ Demand Side Response (DSR) Konventionelle Speicher	Keine Technologien absehbar	Synthetisches Gas zur Rückverstromung in Kraftwerken oder Brennstoffzellen Wasserstoffspeicher Synthesegaspeicher	Flexible Stromerzeugung aus Biomasse
Sonstige Umwandlungssektor				
Raffinerie	Fossiler Wasserstoff (überwiegend Erdgas) zur z. B. Entschwefelung oder das Hydrocracken	Nur Prozesswärme (komplexe interne Energieflüsse)	Grüner Wasserstoff ersetzt fossilen Wasserstoff	Biomasse/-gas

Quelle: In Anlehnung und mit eigenen Erweiterungen an Ausfelder et al. (2019): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X-Technologien – Nachhaltigkeitseffekte – Potentiale – Entwicklungsmöglichkeiten. Dechema: Frankfurt a.M.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gesamte Endenergienachfrage in der EU im Jahre 2030.....	18
Abbildung 2:	Gesamte Endenergienachfrage in der EU im Jahre 2050.....	18
Abbildung 3:	Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage in den Nachfragesektoren in der EU im Jahre 2050	19
Abbildung 4:	Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage in den Nachfragesektoren in Deutschland in 2030, 2040 und 2050.....	20
Abbildung 5:	Wasserstoffnachfrage in den Nachfragesektoren in Deutschland in 2030, 2040 und 2050	21
Abbildung 6:	Nationaler Endenergieverbrauch in Deutschland in 2030.....	22
Abbildung 7:	Nationaler Endenergieverbrauch in Deutschland in 2040.....	23
Abbildung 8:	Nationaler Endenergieverbrauch in Deutschland in 2050.....	23
Abbildung 9:	Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage in der Industrie in 2030: Stoffliche und energetische Nutzung.....	24
Abbildung 10:	Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage in der Industrie in 2050: Stoffliche und energetische Nutzung.....	25
Abbildung 11:	Industrie Energiebedarf sowie stoffliche Wasserstoffbedarfe in 2030	25
Abbildung 12:	Industrie Energiebedarf sowie stoffliche Wasserstoffbedarfe in 2050	26
Abbildung 13:	Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage im Gebäude-/GHD&HH-Sektor im Jahre 2030.....	27
Abbildung 14:	Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage im Gebäude-/GHD&HH-Sektor im Jahre 2040.....	27
Abbildung 15:	Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage im Gebäude-/GHD&HH-Sektor im Jahre 2050.....	28
Abbildung 16:	Gesamtenergiebedarf im Verkehr 2030	29
Abbildung 17:	Gesamtenergiebedarf im Verkehr 2040	29
Abbildung 18:	Gesamtenergiebedarf im Verkehr 2050	30
Abbildung 19:	Energiebedarf im Verkehr 2030 differenziert nach Anwendungen.....	31
Abbildung 20:	Energiebedarf im Verkehr 2040 differenziert nach Anwendungen.....	31
Abbildung 21:	Energiebedarf im Verkehr 2050 differenziert nach Anwendungen.....	32
Abbildung 22:	Wasserstoffnachfrage im Umwandlungssektor in Deutschland in 2030, 2040 und 2050.....	33
Abbildung 23:	Importquote Wasserstoff in 2030, 2040 und 2050	34
Abbildung 24:	Installierte Elektrolysekapazität im Land in 2030, 2040 und 2050.....	35
Abbildung 25:	Übersicht über Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage (PtX) in den verschiedenen Sektoren (ohne extreme Ausreißer bei den Studien/Szenarien zu berücksichtigen).....	38
Abbildung 25:	Studienprofil: COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT – IMPACT ASSESSMENT (EC, 2020)	44
Abbildung 26:	Studienprofil: Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050 (JRC, 2020)	44
Abbildung 27:	Studienprofil: In-Depth Analysis in Support of the COMMISSION COMMUNICATION COM(2018) 773 – A Clean Planet for all – A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy (EC, 2018) – Übersicht (oben) und Methodik (unten).....	45

Abbildung 28:	Studienprofil: Industrial Innovation – Pathways to deep decarbonisation of industry Part 2 (EC, 2019).....	46
Abbildung 29:	Studienprofil: Klimapfade für Deutschland (BDI, 2018) – Übersicht (oben) und Methodik (unten).....	47
Abbildung 30:	Studienprofil: dena-Leitstudie – Integrierte Energiewende (dena, 2018) – Übersicht (oben) und Methodik (unten).....	48
Abbildung 31:	Studienprofil: Leitstudie – Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung der nachhaltigen Entwicklung sowie regionaler Aspekte – Übersicht (oben) und Methodik (unten) (BMW, 2021).....	49
Abbildung 32:	Studienprofil: Klimaneutrales Deutschland (Agora, 2020) – Übersicht (oben) und Methodik (unten).....	50
Abbildung 33:	Studienprofil: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität (UBA, 2019) – Übersicht (oben) und Methodik (unten).....	51
Abbildung 34:	Studienprofil: Wege zu einem Klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen (ISE, 2020) – Übersicht (oben) und Methodik (unten).....	52
Abbildung 35:	Studienprofil: WEGE FÜR DIE ENERGIEWENDE (Jülich, 2019) – Übersicht (oben) und Methodik (unten).....	53
Abbildung 36:	Studienprofil: Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen (NRW, 2019) – Übersicht (oben) und Methodik.....	54
Abbildung 37:	Studienprofil: Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe (BMU, 2020).....	55
Abbildung 38:	Übersicht zum methodischen Ansatz in den Systemstudien für Deutschland.....	55
Abbildung 39:	THG-Minderungsprojektionen der EU-Studien (seit 1990).....	60
Abbildung 40:	THG-Minderungsprojektionen der EU-Studien (seit 2015).....	60
Abbildung 41:	Industrienachfrage in der EU in 2030.....	62
Abbildung 42:	Industrienachfrage in der EU in 2050.....	62
Abbildung 43:	Nachfrage im Gebäudesektor in der EU in 2030.....	64
Abbildung 44:	Nachfrage im Gebäudesektor in der EU in 2050.....	64
Abbildung 45:	Nachfrage im Verkehrssektor in der EU in 2030.....	66
Abbildung 46:	Nachfrage im Verkehrssektor in der EU in 2050.....	66
Abbildung 47:	EU-Industrie Energienachfrage in 2050 aus der EU-Industriestudie (Quelle EC 2019).....	68
Abbildung 48:	Nationale Endenergienachfrage im Industriesektor in 2030.....	71
Abbildung 49:	Nationale Endenergienachfrage im Industriesektor in 2040.....	72
Abbildung 50:	Nationale Endenergienachfrage im Industriesektor in 2050.....	73
Abbildung 51:	Nationale Wasserstoff- und Syntheseproduktnachfrage in Industriesektor in 2040: stoffliche vs. energetische Nutzung.....	75
Abbildung 52:	Nationaler Energiebedarf (unten groß) und Wasserstoffbedarf (oben klein) in Industriebranchen in 2040.....	76
Abbildung 53:	Einsatz von Syntheseprodukten im Energiesektor (Umwandlung) in 2030, 2040 und 2050.....	80
Abbildung 54:	Nationale Importquoten Syntheseprodukte in 2030, 2040 und 2050.....	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auswahlkriterien.....	9
Tabelle 2:	Überblick über die Methodik der Studien.....	12
Tabelle 3:	Potentielle Wasserstoff-, Syntheseprodukte- und Biomassepotentiale in den Nachfragesektoren in Deutschland 2030, 2040 und 2050.....	21
Tabelle 4:	Übersicht der EU-Studien.....	42
Tabelle 5:	Übersicht der nationalen Studien	43
Tabelle 6:	Determinantenvergleich – nationale Studien (BDI, 2018; dena, 2018; Agora, 2020; UBA, 2019).....	56
Tabelle 7:	Determinantenvergleich – nationale Studien (ISE, 2020; Jülich, 2019; NRW, 2019; BMWi, 2021).....	58

Literaturverzeichnis

- Agora – Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Version 1.1, November 2020.
- BDI – Boston Consulting Group, Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie e. V. (BDI).
- BMU – Öko-Institut (2020): Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe. Eine Überblickuntersuchung. Öko-Institut e.V. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Berlin.
- BMWi – Fraunhofer ISI, Consentec GmbH, ifeu (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Veröffentlichung in Vorbereitung.
- Dena – Deutsche Energie Agentur (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende, Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin.
- EC – European Commission (2018): A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. In-Depth Analysis in Support of the Commission Communication COM(2018) 773. Brussels. November 2018.
- EC – European Commission (2020): COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT – IMPACT ASSESSMENT. Accompanying the document: COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS – Stepping up Europe’s 2030 climate ambition – Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. EUROPEAN COMMISSION. COM(2020) 562 final. Brussels.
- EC – ICF Consulting Services Limited, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (2019): Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonization of Industry. Part 2: Scenario analysis and pathways to deep decarbonization. A report submitted by the ICF Consulting Services Limited and Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI) to the European Commission, DG Climate Action.
- ECF – European Climate Foundation (2018): Net Zero by 2050: From Whether to How. European Climate Foundation (ECF), 2018.
- Eurelectric (2018): Decarbonisation pathways: Full study results.
- Hydrogen Council (2021): Hydrogen Insights – A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. Collaboration by Hydrogen Council and McKinsey & Company.
- IEA – International Energy Agency (2017): Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). International Energy Agency (IEA), Paris.
- ISE – Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die Deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg.

- JRC – Joint Research Centre (2018): Global Energy and Climate Outlook 2018: Sectoral mitigation options towards a low-emissions economy – Global context to the EU strategy for long-term greenhouse gas emissions reduction. Publications office of the European Union.
- JRC – Joint Research Centre (2020): Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050 – Insights from scenarios in line with the 2030 and 2050 ambitions of the European Green Deal. EUR 29981 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/081488.
- JRC– Joint Research Centre (2018): Deployment Scenarios for Low Carbon Energy Technologies. EUR 29496 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/249336.
- Jülich – Forschungszentrum Jülich (2019): WEGE FÜR DIE ENERGIEWENDE – Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 499. ISBN 978-3-95806-483-6. Forschungszentrum Jülich 2020.
- Matthes, C.; Aruffo, V.; Retgy-Pradeau, L. (2020): The Risks and Opportunities of Green Hydrogen Production and Export From the Mena Region to Europe. Dii Desert Energy. Study on behalf of the Friedrich-Ebert Stiftung.
- Navigant (2019): Gas for Climate. The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system. Navigant Consulting Inc., Utrecht.
- NRW – Ludwig Bölkow Systemtechnik (2019): Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST).
- Öko-Institut (2017): The Vision Scenario for the European Union – 2017 Update for the EU-28, Berlin.
- UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE Studie. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.