



Ariadne-Report

Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045

Szenarien und Pfade im Modellvergleich

KOPERNIKUS
Ariadne **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

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

Herausgegeben von

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

Oktober 2021

DOI: 10.48485/pik.2021.006

Bildnachweise

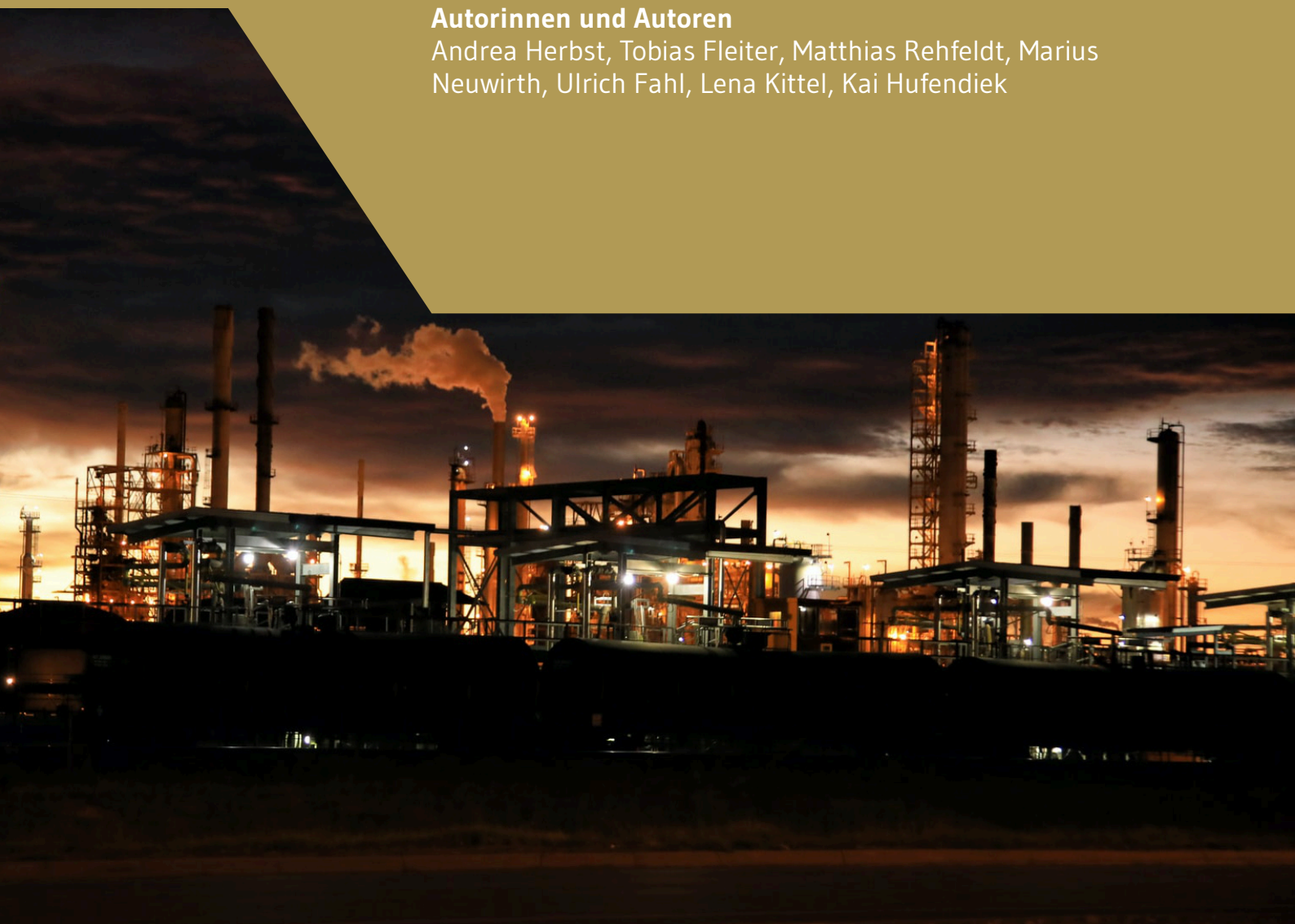
Titel: Yeshi Kangrangz / Unsplash; Zusammenfassung: Andrea Boldizar / Unsplash; Kapitel 1: Ashley Batz / Unsplash; Kapitel 2: funky-data / iStock; Kapitel 3: Julian Hochgesang / Unsplash; Kapitel 4: Robin Sommer / Unsplash; Kapitel 5: huangyifei / iStock; Kapitel 6: audioundwerbung / iStock; Kapitel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

4. Industriewende

4.1	Zusammenfassung	112
4.2	Die Industriewende im Systemkontext	113
4.3	Modellierung der Industriewende	113
4.3.1	<i>Methodik</i>	116
4.3.2	<i>Szenariodefinition und -annahmen</i>	117
4.4	Direkte und indirekte Elektrifizierung	121
4.4.1	<i>Industrielle Emissionen und Energienachfrage</i>	122
4.4.2	<i>Technologieüberblick Wasserstoffeinsatz und direkte Elektrifizierung</i>	125
4.4.3	<i>Einsatz CO₂-neutraler sekundärer Energieträger in den Szenarien</i>	130
4.4.4	<i>Industrielle Eigenerzeugung</i>	132
4.5	Prioritäten für den Zeithorizont 2030	133
4.6	Welche Instrumente und Maßnahmen sind für die Zielerreichung besonders wichtig?	141
4.7	Fazit	143
	Literaturangaben	145

Autorinnen und Autoren

Andrea Herbst, Tobias Fleiter, Matthias Rehfeldt, Marius Neuwirth, Ulrich Fahl, Lena Kittel, Kai Hufendiek



4.1 Zusammenfassung

Die Transformation des Industriesektors steht heute immer noch vor sehr großen Herausforderungen. Der Industriesektor ist verantwortlich für etwa 23 % der Treibhausgas (THG)-Emissionen in Deutschland und somit von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der europäischen Klimaziele. Eine hohe Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen in Kombination mit hohen Temperaturbedarfen, technischen Restriktionen, und prozessbedingten Emissionen aus chemischen Reaktionen im Produktionsprozess, benötigen erhebliche Veränderungen in energieintensiven Industriebranchen aber auch weitgehende Unterstützung für erneuerbare Energien und Effizienz.

Die Szenarien zeigen alternative Pfade zu einer nahezu CO₂-neutralen Industrieproduktion bis zum Jahr 2045. Sie beinhalten ambitionierte Veränderungen des gesamten industriellen Produktionssystems und unterstellen eine tiefgreifende Transformation in vielen Branchen und Wertschöpfungsketten. Die wichtigsten Vermeidungshebel sind Energie- und Materialeffizienz bzw. die Einführung einer Kreislaufwirtschaft, der Prozesswechsel auf sekundäre Produktionsrouten und innovative CO₂-neutrale Verfahren, sowie ein umfassender Einsatz von CO₂-neutralen Sekundärenergieträgern wie Strom, Wasserstoff und synthetisches Methan.

In allen Szenarien werden neben Verbesserungen der Material- und Energieeffizienz hohe Mengen an CO₂-neutralen Sekundärenergieträgern eingesetzt. Abhängig von dem gesetzten Technologie-Schwerpunkt verdoppelt sich der Stromeinsatz nahezu von heute 226 TWh auf bis zu 413 TWh in 2045. Im extremen Fall einer „Wasserstoffwelt“ steigt der industrielle Einsatz von Wasserstoff auf bis zu 342 TWh in 2045, sowohl für die energetische als auch die stoffliche Nutzung. Der Einsatz von synthetischem Methan beträgt im Extremfall 347 TWh in 2045. Der Zuwachs findet vor allem nach 2030 statt, wodurch das Sektorziel in diesem Fall nicht erreicht wird, und ist dazu abhängig von den angenommenen Beimischungsquoten ins Erdgasnetz.

Damit die Umstellung auf eine CO₂-neutrale Industrieproduktion bis zum Jahr 2045 gelingen kann, ist der Zeithorizont bis 2030 entscheidend. Bis dahin muss es gelingen, CO₂-neutrale Verfahren vom Pilot- und Demonstrations-Maßstab auf industrielles Niveau zu skalieren und ihren wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Hohe Investitionen in Neuanlagen sind nötig und Lösungen zur Bereitstellung von CO₂-neutralem Wasserstoff und Strom müssen umgesetzt werden. Ferner verlangt das 2030-Ziel des Klimaschutzgesetzes für den Industriesektor ein Absinken der Emissionen auf 118 MtCO₂äq bis 2030 von 190 Mt im Jahr 2018 und damit bereits bis 2030

grundlegende Umstellungen. Ohne einen substanziellen Einsatz von neuen CO₂-armen/neutralen Produktionsverfahren wie der Herstellung von Stahl über die Direktreduktion ist das Sektorziel nicht zu erreichen.

Entsprechend muss der regulatorische Rahmen eine klare Perspektive für die CO₂-neutrale Produktion bieten. Dies betrifft besonders die Verfügbarkeit und Rolle von CO₂-neutralem Strom, Wasserstoff und Gas. Mittelfristig ist ein Anstieg des CO₂-Preises auf über 100 Euro/tCO₂ nötig, um CO₂-neutrale Verfahren wirtschaftlich betreiben zu können. Gezielte Förderungen von Betriebs- und Investitionskosten sind nötig, solange der CO₂-Preis alleine keine wettbewerbsfähige Investition ermöglicht. Auch grüne Leitmärkte können die Transformation beschleunigen. Über die Grundstoffindustrie hinaus sind CO₂-Preissignale bis in die Verbrauchssektoren entscheidend, um Wertschöpfungsketten am Ziel der CO₂-Neutralität auszurichten. Dabei gilt es, die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu stützen.

4.2 Die Industriegewende im Systemkontext

Mit rund 190 MtCO₂äq ist der Industriesektor für etwa 23 % der THG-Emissionen in **Deutschland** im Jahr 2018 verantwortlich. Die Mehrheit dieser Emissionen werden von Unternehmen der energieintensiven Industriezweige (z. B. Metallerzeugung, Grundstoffchemie, Verarbeitung von Steinen und Erden) verursacht, welche gleichzeitig für etwa 70 % des industriellen Energiebedarfs verantwortlich sind. Gas, Kohle und Strom sind dabei die wichtigsten Energieträger in der Industrie, wobei heute immer noch etwas mehr als die Hälfte des industriellen Endenergieverbrauchs fossilen Ursprungs ist (siehe Abbildung 4.1). Folglich muss der Industriesektor noch erhebliche weitere Anstrengungen unternehmen, um zukünftig auf den Einsatz fossiler Brennstoffe verzichten zu können.

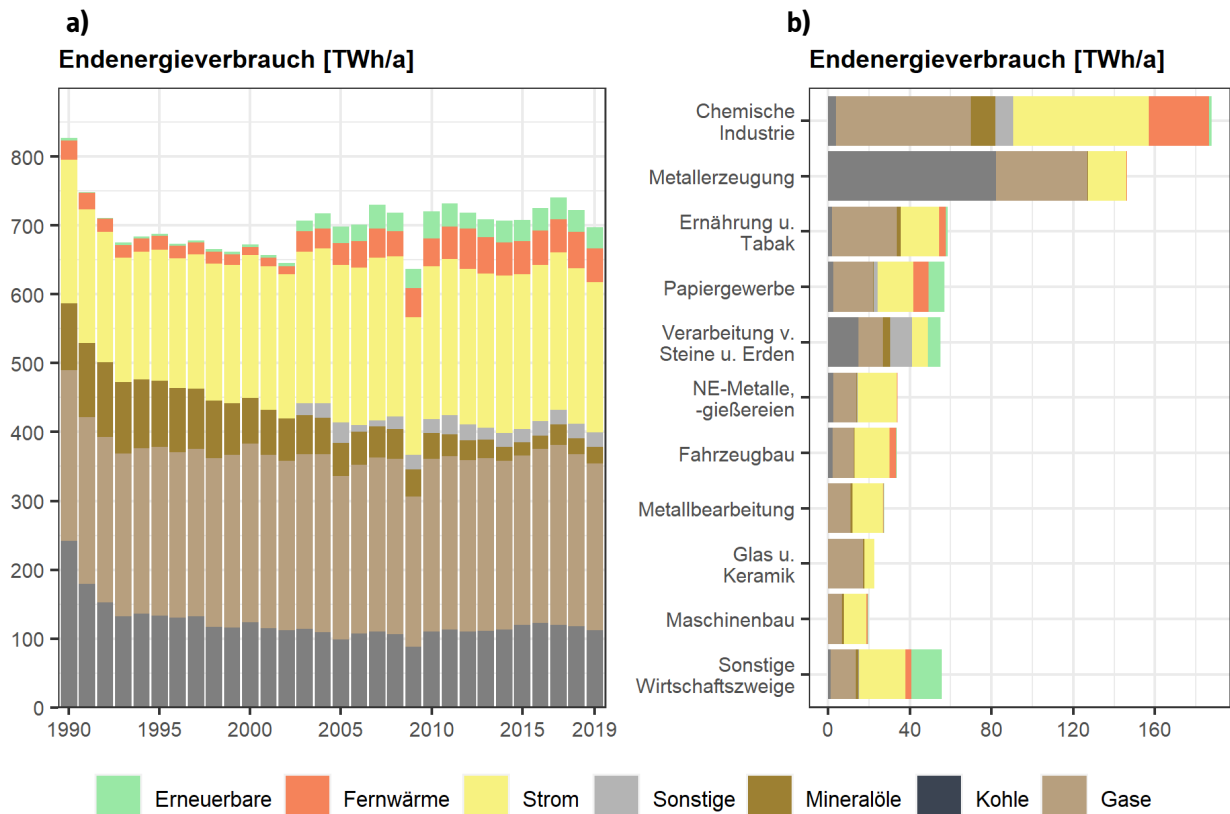


Abbildung 4.1: a) Industrieller Endenergieverbrauch Gesamt (1990 – 2019) und b) nach Wirtschaftszweig (2019). Quelle: (AGEB, 2020a)

Unterschieden nach Endanwendungen sind die meisten industriellen THG-Emissionen mit der Hochtemperatur-Prozesswärme verbunden, entweder in Form von Dampf oder Warmwasser oder aus der direkten Befuerung verschiedener Arten von Öfen (siehe Abbildung 4.2). Die hohen Temperaturen und die spezifischen Anforderungen von industriellen Öfen beschränken die Nutzung erneuerbarer Energien auf Biomasse oder sekundäre Energieträger. Die prozessbedingten Emissionen machen ebenfalls einen signifikanten Anteil der industriellen Emissionen aus. Sie stammen aus chemischen Reaktionen im Produktionsprozess und ihre Minderung ist bei den derzeit eingesetzten Prozessen technisch schwierig oder gar unmöglich. Hinzu kommen die industrielle Stromeigenerzeugung und die Bereitstellung von Raumwärme, welche bei der Bewertung des industriellen Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen nicht außer Acht gelassen werden sollten.

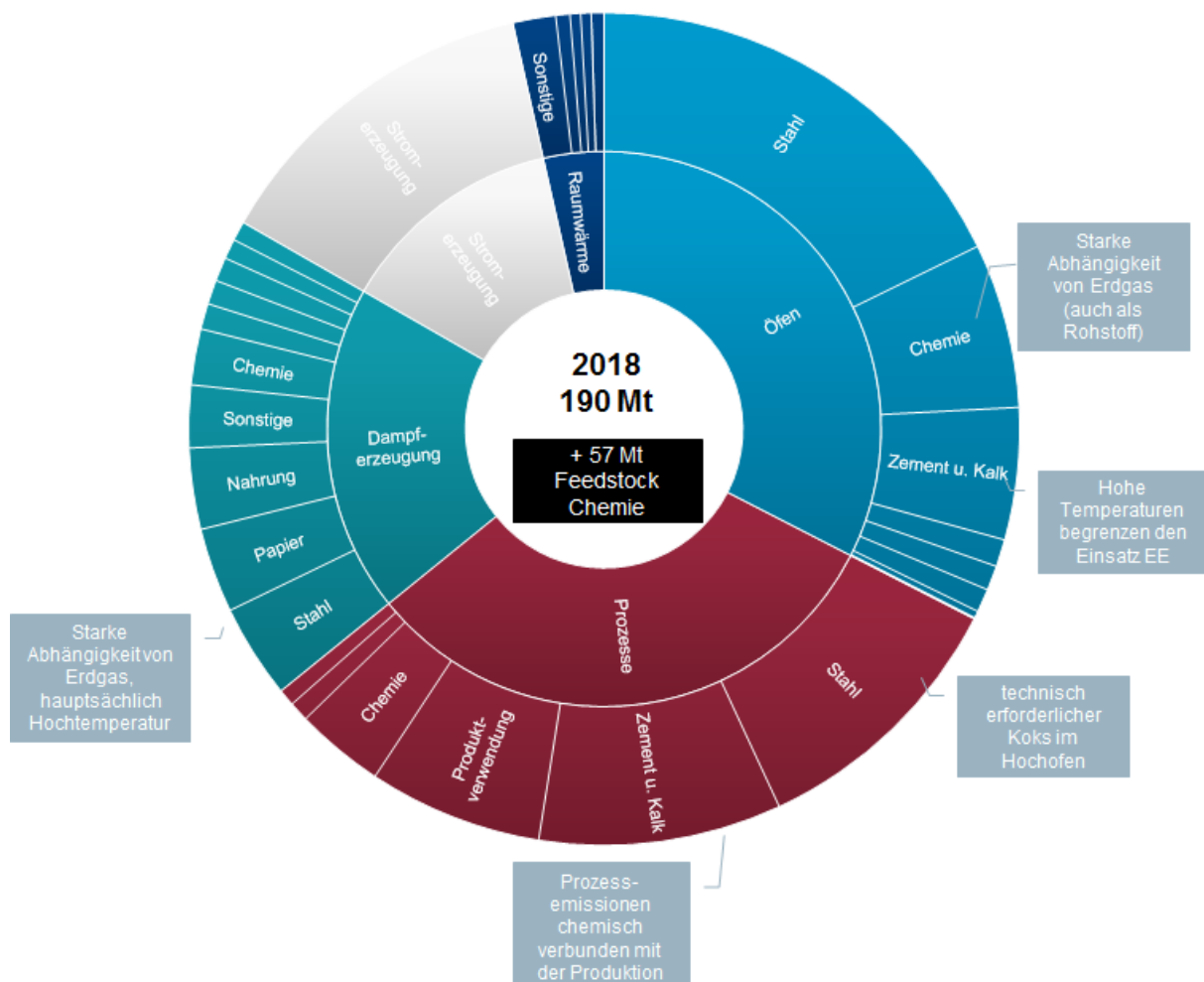


Abbildung 4.2: Direkte industrielle Emissionen in Deutschland nach Anwendung und Branche entsprechend der Emissionsbilanzierung des Klimaschutzgesetzes. Quelle: Fraunhofer ISI. Darstellung ohne Raffinerien und ohne rohstoffliche Nutzung von Energieträgern. EE steht für erneuerbare Energien.

Das Ziel der langfristigen THG-Neutralität ist sowohl politisch als auch gesellschaftlich Konsens, jedoch sind die sektorspezifischen Technologiepfade sowie die politischen Rahmenbedingungen und Instrumente, die dazu führen sollen, noch in Diskussion.

Für die Industrie liegen aktuell viele Dekarbonisierungsstrategien auf dem Tisch: z. B. die Elektrifizierung der Prozesswärme, eine Umstellung auf Wasserstoff oder grünes Gas, der vermehrte Einsatz von Biomasse, die Markteinführung CO₂-armer Verfahren, die Nutzung von CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) verbunden mit der Kreislaufführung von CO₂, ein Ausbau der Kreislaufwirtschaft sowie die effizientere Materialnutzung. Die einzelnen Beiträge dieser Maßnahmen und deren Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit werden aber noch diskutiert. Neue Technologien unterscheiden sich hier in Reife und Entfernung vom Markt sowie in ihrer Abhängigkeit von Ressourcen und Infrastruktur.

Ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur langfristigen CO₂-Neutralität ist das Jahr 2030, für welches in Deutschland ein Minderungsziel von 118 Mt = ~57 % gegenüber 1990 für den Industriesektor vorgesehen ist. Zum heutigen Zeitpunkt reichen jedoch die aktuell beschlossenen und implementierten Instrumente nicht aus, um dieses Ziel zu erreichen.

4.3 Modellierung der Industriewende

4.3.1 Methodik

Um die Rolle des Industriesektors in der Energie- und Klimawende näher zu beleuchten wird das Modell **FORECAST**¹⁴ (Fleiter et al., 2018) als **Leitmodell** eingesetzt (Details siehe Appendix des Berichts). FORECAST ist ein Bottom-up Energienachfragemodell, welches die Technologiestruktur der Industrie abbildet und den industriellen Energieverbrauch, Emissionen und Kosten auf Prozessebene modelliert. Das Modell ist hierarchisch aufgebaut und unterteilt die Industrie anhand der Energiebilanzen in einzelne Wirtschaftszweige bzw. Subsektoren, welchen spezifische Industrieprozesse zugeordnet werden. Des Weiteren werden Technologiebereiche wie Elektromotoren, Industrieöfen, Raumwärme und Dampferzeugung separat modelliert.

Für die Berechnung von Szenarien können alle wichtigen Dekarbonisierungsstrategien berücksichtigt werden:

- Inkrementelle Verbesserung der **Energieeffizienz durch beste verfügbare Technik (BVT)** der bestehenden Anlagen: Eine hohe Auflösung bei Prozessen und eine umfassende Datenbank zu Einspartechiken erlauben eine möglichst genaue Bewertung des vorhandenen Effizienz-Potenzials.
- **Prozesswechsel auf neue CO₂-arme bzw. CO₂-neutrale Herstellungsverfahren**: Eine hohe Auflösung bei Produktionsrouten und Prozessen erlaubt konkrete Annahmen zum Wechsel auf neue Herstellungsverfahren je Produktionsroute. Neue Verfahren sind ggfs. auch mit dem Wechsel auf einen anderen Energieträger verbunden (zum Beispiel Wasserstoff oder Strom).
- **Brennstoffwechsel**: Ein Bestandsmodell der Dampferzeuger inkl. Discrete-Choice-Modellierung der Investitionsentscheidung erlaubt die endogene Simulation des Brennstoffwechsels entsprechend der Wirtschaftlichkeit und des Technologiebestandes der ver-

¹⁴ <https://www.forecast-model.eu>

schiedenen Dampferzeuger. Ein vereinfachter Discrete-Choice-Ansatz wird für die Modellierung des Brennstoffwechsels bei Industrieöfen verwendet (Rehfeldt et al., 2018). Dabei ist ein Wechsel auf Biomasse, Strom (Elektrokessel, Wärmepumpen), Wasserstoff oder PtG (Power-to-Gas) möglich.

- **CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) sowie –Nutzung (CCU):** Eine hohe Prozessauflösung erlaubt die Zuordnung von CCS zu ausgewählten Prozessen. Durch CCS können verbleibende prozessbedingte Emissionen gemindert werden.
- **Recycling und Materialeffizienz** entlang der Wertschöpfungskette: Eine große Anzahl berücksichtigter Produkte und die separate Modellierung von Primär- und Sekundärrouen erlauben je Szenario spezifische Annahmen zum Fortschritt bei Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft.

4.3.2 Szenariodefinition und -annahmen

Im Folgenden werden vier Szenarien für den Industriesektor mit dem Bezugszeitpunkt 2045 betrachtet, welche eine THG-Minderung von mindestens 95 % bis zum Jahr 2045 gegenüber 1990 anstreben. Die Geschwindigkeit des Wandels ist insbesondere ab 2030 sehr hoch und zielt auf eine fast 100-prozentige Bestandsdiffusion in den Grundstoffbranchen bis 2045 ab. In einigen Fällen erfordert dies einen frühzeitigen Ersatz von Technologien, noch bevor sie das Ende ihrer Lebensdauer erreichen, was zu zusätzlichen Kosten führt.

Im Szenario *Elektrifizierung* werden direktelektrische Lösungen in der Industrie, unter Berücksichtigung von Technologieverfügbarkeit und Umsetzbarkeit, in allen Bereichen bevorzugt. Analog wird im Szenario *Wasserstoff* umfassend Wasserstoff eingesetzt, sowohl in der energetischen als auch in der stofflichen Nutzung. Das Szenario *E-Fuels* nutzt synthetisches Methan ab 2030, unter der Annahme, dass dieses verfügbar ist und dem Erdgasnetz in steigenden Anteilen beigemischt wird, um so bis zum Jahr 2045 fossiles Erdgas vollständig zu ersetzen (siehe Tabelle 4.1). Zusätzlich zu den drei Technologie-Schwerpunkt-Szenarien (*E-Fuels*, *Wasserstoff* und *Elektrifizierung*) wird ein *Technologiemix*-Szenario ohne eindeutigen Technologie-Schwerpunkt analysiert. In diesem Szenario werden Lösungen bevorzugt, welche im wissenschaftlich-gesellschaftlichen Diskurs als besonders vielversprechend und umsetzbar diskutiert werden. Hierzu wurde auf Informationen aus bestehenden Studien und Verbandsinformationen ausgewählter Industriebranchen zurückgegriffen.

		Technologiemix	Elektrifizierung	Wasserstoff	E-Fuels
THG-Minderung Industrie ggü. 1990	2030	Ziel erreicht			Ziel nicht erreicht
	2045	>-95 %			> -95 %
CCS	Stahl, Chemie, Zement u. Kalk	nein			CCS bei Zement
CCU	Zement u. Kalk	Zement u. Kalk als CO ₂ -Quelle			nein
Prozesswechsel auf CO ₂ -arme Primär-Verfahren	Stahl	H ₂ -DRI*			PtG-DRI*
	Zement	CO ₂ -arme Zementsorten + Müll, Klinkerfaktor	Elektrische Klinker- und Kalköfen	CO ₂ -arme Zementsorten + H ₂ -befeuerte Öfen	CO ₂ -arme Zementsorten + Gas
	Chemie	MtO*, H ₂ -Methanol, H ₂ Elektrolyse-Ammoniak			MtO + PtG Methanol, H ₂ Elektrolyse-Ammoniak;
	Glas	H ₂ -befeuerte Schmelzwanne	Elektrische Schmelzwanne	H ₂ -befeuerte Schmelzwanne	Erdgas-befeuerte Schmelzwanne
Brennstoffwechsel	Industrieöfen	H ₂ , Strom, Müll	Strom dominant	H ₂ -befeuerte Öfen	Gas dominant
	Dampferzeugung u. Warmwasser	Mix	Strom dominant	H ₂ -befeuerte Dampferzeugung	Gas dominant

* Für eine detaillierte Technologiebeschreibung siehe Abschnitt 4.4.2

Tabelle 4.1: Szenariobeschreibung für den Industriesektor. Quelle: Fraunhofer ISI

Zentrale Rahmendaten für die Analyse der Industrie sind sowohl die Entwicklung der industriellen Wertschöpfung als auch die Produktionsentwicklung wichtiger energieintensiver Produkte der Grundstoffindustrie. In den gezeigten Szenarien wächst die Bruttowertschöpfung des gesamten Industriesektors in Deutschland bis 2045 um rund 1 % p. a., wobei jedoch ein höheres Wachstum in der Konsum- und Investitionsgüterindustrie stattfindet, während die Grundstoffindustrien unterdurchschnittlich wachsen.

Die abgeleiteten Produktionsmengen (siehe Abbildung 4.3) enthalten in allen Szenarien identische Annahmen zur Erhöhung der Material- und Ressourceneffizienz als auch der Kreislaufwirtschaft, was ebenfalls eine wichtige Säule zur Dekarbonisierung des Industriesektors darstellt (Material Economics, 2018; Purr et al., 2019).

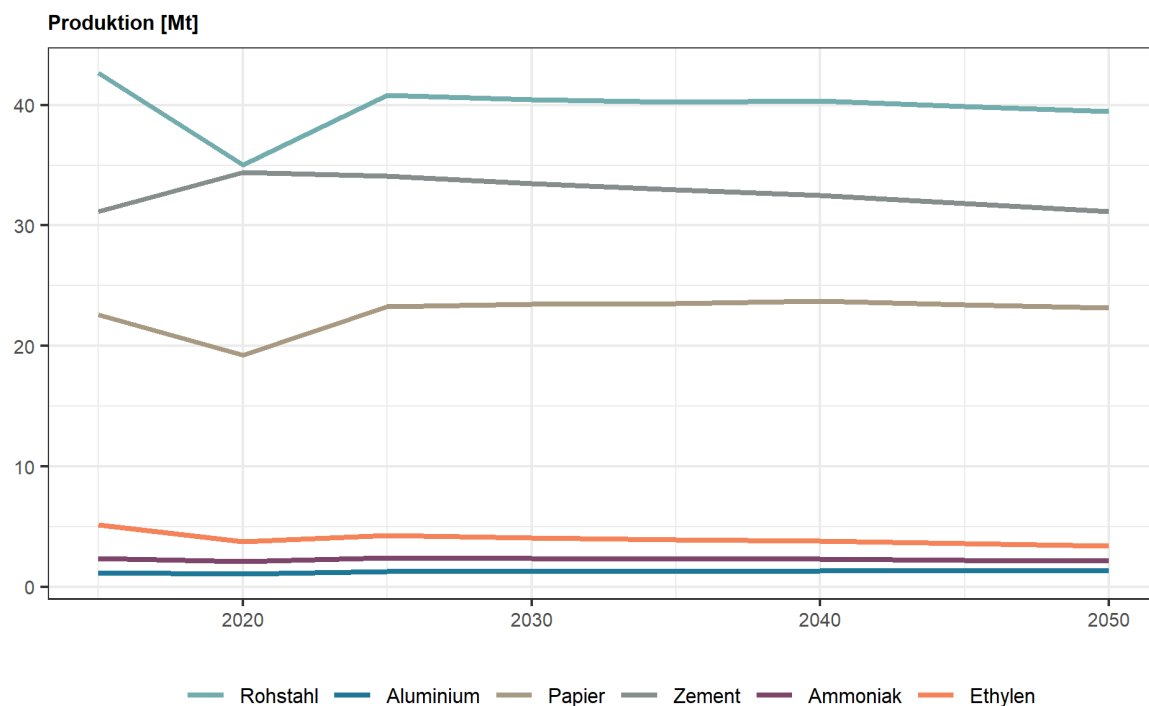


Abbildung 4.3: Produktionsentwicklung ausgewählter energie-intensiver Grundstoffe (Mt). Quelle: Fraunhofer ISI

Die getroffenen Annahmen zu Wirtschafts- und Produktionsentwicklung der deutschen Industrie können natürlich herausgefordert werden. So besteht in ambitionierten Vermeidungsszenarien das Risiko von Carbon Leakage (siehe Box Wettbewerbseffekte und Carbon Leakage-Schutz), wenn nicht entsprechende Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

Box: Wettbewerbseffekte und Carbon Leakage-Schutz (Fahl et al., 2021)

International nicht abgestimmte Klimaschutzbemühungen erhöhen das Risiko des „Carbon Leakage“, das heißt das Risiko der Abwanderung energieintensiver Industrien aus Deutschland und somit die Verlagerung von Emissionen. Langfristig bietet Klimaschutz aber auch Chancen: Eine stringente und glaubwürdige Klimapolitik reizt Innovationen an und fördert Investitionen in CO₂-effiziente Technologien. In einer Weltwirtschaft, die sich zunehmend auf das Langfristziel Klimaneutralität ausrichtet, bedeutet dies einen Vorsprung im Wettlauf um zukunftsfähige Technologien, jedoch nur, wenn sich die Industriebranchen auch kurzfristig im Wettbewerb behaupten können. Vor dem Hintergrund der verschärften Klimaschutzziele auf nationaler und auf europäischer Ebene wird das Potenzial für die Weiterführung der bestehenden Regelungen des Carbon Leakage-Schutzes, insbesondere der kostenlosen Zuteilung von Emissionsberechtigungen, in der Zukunft sehr begrenzt sein (Abnahme der verfügbaren Emissionsberechtigungen, keine spürbaren „grünen“ Investitionsanreize, Schwächung des CO₂-Preissignals). Aus diesen Gründen werden alternative Maßnahmen diskutiert: der Grenzausgleich im engeren Sinne (Grenzsteuer / notional ETS) und die Verbrauchs- oder Klimaabgabe. Der Grenzausgleich im engeren Sinne eignet sich eher für eine Strategie mit internationalem Fokus (EU-ETS als Leitinstrument) birgt jedoch das Risiko, potenzielle Kooperationsländer vor den Kopf zu stoßen, wenn deren Klimaschutzanstrengungen nicht als gleichwertig anerkannt werden. Sowohl beim Grenzausgleich im engeren Sinne als auch bei der Verbrauchsabgabe sind flankierende Instrumente nötig, die die technologische Transformation unterstützen und Zukunftsinvestitionen anreizen.

Simulationen des NEWAGE Modells¹⁵ zeigen, dass die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen und die Verteilungswirkungen derartiger CBAMs (Carbon Border Adjustment Mechanism) stark vom Design abhängen. Wesentliche Treiber oder Stellschrauben für die Wirkweise, die Einzeleffekte und die Gesamtwirkungen der unterschiedlichen Maßnahmen sind: Eingriffsstelle, Handelsabdeckung, Wertschöpfungsstufen, Einnahmenverwendung, internationale Kooperation und Ausnahmen. Daran geknüpft ist am Ende auch die Frage nach den Gewinnern und Verlierern der Regelungen, zum Beispiel zwischen Ländern (und Ländergruppen), innerhalb der Industrie, zwischen Industrie und Haushalten sowie zwischen unterschiedlichen Haushaltsgruppen. Zentraler Aspekt ist hier auch das Verhalten des Staates, insbesondere bezüglich der Einnahmenverwendung. Aus gesamtwirtschaftlichen Überlegungen heraus haben dabei die Instrumente und Strategien einen

¹⁵ <https://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/modelle/NEWAGE/>; Details auch im Appendix dieses Berichts

Vorteil, die eine Lenkungswirkung entfalten können, 1.) indem sie an der Entstehung der Emissionen ansetzen, die 2.) gleichzeitig eine möglichst geringe Zahl an Ausnahmetatbeständen mit sich bringen und die 3.) die Einnahmen derart in das System zurückführen, dass weitere Impulse für die Transformation zur CO₂-neutralen Industrie gesetzt werden. Für die künftige Wettbewerbsfähigkeit sind auf lange Sicht neben der internationalen Einbindung Innovationskraft und Investitionen in neue Technologien mitentscheidend. Mit dem globalen Umbau zu einer klimafreundlichen Wirtschaft sind große industriepolitische Chancen verbunden. Die Erlangung einer Technologieführerschaft in diesen Bereichen liegt im Interesse Deutschlands und der EU.

4.4 Direkte und indirekte Elektrifizierung

In Abbildung 4.4 ist die Entwicklung der Endenergienachfrage (nur energetisch) der verschiedenen Szenarien als Ergebnis des Leitmodells FORECAST und der Modelle REMIND und REMod dargestellt. Dabei zeigt sich, dass in allen Modellen ambitionierte Veränderungen des gesamten industriellen Produktionssystems stattfinden und neben Verbesserungen der Material- und Energieeffizienz hohe Mengen an CO₂-neutralen Sekundärenergieträgern eingesetzt werden.

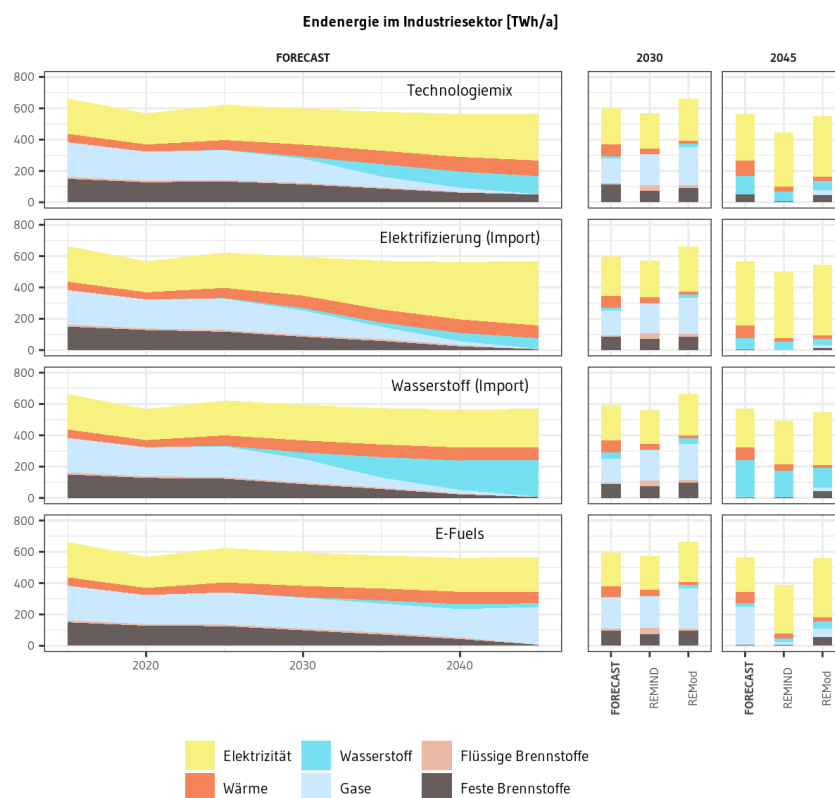


Abbildung 4.4: Entwicklung der industriellen Endenergienachfrage der Szenarien mit den Modellen FORECAST, REMIND und REMod.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Modells FORECAST näher analysiert, das im Rahmen dieser Analyse des Industriesektors als Leitmodell fungiert.

4.4.1 Industrielle Emissionen und Energienachfrage

Emissionen

In allen Szenarien wird bis 2045 eine Minderung der Treibhausgasemissionen der Industrie um 96 bis 97 % gegenüber 1990 erreicht (siehe Abbildung 4.5).

Die Entwicklung der **energiebedingten Emissionen** folgt dabei dem nachfolgend diskutierten Energieverbrauch und wird in 2030 vom Erdgasbedarf der Industrie dominiert. Durch Einsatz von CO₂-neutralen Prozesstechnologien (z. B. wasserstoffbasiertem Stahl, neuen Zementsorten), direkter Elektrifizierung sowie Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft kommt es in der folgenden Dekade zu einem starken Rückgang der energiebedingten Emissionen.

Die verbleibenden Emissionen von 9 - 11 MtCO₂äq in 2045 werden durch kleinere verteilte Quellen von **Prozessemissionen** dominiert (zum Beispiel aus der Keramikindustrie). Ehrgeizigere Minderungsbemühungen in Richtung vollständiger CO₂-Neutralität müssen sich mit diesen befassen oder sich auf negative Emissionen wie Biomasse in Kombination mit CCS zum Beispiel in den Klinkeröfen konzentrieren, um diese zu kompensieren, da deren Behebung mittels CCS teurer (oder unmöglich) wäre.

In den Szenarien *Technologiemix*, *Elektrifizierung* und *Wasserstoff* wird bis zum Jahr 2030 eine THG-Minderung von 58 bis 60 % gegenüber 1990 erreicht. Damit wird das Sektorziel für die Industrie im Jahr 2030 gemäß novelliertem Klimaschutzgesetz von 118 MtCO₂äq = - 57 % erfüllt bzw. leicht übertroffen. Im *E-Fuels*-Szenario wird das neue Sektorziel der Industrie mit einer Reduktion in 2030 von 51 % nicht erreicht. Dies liegt insbesondere an den verbleibenden energiebedingten Emissionen im System, da kurz- bis mittelfristig nur eine beschränkte Beimischung von synthetischem Methan in das Erdgasnetz angenommen werden kann (~5 % in 2030, siehe Kapitel 6).

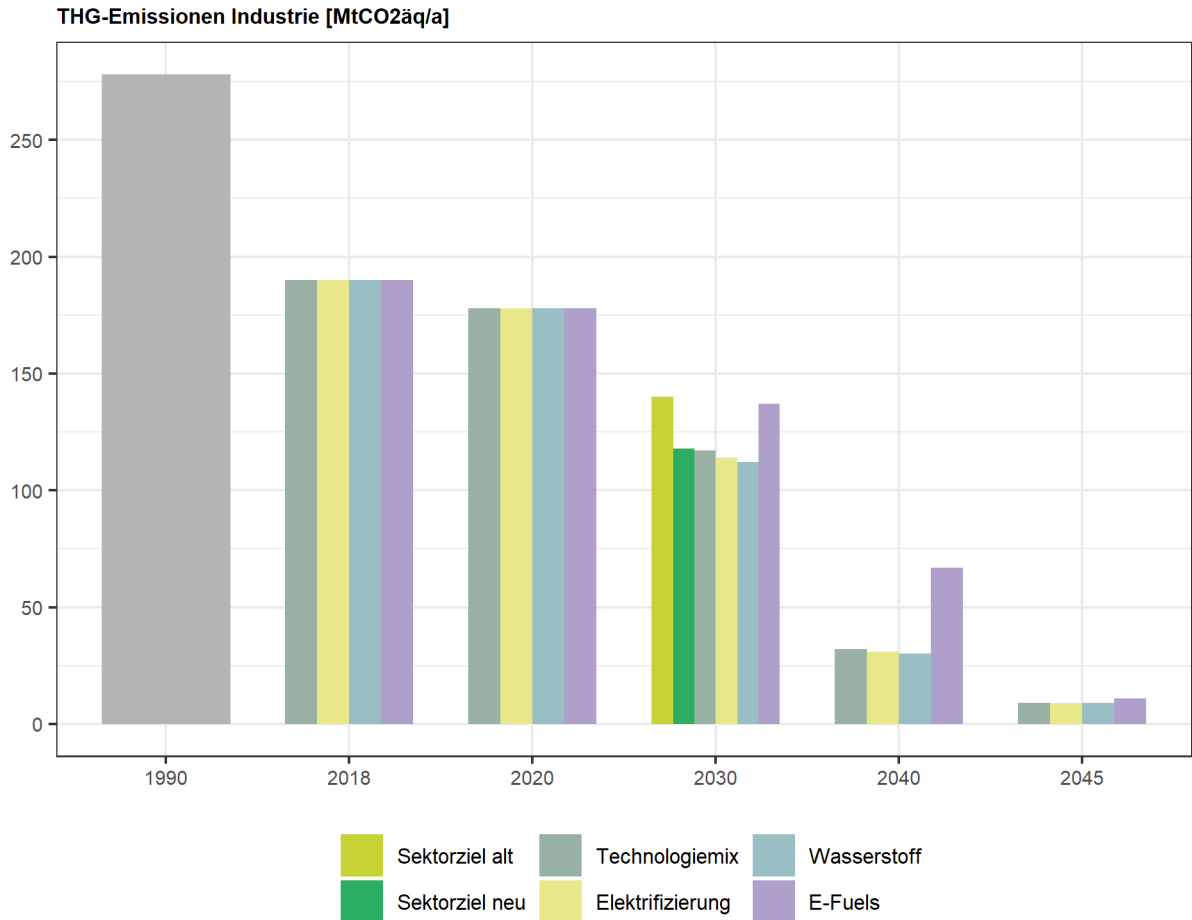


Abbildung 4.5: THG Emissionen Industriesektor (1990-2045, MtCO₂äq). Quelle: Fraunhofer ISI - FORECAST Modell auf AGEb u. NIR kalibriert.

Energienachfrage

Die resultierende Energienachfrage aller Szenarien ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Diese beinhaltet sowohl den Endenergieverbrauch wie auch den stofflichen Einsatz von Energieträgern für die Produktion von Olefinen, Methanol und Ammoniak. In allen Szenarien ist ein deutlicher Rückgang der Energienachfrage (~22 % gegenüber 2018) zu beobachten. Dieser Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass Maßnahmen zur Energie- und Materialeffizienz sowie der Anstieg von recyclingbasierten Verfahren den Wachstumsimpuls durch die angenommene stetig steigende Industriewertschöpfung überkompensieren. Hinzu kommen - je nach Szenario - zusätzliche Effekte, wie etwa Effizienzgewinne durch die Elektrifizierung von Prozessen oder die Verschiebung der Wasserstoffproduktion in den Umwandlungssektor.

Abhängig von den gewählten Technologie-Schwerpunkten der Szenarien zeigen diese deutlichen Unterschiede in der Bedeutung von Strom, Wasserstoff und synthetischem Methan (PtG). Im *Technologiemix*-Szenario ist in 2045 mit 298 TWh Strom der dominante Energieträger, gefolgt von

Wasserstoff mit 214 TWh. Wasserstoff wird in diesem Szenario dort eingesetzt, wo eine direkte Elektrifizierung nicht möglich ist (zum Beispiel, weil der Energieträger stofflich für die Herstellung von Olefinen genutzt wird) oder weil elektrische Verfahren technisch noch nicht weit genug entwickelt sind (Stahlherstellung). Hinzu kommt ein beschränkter Wasserstoffeinsatz im Hochtemperaturbereich der industriellen Prozesswärme (zum Beispiel in der Glasindustrie). Für den Bereich der weiteren Industrieöfen, Dampferzeugung und Niedertemperaturwärme (<150°C) ist der Energiemix vielfältiger. Biomasse wird in diesem Szenario weiterhin genutzt, der Verbrauch steigt jedoch nur leicht an (~54 TWh, im Vergleich 2018: 32 TWh).

Im *Elektrifizierungs*-Szenario kommt es beinahe zu einer Verdopplung des Stromverbrauchs im Vergleich zu heute, von 226 TWh in 2018 auf 413 TWh in 2045. Dies wird vor allem durch die Elektrifizierung der Prozesswärme über alle Branchen hinweg bedingt. Dies gilt sowohl für Hochtemperaturprozesse als auch die für die Mittel- und Niedrigtemperaturbereiche, zum Beispiel mittels Einsatz von elektrischen Dampfkesseln oder Wärmepumpen. Der Wasserstoffbedarf steigt in diesem Szenario auf 173 TWh in 2045 und ist auf den Einsatz in der Stahlindustrie und als Rohstoff für die chemische Industrie zur Herstellung von Methanol (vorwiegend als Zwischenprodukt für die Olefinproduktion) und Ammoniak zurück zu führen.

Ein starker Anstieg des Verbrauchs von (grünem) Wasserstoff verdrängt im *Wasserstoff*-Szenario bis zum Jahr 2050 den Einsatz fossiler Energieträger wie Erdgas, Naphtha, Kohle und andere vollständig. Wasserstoff wird damit sowohl zum zentralen Energieträger für die Bereitstellung von Prozesswärme als auch beim Einsatz als Rohstoff für die chemische Industrie. Mit 66 TWh ist der Bedarf an Wasserstoff im Jahr 2030 deutlich niedriger als der Bedarf an fossilen Energieträgern, aber dennoch substanziell. Durch den Umbau des industriellen Anlagenbestandes ist, insbesondere im Zeitraum 2030 bis 2040, ein relativ starker Anstieg des Wasserstoffbedarfs auf 342 TWh in 2045 zu verzeichnen. Der Stromverbrauch steigt in diesem Szenario bis zum Jahr 2045 nur leicht von heute 226 TWh auf 248 TWh, wodurch Strom und Wasserstoff die Energieversorgung der Industrie im Jahr 2045 dominieren.

Das *E-Fuels*-Szenario wird durch die Nachfrage nach synthetischem Methan dominiert (347 TWh in 2045), welches über alle Bereiche der Energieverwendung prioritär eingesetzt wird. Für die Herstellung von Stahl, Olefinen und Ammoniak wird PtG als Rohstoff eingesetzt. Darüber hinaus wird in Industrieöfen und Dampferzeugern weiterhin Gas als wichtiger Energieträger eingesetzt - auch dort, wo heute andere fossile Brennstoffe genutzt werden. In 2030 beträgt der Einsatz von synthetischem Methan nur rund 12 TWh, da kurz- bis mittelfristig nur eine beschränkte Beimischung von synthetischem Methan in das Erdgasnetz angenommen werden kann.

Neben Strom und Wasserstoff spielen im Jahr 2045 auch Fernwärme (49 - 68 TWh) und Umgebungswärme (23 - 44 TWh) eine Rolle in allen Szenarien (Ausnahme *E-Fuels*).

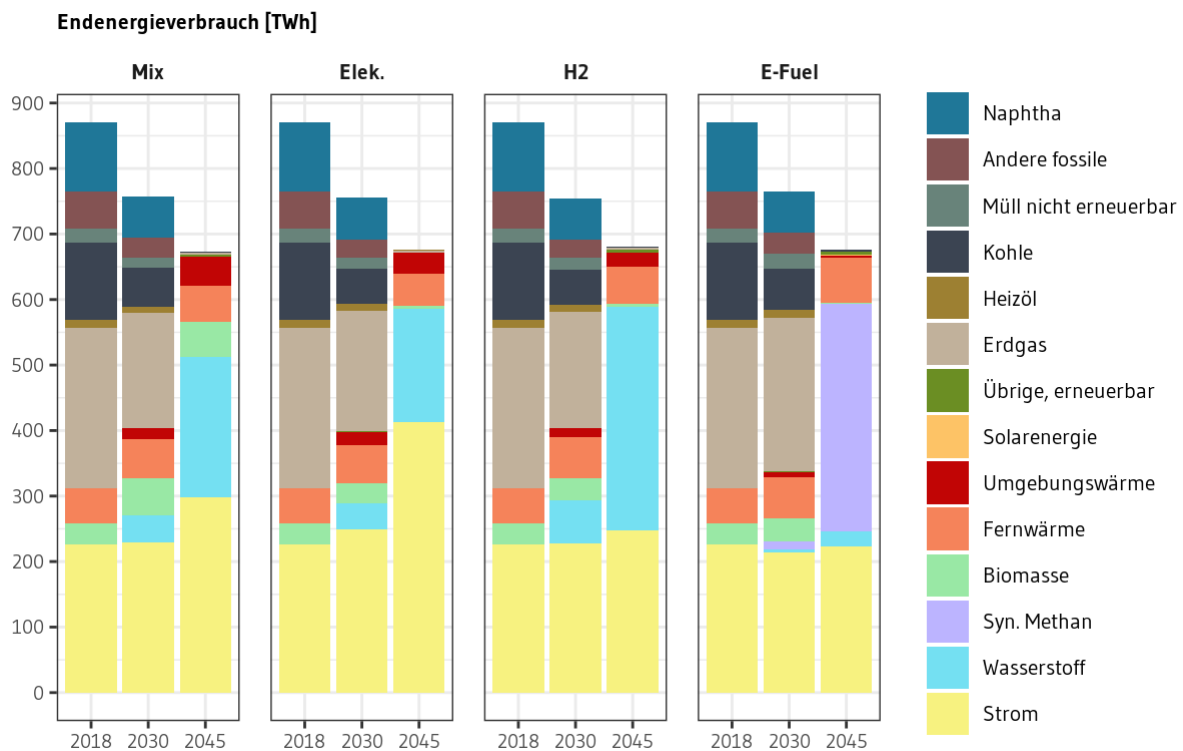


Abbildung 4.6: Industrielle Energienachfrage (energetisch und stofflich) (2018-2045, TWh). Quelle: Fraunhofer ISI - FORECAST Modell.

4.4.2 Technologieüberblick Wasserstoffeinsatz und direkte Elektrifizierung

Die Umstellung der Prozesswärmeversorgung und des Rohstoffbedarfs auf CO₂-neutrale Sekundärenergieträger ist über alle Szenarien hinweg eine Schlüsselstrategie, ohne die ein CO₂-neutraler Industriesektor nicht möglich ist. Die nötigen Technologien befinden sich jedoch in den meisten Fällen noch nicht im großindustriellen Einsatz. Nachfolgend werden für die wichtigsten Prozesse Referenztechniken sowie elektrische und wasserstoffbasierte Alternativen dargestellt (siehe Tabelle 4.2).

Subsektor	Prozess/ Produkt	Konventionelle Technologie	H ₂ -Alternative	TRL	Elektrische Alternati- ve	TRL
Rohstoffliche Verwendung						
Grundstoff- chemie	Ammoniak	Dampfrefor- mierung	Synthesegas- bereitstellung aus H ₂	8-9	-	
	Methanol	Dampfrefor- mierung	Synthesegas- bereitstellung aus H ₂ und CO ₂	8-9	-	
	Olefine (HVC)	Steam Cracker	Methanol-to Olefins	8-9	Elektr. Cracker	5-6
Raffinerien	Rohölverar- beitung	Dampfrefor- mierung	H ₂ aus Elektro- lyse	8-9	-	
Bereitstellung von Prozesswärme						
Metalle	Rohstahl	Hochofen	Eisenerz-Direk- treduktion (H ₂ -DRI)	5-7	Elektrolyse	4
	Nicht-Eisen Metalle	Erdgas-befeu- erter Ofen (Teilweise be- reits elektri- sche Öfen)	H ₂ -befeuertes Ofen	4-5	Elektr. Ofen	5-7
	Gießerei					
	Walzen / Weiterver- arbeitung					
Glas	Behälter- glas	Erdgas-befeu- erte Glas- schmelzwanne	H ₂ -befeuerte Glasschmelz- wanne	4-5	Elektr. Glasschmelz- wanne	6-8
	Flachglas					
Zement und Kalk	Zement	Erdgas-befeu- erter Ofen	H ₂ -befeuertes Ofen	4-5	Elektr. Ofen	4-5
	Kalk					
Alle	Dampfer- zeugung	Erdgas-betrie- bener Dampf- erzeuger	H ₂ -betriebener Dampferzeu- ger	9	Elektr. Dampferzeu- ger (<500°C)	9
					Elektr. Wärmepumpe (<150°)	8

Tabelle 4.2: Wasserstoffeinsatz und direkte Elektrifizierung in der Industrie. Quelle: Fraunhofer ISI, (Neuwirth et al., in submission).

Die **Eisen- und Stahlindustrie** ist mit einem Anteil von rund einem Drittel einer der größten emittierenden Teilsektoren der Industrie. Die konventionelle Primärproduktion in Hochöfen macht dabei etwa 70 % der deutschen Stahlproduktion aus (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2019). Insbesondere die Dekarbonisierung der Primärroute ist eine Herausforderung, da die Sekundärproduktion bereits weitgehend elektrifiziert ist und durch den Betrieb mit erneuerbarem Strom ohne Prozessumstellung klimaneutral werden kann. Der Ersatz von fossilen Brennstoffen in der

primären Stahlproduktion durch Wasserstoff oder Strom erfordert aufgrund der unterschiedlichen Verarbeitung Investitionen in völlig neue Anlagen. Die Umstellung auf Wasserstoff ist durch das **Direktreduktionsverfahren** möglich, die Umstellung auf direkte Stromnutzung über **Elektrolyse (Primärroute)** oder den stärkeren Einsatz der **Sekundärroute**.

Die **Direktreduktion** von Eisenerz mit Erdgas ist bereits Stand der Technik und wird großindustriell eingesetzt. In einer Reihe von Projekten in Deutschland und Europa wird zudem die Machbarkeit unter Einsatz von Wasserstoff (H₂-DRI) mit bereits positiven Ergebnissen untersucht (z. B. HYBRIT in Schweden, SALCOS in Deutschland). Ein Umstieg auf erneuerbaren Wasserstoff im weiteren Verlauf scheint deshalb ohne große technische Hürden möglich, wenn dieser verfügbar ist. Der Technologie-Reifegrad für wasserstoffbasierte Direktreduktion wird mit einem TRL (Technology Readiness Level) von 5-7 angegeben (International Energy Agency, 2020), woraus ein zu erwartender Markteintritt der H₂-Direktreduktionsanlagen im Zeitraum von 2025-2030 resultiert. Das **Elektrolyseverfahren** ermöglicht, die Primärstahlherstellung zu elektrifizieren, ohne den Umweg über Wasserstoff zu gehen. Das Verfahren befindet sich mit einem niedrigen TRL von 4 (International Energy Agency, 2020) noch in der Entwicklung und wird deshalb in den gezeigten Szenarien nicht berücksichtigt.

Die **Grundstoffchemie** ist derzeit der größte Nutzer von Wasserstoff für Rohstoffanwendungen. Insbesondere die Produktionsprozesse für Basischemikalien (z. B. Ammoniak, Methanol und Olefine) zeigen ein hohes Potenzial für eine Transformation hin zu grünem Wasserstoff.

Die Herstellung von **Ammoniak** besteht aus zwei integrierten Prozessstufen, dem Synthesegasprozess und der Ammoniaksynthese von Stickstoff und Wasserstoff nach dem Haber-Bosch-Verfahren. Das Synthesegas wird in Deutschland meist durch Dampfreformierung von Erdgas bereitgestellt (Fleiter et al., 2013). Die Trennung der Synthesegaserzeugung und des anschließenden Haber-Bosch-Prozesses ermöglicht es, das wasserstoffhaltige Synthesegas aus der Dampfreformierung durch CO₂-neutralen Wasserstoff zu ersetzen (Smith et al., 2020). Da alle Komponenten der wasserstoffbasierten Ammoniakherstellung einen TRL von 9 aufweisen und die Umstellung auf getrennte Synthesegasbereitstellung von Wasserstoff und Stickstoff keine Hürden aufweist, wird ein TRL von 8 - 9 angesetzt. Eine alternative direktelektrische Herstellung von Ammoniak ist nicht bekannt.

Die konventionelle Herstellung von **Methanol** basiert auf einer Synthese von Wasserstoff und CO₂ und kann grundsätzlich in drei Schritte unterteilt werden: Synthesegasherstellung, Rohmethanolherstellung und Methanolaufbereitung. Der größte Teil des heute industriell hergestellten Methanols stammt aus der katalytischen Umsetzung von Synthesegas. Dabei wird die Herstellung

von Synthesegas konventionell, analog zu Ammoniak, hauptsächlich durch Dampfreformierung von Erdgas abgedeckt (Fleiter et al., 2013). Für die CO₂-neutrale Herstellung von Methanol wird im Wesentlichen die Umstellung auf erneuerbares Synthesegas benötigt. So kann durch die Nutzung von CO₂-neutralem Wasserstoff und CO₂ ein Synthesegas mit neutraler CO₂-Bilanz erzeugt werden. Der TRL wird mit 8 - 9 eingestuft (DECHEMA, 2017). Bei der Umstellung auf die wasserstoffbasierte Methanolsynthese ist zudem noch CO₂ als weiterer Rohstoff nötig (siehe Box CO₂ als Rohstoff).

Ethylen und andere Olefine wie Propylen und Buten sind Ausgangsstoffe für ein großes Portfolio anderer Grundstoffe und Produkte. Olefine werden in der petrochemischen Industrie konventionell durch thermisches Cracken von langkettigen Kohlenwasserstoffen (meist Naphtha) in einem Steamcracker hergestellt. Die Zusammensetzung der Produktkomponenten kann je nach dem zu spaltenden Ausgangsstoff variieren (Geres et al., 2019). Eine CO₂-neutrale Herstellung von Olefinen ist mit Wasserstoff als Rohstoff über Methanol als Zwischenprodukt möglich (Methanol-to-Olefins, MtO). Zunächst müssen Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methanol umgewandelt werden. Anschließend erfolgt in einer weiteren Synthese die Umwandlung von Methanol zu Olefinen. Im nächsten Schritt wird das Methanol in einer Syntheseanlage zu Ethylen und anderen Olefinen verarbeitet. Damit ist der spezifische Gesamtenergiebedarf der wasserstoffbasierten Ethylenproduktion über Methanol-to-Olefins deutlich höher als bei der konventionellen Route und erfordert bedeutende Mengen an CO₂-neutralem Wasserstoff. Die Technologie zur Herstellung von Olefinen aus Methanol ist bereits lange bekannt und technisch ausgereift, allerdings bisher nicht wirtschaftlich. Aus technischer Sicht wird ein TRL von 8 - 9 angesetzt (DECHEMA, 2017).

Ein alternatives Verfahren, das sich derzeit in der Entwicklung befindet (Madeddu et al., 2020), ist die Elektrifizierung der Steamcracker. Bei diesem Verfahren werden CO₂-Emissionen durch den energetischen Einsatz fossiler Energien eingespart, jedoch wird weiterhin fossiles Naphtha als Rohstoff eingesetzt. Am Ende der Produktlebensdauer werden dadurch keine CO₂-Emissionen vermieden. Da den Szenarien grundsätzlich THG-Neutralität zugrunde liegt, wurden elektrische Steamcracker nicht als Option in den Szenarien berücksichtigt.

Box: CO₂ als Rohstoff

Die heutige Nutzung verschiedener fossiler Kohlenstoffquellen als Rohstoff in der Industrieproduktion, vor allem der Chemie-, Pharma- und Kunststoffindustrie, stellt in einer dekarbonisierten Zielwelt keine Option mehr dar. Stattdessen müssen zur Erreichung der ambitionierten Klimaziele neue nachhaltige Kohlenstoffquellen für die Herstellung bestimmter Produkte erschlossen werden. Vor allem die Grundstoffchemie benötigt bei entsprechender Umstellung der Methanol- und Olefinproduktion auf die Nutzung von grünem Wasserstoff erhebliche Mengen Kohlenstoff. Eine Möglichkeit diesen bereitzustellen ist die Abscheidung und Nutzung von CO₂-Emissionen aus schwer zu dekarbonisierenden Industriesektoren. Insbesondere prozessbedingte CO₂-Emissionen, beispielsweise aus der Zement- und Kalkindustrie, können somit in großem Maßstab chemisch gebunden und als Rohstoff genutzt werden. Zudem tragen diese sogenannten CCU-Kreisläufe (Carbon Capture and Utilization) weiter zur Dekarbonisierung dieser prozessbedingten Emissionen und schwer dekarbonisierbaren Industriebranchen bei. Da perspektivisch große Mengen CO₂ als Rohstoff benötigt werden, könnte CO₂ sogar ein knappes Gut werden. In diesem Fall sind die zusätzliche Abscheidung aus anderen Prozessen (beispielsweise Müllverbrennungsanlagen) oder andere technische Lösungen, wie die direkte Luftabscheidung von CO₂, eine Möglichkeit. Hierbei ist allerdings die langfristige CO₂-Neutralität als Nebenbedingung zu berücksichtigen, die ggf. verlangt, den CO₂-Kreislauf am Ende der Produktlebensdauer zu schließen.

Die **Zementindustrie** steht aufgrund hoher prozessbedingter Emissionen in Bezug auf die Klimaneutralität vor speziellen Herausforderungen. Durch das Brennen von Zementklinker im Drehrohrofen wird chemisch gebundenes CO₂ aus dem eingesetzten Kalkstein freigesetzt, was über herkömmliche Maßnahmen wie den Wechsel auf CO₂-neutrale Energieträger nicht vermeidbar ist, sondern eng mit dem genutzten Rohstoff und Prozess verbunden ist. Optionen zur Vermeidung der energiebedingten Emissionen sind der Einsatz **direktelektrischer Drehrohröfen** sowie die Nutzung von **erneuerbarem Wasserstoff als Brennstoff** im herkömmlich befeuerten Drehrohrofen. Die direktelektrifizierte Option ist wegen spezifischer Prozessanforderungen, wie sehr hoher Temperaturen und gleichmäßiger Temperaturverteilung, noch nicht großtechnisch umgesetzt. Zudem ergeben sich hier Herausforderungen im Materialtransport und in der hohen erforderlichen Leistung und Wärmeübertragung durch die notwendigen hohen Temperaturen. Daher hat die Elektrifizierung von Drehrohröfen derzeit einen TRL von 4-5. Die Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff beschränkt sich nach aktuellem Forschungsstand auf geringe Beimischungen (bis zu 10 %). Praktische Erkenntnisse hierzu sind aus diesem Grund kaum vorhanden.

Die Technologiereife wird nach Definition des TRL somit mit 3-5 bewertet. In Zukunft könnte die Plasmabrenner-Technologie eine Option sein. Diese bedarf aber noch umfangreicher Forschung und Entwicklung und eine kommerzielle Nutzung ist aus heutiger Sicht nicht absehbar (Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2020).

Generell ist der Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff zur **Erzeugung von Prozesswärme in verschiedenen Industrieanwendungen** (Glas, Keramik, Metalle etc.) eine denkbare klimaneutrale Alternative. Einige prozess- und produktspezifische Eigenschaften und Herausforderungen erlauben derzeit jedoch noch keinen Einsatz im großindustriellen Maßstab. Die Technologiereife für Wasserstoff zur Prozesswärmeerzeugung in Industrieöfen liegt bei etwa 4-5, da keine Demonstrationsanlagen im entsprechenden Maßstab vorhanden sind und keine resultierende Machbarkeitsstudien vorliegen. Aus Sicht der Komponente Brennertechnik ist der Wasserstoffeinsatz dabei unproblematisch und hat bereits einen TRL von 9. In vielen Bereichen geht es also weniger darum, technische Hürden zu überwinden, als den verlässlichen Betrieb bei hoher Produktqualität zu demonstrieren und sicherzustellen. Damit verbunden ist auch die Hochskalierung auf industrielles Niveau (E&M Combustion, 2019; Palacios and Bradley, 2021; Toyota, 2018; WS-Wärmeprozessstechnik GmbH, 2020; Zhao et al., 2019).

Dampferzeuger mit Multibrennern, die auch Wasserstoff nutzen können, sind bereits marktreif bei einem TRL von 9 und kommerziell verfügbar. Aufgrund fehlender flächendeckender Verfügbarkeit von Wasserstoff sowie mangelnder Wirtschaftlichkeit gibt es aktuell jedoch noch keinen breiten Industrieinsatz.

4.4.3 Einsatz CO₂-neutraler sekundärer Energieträger in den Szenarien

Basierend auf den zuvor beschriebenen Technologien und deren erwartetem Markteintritt sowie den in Abbildung 4.6 beschriebenen Szenarioausprägungen ergibt sich zusammenfassend folgendes Bild auf den Einsatz von Strom und Wasserstoff im Szenarienvergleich.

Abbildung 4.7 zeigt die Entwicklung der Stromnachfrage aufgeteilt nach ihren Anwendungen. In allen Szenarien ist ein kontinuierlicher Rückgang bei den klassischen Stromverbrauchern (Prozesskälte, Raumkühlung, Elektromotoren, andere), getrieben durch Effizienzgewinne, zu verzeichnen (vor allem in den Elektromotor-Anwendungen). Im Szenario *Elektrifizierung* wird dieser Rückgang besonders ab dem Jahr 2030 durch eine schnelle und umfassende Elektrifizierung der Prozesswärme überkompensiert. Dies führt beinahe zu einer Verdopplung der Stromnachfrage in diesem Szenario, welche in beinahe gleichen Teilen auf die Dampferzeugung (120 TWh in

die Industrieöfen (95 TWh in 2045) entfällt. In den Szenarien *Wasserstoff* und *E-Fuels* verbleibt die Gesamtstromnachfrage der Industrie in etwa auf heutigem Niveau und eine leichte Elektrifizierung der Prozesswärme (zum Beispiel durch Elektrolichtbogenöfen in der Stahlherstellung) kompensiert den Rückgang bei den klassischen Stromverbrauchern.

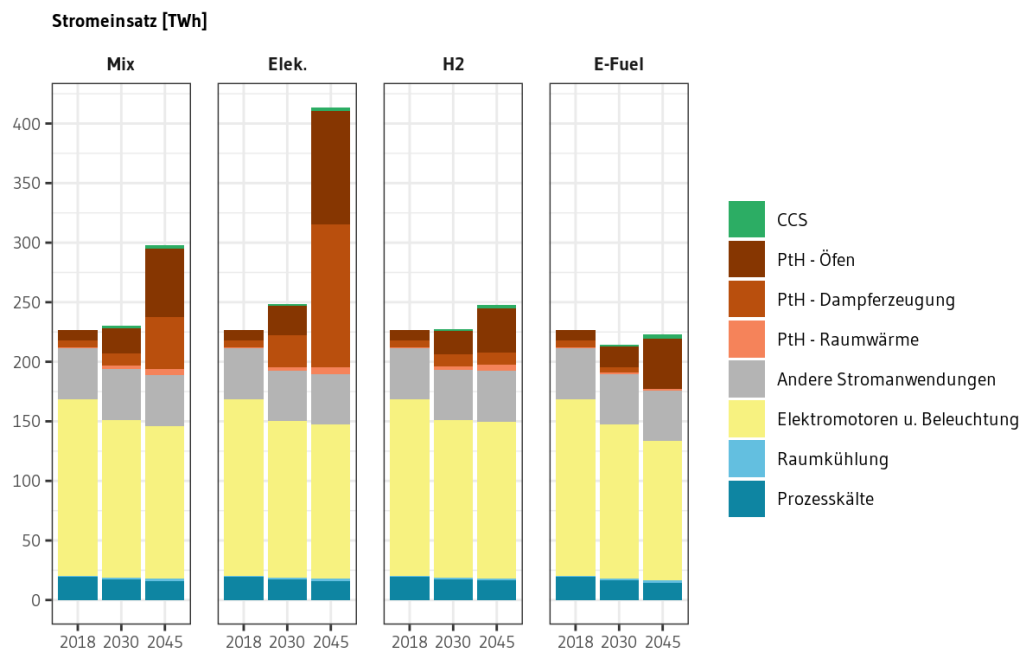


Abbildung 4.7: Stromeinsatz nach Szenario und Anwendung (2018 – 2045, TWh). Quelle: Fraunhofer ISI - FORECAST Modell.

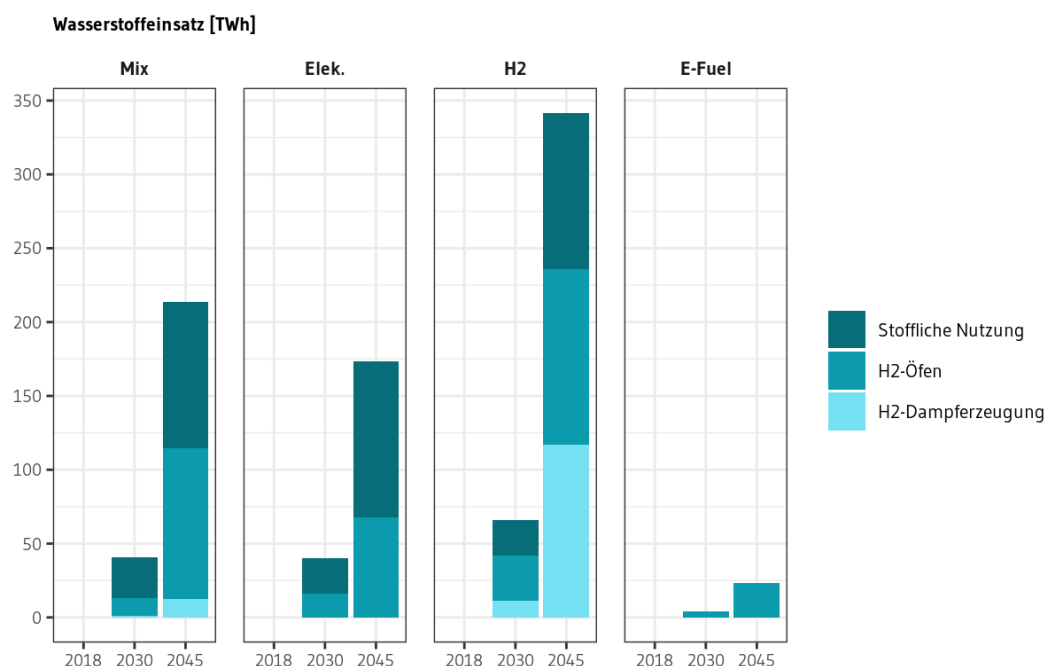


Abbildung 4.8: Wasserstoffeinsatz nach Szenario und Anwendung (2018 – 2045, TWh). Quelle: Fraunhofer ISI - FORECAST Modell.

Der Einsatz von Wasserstoff im Szenarienvergleich ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Im Szenario *Elektrifizierung* wird Wasserstoff gezielt für die Herstellung von Stahl, Ammoniak und Methanol/Olefinen eingesetzt (173 TWh in 2045). Im Szenario *Wasserstoff* kommt zur Nachfrage für diese drei Produkte noch ein großflächiger Einsatz von Wasserstoff für die Prozesswärmeerzeugung in allen Branchen hinzu, wodurch der gesamte Wasserstoffeinsatz mit 342 TWh gut 169 TWh höher liegt. Diese zusätzliche Nachfrage verteilt sich auf eine hohe Anzahl an Standorten und verlangt einen großflächigen Ausbau der Wasserstoffverteilnetze.

Im Szenario *E-Fuels* wird im Industriesektor kaum Wasserstoff eingesetzt, sondern 347 TWh synthetisches Methan in 2045 (siehe Diskussion zu Abbildung 4.6).

4.4.4 Industrielle Eigenerzeugung

Derzeit wird unter Eigenerzeugung im Wesentlichen die Stromerzeugung diskutiert. Im weiteren Sinne erzeugt die Industrie vor Ort auch Prozesswärme / Dampf und auch Wasserstoff. In der Energiebilanz sind letztere nicht in der Umwandlungsbilanz abgebildet, sondern Teil des Endenergieverbrauchs. Zudem findet eine weitere Umwandlung in der Stahlindustrie statt, wo Koks hergestellt wird. Die Unternehmen entscheiden jeweils, ob der Bezug günstiger als die Eigenerzeugung ist oder nicht.

Die Eigenerzeugung von Strom spielt derzeit eine wichtige Rolle in der Industrie. So wurden in 2017 insgesamt 53 TWh Strom in Industriekraftwerken erzeugt, was etwa 23 % des gesamten Elektrizitätsbedarfs der Industrie in diesem Jahr entspricht. Durch die gleichzeitige Erzeugung von Wärme in KWK-Anlagen in 70 % der Fälle wurden etwa 92 TWh thermische Energie bereitgestellt. Bezüglich der eingesetzten Energieträger ist zu erkennen, dass 69 % der Elektrizität auf fossilen Energieträgern - insbesondere Erdgas - beruhen. Der Anteil von erneuerbaren Energieträgern zur Stromeigenerzeugung ist mit 8 % hingegen vergleichsweise gering. Ein Haupttreiber für die Strom-Eigenerzeugung ist, dass gegenüber dem Strom-Netzbezug eine Kostenersparnis zum Beispiel durch die Nutzung von Abfallprodukten, Förderung von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sowie Befreiung von Steuern, Abgaben und Umlagen erzielt werden kann. Eigenerzeugung ist folglich meist unabhängig von den Preissignalen des Strommarktes.

Die Dekarbonisierung der Produktion verändert den Bedarf (steigt im Allgemeinen durch Elektrifizierung) und die Treiber (beispielsweise durch den Wegfall von Kuppelprodukten) der industriellen Eigenerzeugung von Strom. Die zukünftige Rolle der Eigenerzeugung von Strom variiert von

Branche zu Branche. Unter den oben genannten Maßnahmen zur Dekarbonisierung gibt es höhere Elektrifizierungsgrade sowie einen Brennstoffwechsel zu dekarbonisierten Energieträgern wie Wasserstoff und Fernwärme, die hauptsächlich oder zumindest teilweise aus Strom erzeugt werden. Dennoch sind die Industriesektoren zukünftig in einer defossilisierten Welt nur begrenzt in der Lage, Strom für den Eigenverbrauch zu produzieren. Dafür gibt es zwei Gründe. Zum einen ist die Verfügbarkeit von erneuerbaren Energiequellen, wie Biomasse oder das Photovoltaik(PV)-Potenzial auf Dächern und Fassaden, ein kritischer Faktor für das Eigenerzeugungspotenzial für industrielle Akteure unter strengen Emissionsreduktionszielen. Zum anderen werden beschränkte finanzielle Mittel möglicherweise eher für andere Maßnahmen genutzt wie Effizienzsteigerungen oder Investitionen in neue Technologien zum Ersatz der alten. Aus diesem Grund ist das Wachstum der Eigenerzeugung von Jahr zu Jahr begrenzt. Daraus lässt sich ableiten, dass der Industriesektor für eine tiefe Dekarbonisierung stärker auf die Bereitstellung von Strom und Wärme durch den Versorgungssektor angewiesen sein wird.

Abseits der Stromeigenerzeugung gibt es zukünftig in der Industrie weitere Eigenerzeugungspotenziale, die eine Einbindung industrieller Akteure in das Energiesystem mit sich bringen würden. Dies betrifft insbesondere den Sekundärenergieträger Wasserstoff, der bereits heute vor Ort überwiegend aus Erdgas hergestellt wird. Zukünftig kann dies über die Wasserelektrolyse vor Ort (dezentral) oder aus Biomasse geschehen, wobei im Vergleich zum Wasserstoffbezug 1.) die Preisrelationen / -spreads zwischen Strom und den alternativen nicht-fossilen Energieträgern und 2.) die Transportkosten entscheidend sind. Bisherige Szenarienanalysen zeigen, dass typischerweise die Eigenerzeugung von Wasserstoff günstiger sein kann, da der Stromtransport einfacher darzustellen ist, es sei denn, kostengünstiger Wasserstoff wird importiert. Auch ist die Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse für die Industrie attraktiv, insbesondere im Zusammenhang mit der Darstellung von negativen Emissionen für die Klimaneutralität.

4.5 Prioritäten für den Zeithorizont 2030

Der Zeithorizont bis 2030 ist entscheidend, um bis zum Jahr 2045 Klimaneutralität zu erreichen. In diesem Zeitraum müssen CO₂-neutrale Verfahren vom Pilot- und Demonstrations-Maßstab auf industrielles Niveau skaliert und wirtschaftlich betrieben werden. Umfangreiche Investitionen in Neuanlagen sind nötig und Lösungen zur Bereitstellung von CO₂-neutralem Wasserstoff und Strom müssen umgesetzt werden. Hierfür ist der regulatorische Rahmen mit einer klaren Perspektive zur Klimaneutralität umzugestalten (siehe Abschnitt 4.6). Neben der Schaffung dieser

wichtigen Voraussetzungen sind mit dem neuen Sektorziel für 2030 auch deutliche Emissionsreduktionen notwendig. Die Emissionen des Industriesektors müssen laut neuem Sektorziel von 190 MtCO₂äq in 2018 auf 118 MtCO₂äq in 2030 sinken. Dies erfordert eine beschleunigte Transformation in allen Bereichen. Im Folgenden werden jene Handlungsoptionen bis 2030 vorgestellt, die sich in mehreren Szenarien als robust herausgestellt haben. Weiterhin wird anhand der Szenarioergebnisse der weitere Handlungsbedarf herausgearbeitet.

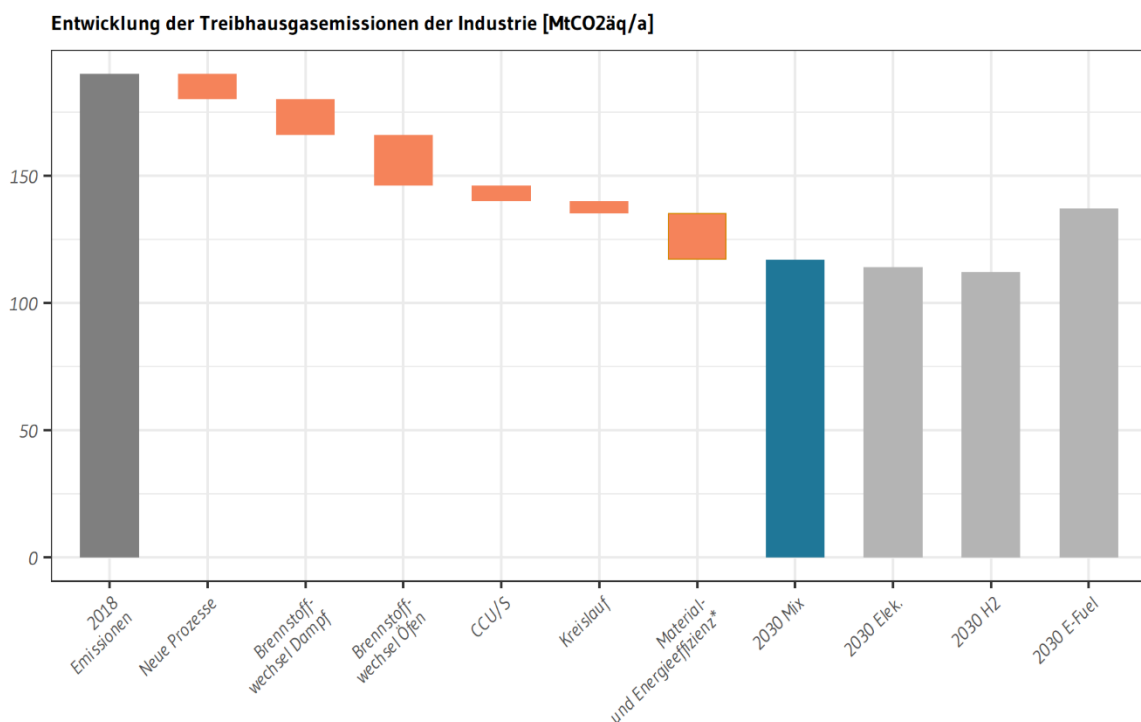


Abbildung 4.9: Beitrag einzelner Vermeidungsoptionen zur Emissionsminderung bis zum Jahr 2030 gegenüber 2018 im Szenario *Technologiemix*. Quelle: Fraunhofer ISI – FORECAST Modell.

* als Restgröße geschätzt– Effekt könnte höher liegen, da Effizienzfortschritte das Wirtschaftswachstum im gleichen Zeitraum kompensieren

Abbildung 4.9 zeigt anhand des Szenarios *Technologiemix*, welche CO₂-Minderung die einzelnen Handlungsfelder bzw. Vermeidungsoptionen bis zum Jahr 2030 gegenüber 2018 beitragen. In den Szenarien *Wasserstoff* und *Elektrifizierung* sehen die einzelnen Beiträge ähnlich aus, während das Szenario *E-Fuels* deutlicher abweicht, auch weil in diesem Szenario das Sektorziel in 2030 nicht erreicht wird. Wenngleich die einzelnen Minderungsbeiträge als Schätzungen einzuordnen sind, so wird doch ersichtlich, dass alle Handlungsfelder einen essenziellen Minderungsbeitrag leisten. Dabei entfällt die höchste Minderung mit mehr als 30 MtCO₂äq auf den Brennstoffwechsel (Dampf und Öfen). Dies umfasst die Umstellung auf Strom, Wasserstoff und Gas für die Prozesswärmeerzeugung. Material- und Energieeffizienz sind auf einen Beitrag von etwa 20 MtCO₂äq

geschätzt, wobei durch diese Effizienzsteigerungen zusätzlich die emissionssteigernden Auswirkungen des Wirtschaftswachstums kompensiert werden und die Brutto-Minderung dieses Handlungsfeldes noch höher wäre. Weiterhin wird auch deutlich, dass neue Prozesse und CCU/S mit zusammen etwa 15 Mt CO₂äq Minderung einen deutlichen Beitrag leisten, ohne den das Sektorziel in 2030 nicht erreicht würde.

Prozesswechsel auf CO₂-neutrale Verfahren

Die zentrale Grundlage der Transformationsszenarien ist die Umstellung einzelner, besonders emissionsintensiver Produktionsverfahren der Grundstoffindustrie auf Technologien, die einen (nahezu) CO₂-neutralen Betrieb erlauben. Dazu gehört die Produktion von Rohstahl, Zementklinker, Olefinen, Ammoniak und Methanol. Die Anwendung CO₂-neutraler Prozesse zur Herstellung dieser Produkte kann Signalwirkung auch auf andere Bereiche der Industrie und entlang ihrer Wertschöpfungskette haben und deren Transformation beschleunigen. Die Szenarien gehen davon aus, dass erste Anlagen ab 2025 in Betrieb gehen und bis 2030 nennenswert als kommerzielle Anlagen Marktanteile einnehmen. In der Stahlherstellung sind das 2030 mindestens 5 Mt Rohstahlproduktion über Wasserstoff-Direktreduktion (DRI) (20 % der Primärstahlproduktion), in der Ammoniakproduktion etwa 0,3 Mt (12 %) und in der Olefinherstellung 1,2 Mt (30 %). Im Zuge der Umstellung der Olefinproduktion auf die Methanol-to-Olefine-Route steigt die Methanolproduktion massiv an – von 1,2 Mt (2018) auf 5,5 Mt (2030) und bis 2045 auf 14 Mt. Die Umstellung der Primärstahlherstellung auf das DRI-Verfahren erbringt dabei die höchste CO₂-Minderung, da CO₂-intensive Kohle ersetzt wird.

Diese Umstellung ist mit Investitionen verbunden – in vielen Bereichen sind Neubauten oder umfassende Modernisierungen des Bestandes notwendig. Die Altersstruktur des Bestandes kommt dem entgegen, da bis 2030-2035 in wichtigen Prozessen der Chemieindustrie (Ammoniak, Methanol und Olefine) (Neuwirth and Fleiter, 2020) und der Primärstahlerzeugung zwischen 20 % und 50 % der Anlagen das Ende ihrer rechnerischen Lebensdauer erreichen (siehe Abbildung 4.10). Auf der anderen Seite besteht die Gefahr von Re-Investitionen in fossile Anlagen. Um diese zu vermeiden, sollten Gelegenheitsfenster, die sich aus den bestehenden Modernisierungszyklen ergeben, für die Umstellung auf eine CO₂-neutrale Produktion genutzt oder dafür vorbereitet werden, zum Beispiel mittels Direktreduktion über Erdgas.

Die Umstellung auf CO₂-neutrale Prozesse beinhaltet in den meisten Fällen auch den Wechsel von billigen fossilen Energieträgern auf teure CO₂-neutrale Sekundärenergieträger. Ein substanzieller Aufbau von entsprechenden Produktionskapazitäten bis zum Jahr 2030 ist nur möglich,

wenn es gelingt, eine verlässliche Perspektive für den wirtschaftlichen Betrieb dieser Anlagen zu schaffen.

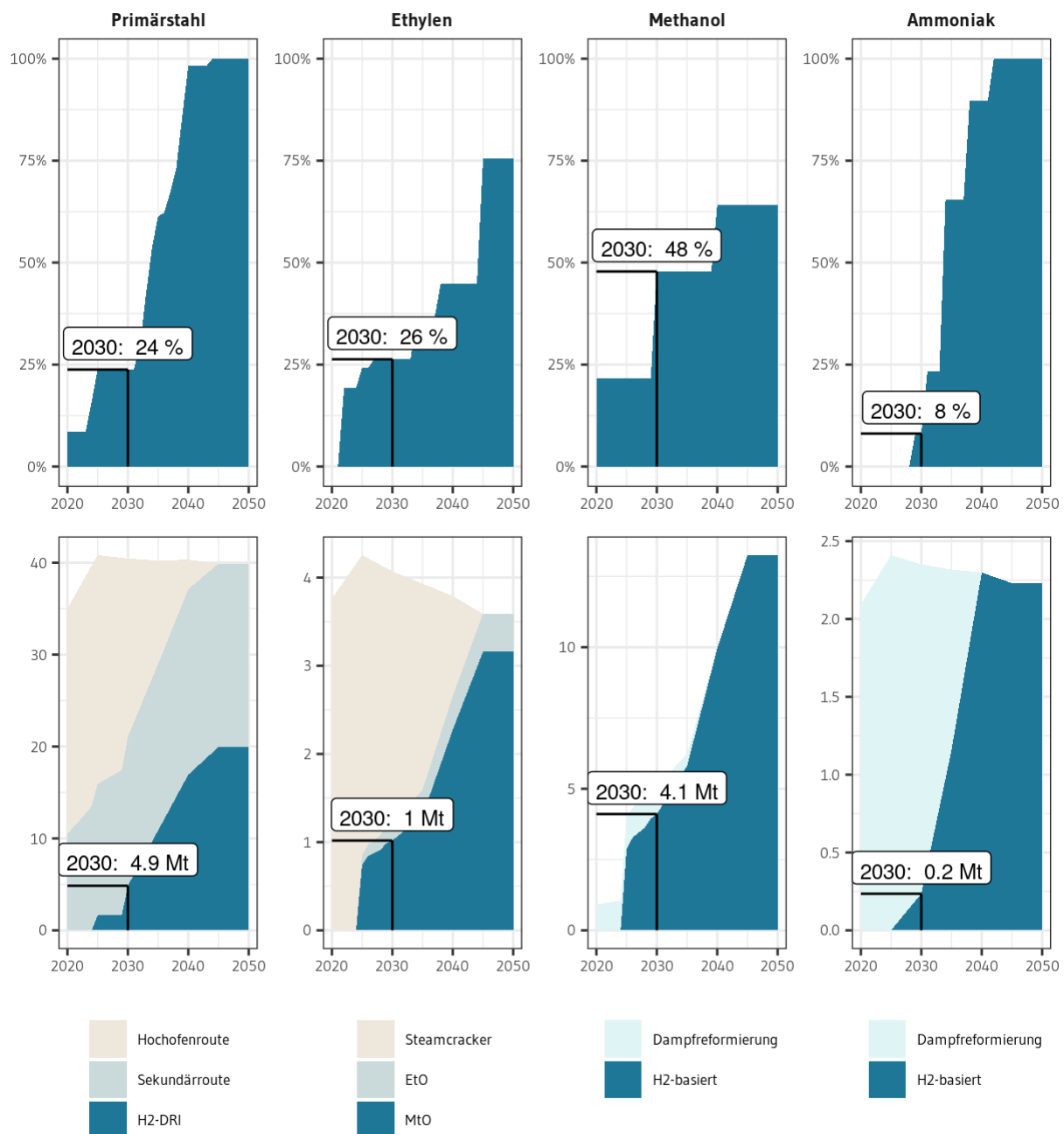


Abbildung 4.10: Reinvestitionsbedarf in Anlagen ausgewählter Produkte (oben) und hinterlegte Marktdiffusion neuer Verfahren im Szenario Technologiemix (unten). Diese Angaben basieren auf Annahmen zum Investitionszyklus und bekannten letzten Modernisierungszeitpunkten. Im Einzelnen kann der tatsächliche Modernisierungsbedarf abweichen und ist insbesondere strategischen Unternehmensentscheidungen unterworfen. Die Angaben sind daher als ungefähre Größenordnung zu verstehen. Quelle: Fraunhofer ISI – FORECAST Modell

Brennstoffwechsel der Dampferzeugung und Industrieöfen

Im Jahr 2018 entfallen etwa zwei Drittel der CO₂-Emissionen des Industriesektors auf die Bereitstellung von Prozesswärme (siehe Abbildung 4.2), die etwa 475 TWh Endenergie benötigt - zum großen Teil Erdgas und Kohle. Die CO₂-neutrale Prozesswärmeversorgung ist damit eine Schlüsselstrategie zur Dekarbonisierung der Industrie. Im Szenario *Technologiemix* ist der Wechsel zu CO₂-armen Energieträgern das wirksamste Handlungsfeld mit einer geschätzten Minderung von etwa 30 MtCO₂ bis 2030 gegenüber 2018.

Die Prozesswärmeerzeugung lässt sich in die den jeweiligen Produktionsverfahren zugeschnittenen Öfen (255 TWh in 2018) auf der einen Seite sowie die Dampferzeugung (215 TWh in 2018) auf der anderen Seite unterteilen. Abbildung 4.11 zeigt, wie sich der Energieverbrauch in diesen beiden Segmenten bis 2030 und 2045 verändert. Während der Energieeinsatz in Industrieöfen im Jahr 2018 noch nahezu ausschließlich auf fossilen Energieträgern beruht, verzeichnen Strom und Wasserstoff bis zum Jahr 2030 in den meisten Szenarien einen deutlichen Anstieg, welcher besonders den Einsatz von Kohle zurückdrängt. Zu diesem Technologiebereich zählen auch große Einzelanlagen der Eisen- und Stahlerzeugung, der Chemie und der Mineralienindustrie, die ihre Emissionen vor allem durch den Wechsel auf CO₂-neutrale Verfahren mindern. Auch in der Dampferzeugung sinkt der Anteil fossiler Energien deutlich, von 143 TWh in 2018 auf 90 TWh in 2030 im Szenario *Technologiemix*. Besonders der Einsatz von Erdgas sinkt in allen Szenarien außer *E-Fuels*. Die Lücke wird durch Strom, Wasserstoff und Biomasse geschlossen.

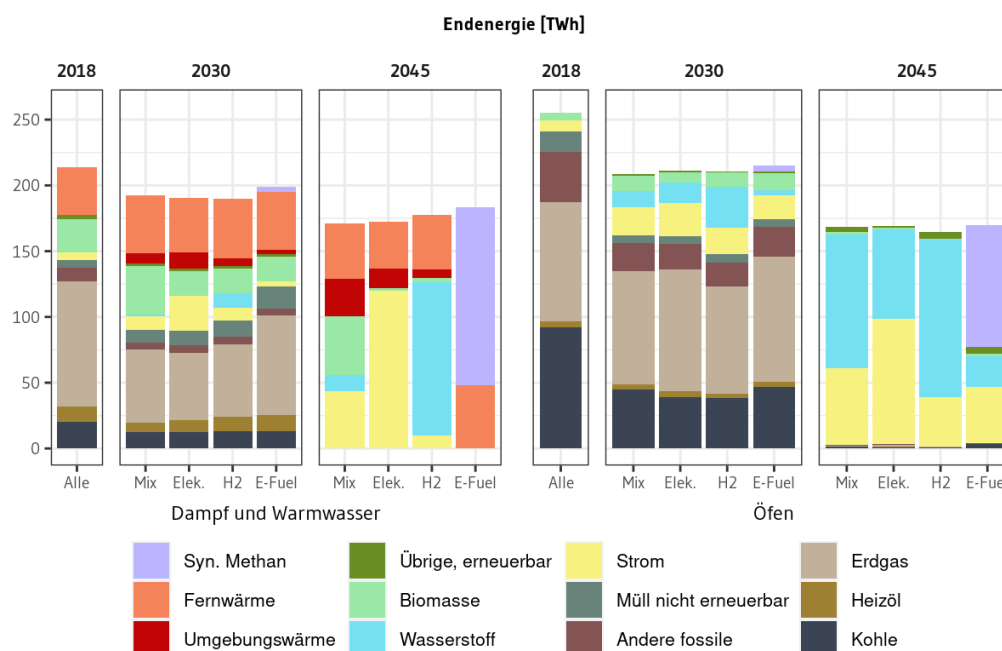


Abbildung 4.11: Energieverbrauch für die Dampferzeugung sowie Industrieöfen im Szenariovergleich.
Quelle: Fraunhofer ISI – FORECAST Modell.

In allen Szenarien verändert sich der Anlagenpark der Dampferzeugung stark - außer im Szenario *E-Fuels*, in welchem die gasbasierte Dampferzeugung größtenteils erhalten bleibt. In den anderen Szenarien zeigt sich bis 2030 ein Rückgang der Dampferzeugung aus Erdgas um etwa 50 TWh, welcher durch den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen, Biomasse, Elektrodenkesseln sowie Wasserstoff kompensiert wird. Die Wirtschaftlichkeit CO₂-neutraler Dampferzeugung ist hauptsächlich vom Preisunterschied der Energieträger abhängig – Investitionen haben nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten. Entsprechend kann die multivalente Dampferzeugung, welche bestehende KWK-Anlagen und Erdgas-Dampfkessel mit neuen Elektrodenkesseln kombiniert, zentral sein, um die Transformation des Anlagenbestandes bereits in den kommenden Jahren zu beginnen.

CO₂-Abscheidung, Nutzung und Speicherung prozessbedingter Emissionen (CCU/S)

Etwa ein Drittel der THG-Emissionen des Industriesektors sind prozessbedingt (2018: 61 MtCO₂äq), entstehen also nicht aus der energetischen Nutzung von Energieträgern (UNFCCC, 2021). Bis 2030 sinken diese in den untersuchten Szenarien auf 40 Mt. Große Beiträge zu dieser Reduktion liefern Prozessumstellungen in der Stahl- und Chemieindustrie sowie die verringerte Nutzung von Fluorkohlenwasserstoffen (FKW). In der Zement- und Kalkherstellung genügt es nicht, den Einsatz von Zuschlagstoffen oder CO₂-armen Bindemitteln zu erhöhen. Entsprechend ist in allen Szenarien der Einsatz von CO₂-Abscheidung und -nutzung oder -speicherung (CCU/S) nötig.

Bis 2030 sind in den Szenarien 30 % der Produktionsmenge dieser beiden Produkte mit CCU/S ausgerüstet, wodurch 6 Mt der dann noch verbleibenden CO₂-Emissionen vermieden werden. In Anbetracht der dafür notwendigen Voraussetzungen ist dies sehr ambitioniert. Dazu gehören die Umsetzung entsprechender rechtlicher Rahmenbedingungen sowie der Aufbau einer Infrastruktur für den Transport von Produktionsanlagen zu Speicherstätten und Nachfragern in der chemischen Industrie. Wichtige Grundlage ist ein gesellschaftlicher-politischer Konsens, dass CCU/S von prozessbedingten Emissionen aus heutiger Sicht notwendig ist, um CO₂-Neutralität bis 2045 zu erreichen.

Energie- und Materialeffizienz als Rückgrat der CO₂-neutralen Industrieproduktion

Eine ambitionierte Steigerung von Energie- und Materialeffizienz in allen Anwendungen und Branchen ist Voraussetzung für eine CO₂-neutrale Industrieproduktion in den untersuchten Szenarien.

narien. Sie reduziert den Endenergiebedarf und senkt so die Kosten beim Ausbau der Erneuerbaren Energien, Netzausbau und Import von Sekundärenergieträgern. Im Szenario *Technologiemix* reduziert sich die Endenergienachfrage (ohne stoffliche Nutzung) durch steigende Energie- und Materialeffizienz von 730 TWh (2018) auf 637 TWh (2030) – bei gleichzeitig steigender Wertschöpfung. In diesem Zeitraum sinkt die Endenergieintensität bezogen auf die Bruttowertschöpfung von 1,37 kWh/Euro in 2018 auf 1,07 kWh/Euro in 2030, was einem mittleren jährlichen Effizienzfortschritt von etwa 2 % entspricht. Bis 2045 sinkt die Energieintensität weiter auf 0,83 kWh/Euro. Im Vergleich dazu sank die Energieintensität im Zeitraum 2000 bis 2015 im Mittel lediglich um jährlich etwa 1,3 % (UNFCCC, 2021). Bis 2030 ist somit eine deutliche Steigerung von Energie- und Materialeffizienzfortschritt nötig, um den Szenariopfad zu erreichen und die Potenziale auszuschöpfen.

Ein Großteil des Strombedarfs der Industrie entfällt auf Querschnittstechniken wie Motoren, Pumpen, Kompressoren und Druckluftsysteme. Von der Gesamtheit der Stromverwendung in der Industrie in Höhe von 226 TWh (2018) nutzen diese Querschnittstechnologien (inklusive Bereitstellung von Prozesskälte) 168 TWh. Alle Szenarien nehmen einen ambitionierten Effizienzpfad dieser Anwendungen an, wodurch ihr Strombedarf dieser Querschnittstechniken bis 2030 auf 150 TWh sinkt. Voraussetzung hierfür sind wirksame Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Überwindung von Markthemmnissen.

Beispielhaft für die Bedeutung – aber auch die Herausforderungen – einer verstärkten Kreislaufwirtschaft kann die Sekundärstahlproduktion betrachtet werden, die in allen Szenarien eine Schlüsselstrategie darstellt. Im *Technologiemix*-Szenario steigt der Anteil der Sekundärroute aus recyceltem Stahlschrott an der Rohstahlproduktion von 30 % (2018, 13 Mt) auf 39 % (2030, 16 Mt). Ohne Betrachtung anderer Effekte spart dieser Anstieg durch die geringere Energieintensität der Route (Hochofenroute: $\sim 18 \text{ GJ/t}_{\text{Rohstahl}}$, Sekundärroute: $\sim 3 \text{ GJ/t}_{\text{Rohstahl}}$) 12,5 TWh Energie ein. Da diese überwiegend durch kohlebasierte Energieträger bereitgestellt wird, entspricht dies einer THG-Emissionsminderung von etwa 4 Mt. Würde dieser Aufwuchs der Sekundärroute ($\sim 3 \text{ Mt}$) über das Primärverfahren auf Basis von Wasserstoff ($\text{H}_2\text{-DRI}$) hergestellt, so wären jährlich zusätzlich 8 TWh Wasserstoff nötig. Die stärkere Nutzung der Sekundärroutenproduktion ist kein einfaches Unterfangen. Maßgebliche Herausforderungen sind die Verbesserung der Erfassung und Sortierung bzw. neues Produktdesign, um sortenreinere Schrotte für hochwertige Stahlanwendungen nutzen zu können, sowie die Verfügbarkeit von Stahlschrott (Material Economics, 2018). Besonders um den Anteil der Sekundärroute bis 2045 weiter auf rund 60 % zu steigern, müssen diese Hemmnisse überwunden werden.

Voraussetzungen: Verfügbarkeit von CO₂-neutralen Sekundärenergieträgern

All diese Szenarienergebnisse stehen unter der Annahme, dass CO₂-neutrale Sekundärenergieträger wie Strom, Wasserstoff und PtG in großen Mengen verfügbar sind und von der Industrie genutzt werden. Werden Wasserstoff und PtG CO₂-neutral über Elektrolyse erzeugt, ergibt sich ein potenziell sehr hoher Strombedarf, wenngleich dieser außerhalb der genutzten Systemgrenze des Industriesektors liegt. Abbildung 4.12 zeigt den potenziellen Strombedarf in Summe, indem der Strombedarf für Wasserstoff und PtG als Stromäquivalente berechnet wurde (Annahme eines mittleren Nutzungsgrades von 70 % für die Erzeugung von Wasserstoff und 50 % bei PtG). Inklusive dieser Stromäquivalente steigt der Strombedarf der Industrie von heute 200 TWh auf 600 bis 950 TWh bis 2045. Besonders die Szenarien mit einem hohen Bedarf an PtG und Wasserstoff zeichnen sich durch eine in Summe höhere potenzielle Stromnachfrage aus. Im Szenario *Elektrifizierung* liegt der Stromverbrauch durch den effizienteren Einsatz direkter Elektrifizierung der Prozesswärme niedriger, jedoch gibt es auch hier eine hohe Nachfrage nach Wasserstoff als Rohstoff für die Chemieindustrie sowie die Stahlerzeugung. Im Szenario *Technologiemix* reduzieren direkte Elektrifizierung sowie der Einsatz von Biomasse in der Prozesswärme den potenziellen Strombedarf noch deutlicher. Jedoch verzeichnet auch dieses Szenario mehr als eine Verdreifachung der Stromnachfrage, wenn die Stromäquivalente der Wasserstofferzeugung einbezogen werden. Bis zum Jahr 2030 schwanken die Stromäquivalente aus Wasserstoff- und PtG-Erzeugung zwischen 60 bis 100 TWh zusätzlichem Strombedarf.

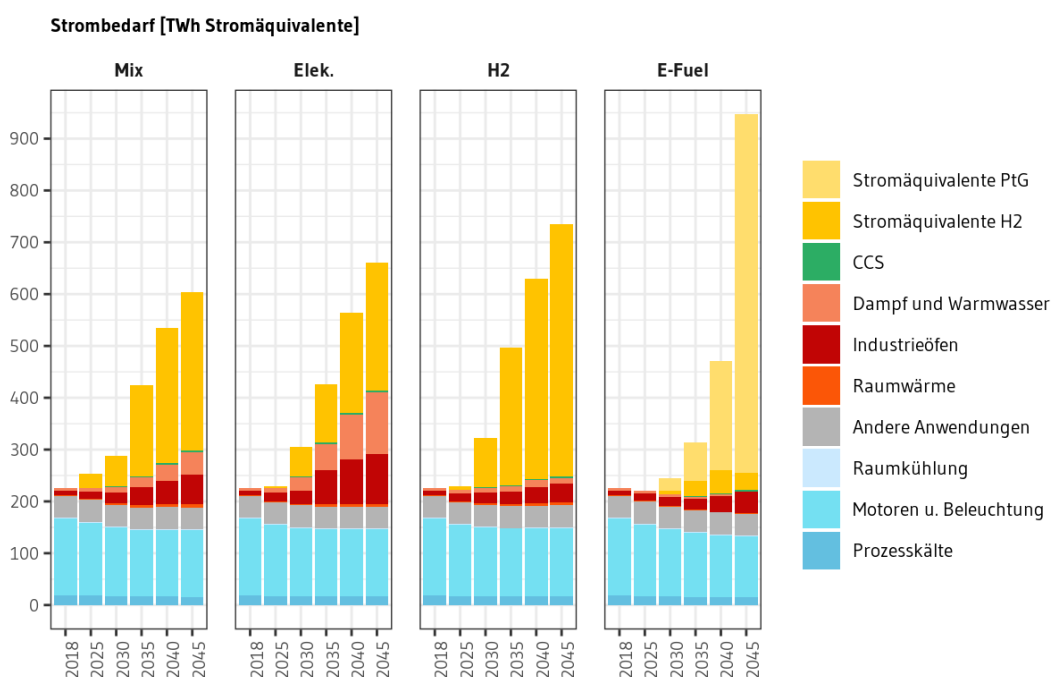


Abbildung 4.12: Entwicklung des Strombedarfs inkl. der Erzeugung von Wasserstoff und PtG bis zum Jahr 2045. Quelle: Fraunhofer ISI – FORECAST Modell.

Diese Betrachtung zeigt die zentrale Bedeutung, die die Bereitstellung von CO₂-neutralen Sekundärenergieträgern für die Transformation der Industrieproduktion hat. Um das Sektorziel des Klimaschutzgesetzes zu erreichen, sind bis 2030 bereits signifikante Mengen nötig. Diese gilt es bereitzustellen. Gleichzeitig sollten beim Aufbau von Infrastruktur für Transport und Erzeugung die deutlich größeren Mengen im Zeitraum 2030-2045 berücksichtigt werden.

Kurzfristig bis mittelfristig könnte Erdgas als Übergangslösung in der Stahlherstellung relevant werden, indem neue Direktreduktionsanlagen zunächst Erdgas nutzen und erst später auf Wasserstoff umstellen. Eine solche Strategie kann sinnvoll sein, um Gelegenheitsfenster bei anstehenden Re-Investitionen zu nutzen, bereits in Transformationstechniken zu investieren und gleichzeitig hohe Emissionsminderungen von über 60 % gegenüber der Primärstahlerzeugung im Hochofen zu erzielen. Für die Chemieindustrie wäre eine solche Übergangslösung ebenfalls denkbar, indem die MtO-Route zunächst mit erdgasbasiertem Methanol genutzt wird. Wenn möglich ist – aufgrund mit der Erdgasnutzung verbundener massiver Emissionen außerhalb des Industriesektors – eine direkte Umstellung auf CO₂-neutrale Energieträger deutlich vorzuziehen.

4.6 Welche Instrumente und Maßnahmen sind für die Zielerreichung besonders wichtig?

Ambitionierte Klimaziele brauchen ambitionierte Maßnahmen. Der aktuelle Politikmix ist nicht ausreichend, um mittelfristig die Sektorziele zu erreichen und bietet vor allem keine ausreichenden Anreize für die grundlegende langfristige Transformation. Für eine erfolgreiche Industriewende bedarf es daher einer Anpassung des regulatorischen Rahmens. Neben der Überwindung verschiedener Hemmnisse besteht dabei eine besondere Herausforderung darin, den Wandel zu vollziehen und dabei die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Unternehmen zu wahren.

Ein starkes CO₂-Preissignal des EU-ETS kann ein zentrales Instrument zur Ermöglichung der Industrietransformation sein. Kurz- bis mittelfristig werden aber weitere Instrumente benötigt, da der Zertifikatspreis vermutlich noch nicht hoch genug sein wird, um hohe Einzelinvestitionen in CO₂-neutrale Verfahren zu ermöglichen -insbesondere, da diese häufig teure Sekundärenergieträger wie Strom, Wasserstoff oder PtG nutzen. Darüber hinaus gibt es Bereiche, die vom EU-ETS selbst bei einem höheren CO₂-Preis nicht (effektiv) adressiert werden, aufgrund des ETS-Designs, aber auch wegen verschiedener Formen des Marktversagens. Dazu zählen z. B. Veränderungen entlang der Wertschöpfungsketten bis in die Endverbrauchssektoren.

Alle Szenarien zeigen die zentrale Bedeutung der Umstellung auf CO₂-neutrale Herstellungsverfahren in den Branchen der Grundstoffindustrie. Die Vermeidungskosten dieser Verfahren liegen mit 100-200 Euro/tCO₂ über dem heutigen und bis 2030 erwarteten CO₂-Preis. Abhängig von den zukünftigen Preisen CO₂-neutraler Energieträger können diese aber auch noch deutlich höher ausfallen (über 200 Euro/tCO₂).

Insbesondere sechs Elemente des Instrumentenmixes sind hier zu nennen:

1. **Klimaschutzdifferenzverträge**, so genannte Carbon Contracts for Difference (CCfD) können die Wirtschaftlichkeitslücke schließen und so dafür sorgen, dass so genannte Schlüsseltechnologien, die einen wichtigen Beitrag zur Industriewende leisten, bereits frühzeitig auf industrielles Niveau hochskaliert werden. Gerade für den Zeitraum bis 2030 sind CCfDs ein gutes Instrument, um die Markteinführung von Schlüsseltechniken zu ermöglichen, mit steigendem CO₂-Preis im ETS sollten sie langfristig auslaufen. Begleitend kann der Transformationsprozess durch den Ausbau bestehender Forschungs- und Investitionsförderung, Garantien, Bürgschaften und Green Bonds unterstützt werden.
2. In ähnlicher Weise können **grüne Leitmärkte** über die Generierung von Märkten für CO₂-neutrale Produkte die großindustrielle Markteinführung und Hochskalierung der Produktionskapazitäten beschleunigen. Grüne Leitmärkte können über verschiedene Instrumente wie Quoten für CO₂-neutrale oder -arme Materialien, Produktkennzeichnungen oder die öffentliche Beschaffung gefördert werden. Zu Beginn kann dies über Quoten für grüne Produkte geschehen (oder perspektivisch über den Ausschluss „grauer“ Produkte); auch entsprechende Verpflichtungen in der öffentlichen Beschaffung können anfangs Nachfrage schaffen. In einem zweiten Schritt könnten diese Leitmärkte ausgedehnt werden, etwa durch Labelling und Transparenz über Lieferketten mit dem Ziel, höhere Preise für CO₂-arm hergestellte Produkte zu ermöglichen.
3. Die Szenarien gehen von einem kontinuierlich steigenden CO₂-Preis aus. Wenn ein steigender CO₂-Preis von Akteuren antizipiert werden kann, so werden Investitionen frühzeitig ermöglicht. Herrscht hingegen hohe Unsicherheit bezüglich des zukünftigen CO₂-Preises werden Investitionen nicht getätigt. Die Einführung eines **Mindestpreispfades im EU-ETS** kann hier die Anreizwirkung des Emissionshandels erhöhen.
4. Ein auf die Erfordernisse der Industrie abgestimmter **Infrastrukturausbau** ist notwendig. Unternehmen sehen sich im Rahmen der Energiewende einer Reihe von Unsicherheiten ausgesetzt, dies betrifft insbesondere die (lokale) Verfügbarkeit und die Kosten/Preise von CO₂-neutralen Energieträgern wie Strom, Wasserstoff oder PtG. Ein Wasserstoff-

Backbone-Netz, welches die großen Industriestandorte verbindet, scheint eine robuste Strategie zu sein, die zielgerichtet verfolgt werden sollte. Auch relevant ist die Konzeption eines CO₂-Transportnetztes für den Transport des in Prozessen abgeschiedenen CO₂ zu Standorten der CO₂-Nutzung. Klare Meilensteine können hier für mehr Planungssicherheit sorgen.

5. Eine weitere Säule aller Szenarien ist ein beschleunigter Fortschritt bei der **Materialeffizienz** sowie höhere Anteile von **Sekundärproduktion**, besonders bei den Produkten und Materialien der Grundstoffindustrie. Ein starker CO₂-Preis kann auch hier Anreize setzen, wird alleine aber vermutlich nicht ausreichen, da das CO₂-Preissignal abhängig von der freien Zuteilung ggf. nicht vollständig eingepreist wird bzw. im Vergleich zu anderen Kostenkomponenten bei Endprodukten nicht hoch genug wäre, um Verhaltensänderungen zu induzieren.
6. Für die Stärkung der **Wettbewerbsfähigkeit** der deutschen Industrie können neben einer Technologieförderung (siehe oben Pkt. 1) zusätzlich kurzfristig auch CBAMs eine Hilfestellung bieten. Solche Lösungen sollten aber möglichst schnell durch ein weltweit harmonisiertes Klimaschutzregime abgelöst werden, wofür politische Prozesse aufgebaut und vorangetrieben werden müssen.

4.7 Fazit

Die diskutierten Szenarien zeigen, dass das Ziel eines nahezu klimaneutralen Industriesektors im Jahr 2045 möglich, aber mit sehr hohen Anstrengungen verbunden ist. Diese Transformation hin zu einer nahezu CO₂-neutralen industriellen Produktion setzt grundlegende Weichenstellungen voraus. CO₂-neutrale Verfahren müssen bereits 2025/2030 marktfähig sein und bis 2045 eine 100-prozentige Bestandsdiffusion erreicht haben. Dafür muss ein wirtschaftlicher Betrieb dieser Verfahren gewährleistet werden. Dies gilt ebenso für die Dekarbonisierung der verbleibenden Prozesswärme (z. B. den Einsatz von bivalenten/elektrischen Kesseln in der Dampferzeugung), deren Wirtschaftlichkeit maßgeblich vom Preisunterschied der Energieträger abhängig ist. Eine weitere Grundvoraussetzung für die hier dargestellte Industriewende bilden ausreichend vorhandener grüner Strom sowie Wasserstoff oder PtG. Der Umbau und Ausbau von entsprechenden Transportinfrastrukturen für Wasserstoff und Strom muss zügig und großflächig geschehen. Dabei sollte der Aufbau eines Wasserstoff-Transportnetzes große Industrienachfrager berücksichtigen. Energie- und Materialeffizienz sowie Kreislaufwirtschaft werden weiter ambitioniert gesteigert.

gert und vorhandene Potenziale werden über beste verfügbare Techniken ausgeschöpft, um Endenergiebedarf und Kosten (Infrastruktur, EE-Ausbau, Energieimporte) der Transformation zu senken. Dies muss begleitet werden von einer Erweiterung des regulatorischen Rahmens, welche deutlich über die derzeit implementierten und beschlossenen Maßnahmen hinausgeht. Zentrale Herausforderungen sind die höheren laufenden Kosten CO₂-neutraler Technologien, der Infrastrukturausbau, die effektive Umsetzung von CO₂-Preis-Signalen entlang der Wertschöpfungsketten und die Reduzierung von Unsicherheiten bezüglich großer strategischer Investitionen sowie eine klare Perspektive für den wirtschaftlichen, groß-industriellen Betrieb von CO₂-neutralen Verfahren.

Literaturangaben

- AGEB, 2020a. Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2018 und 2019 sowie zusammenfassende Zeitreihen zum Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken für Jahre von 2009 bis 2019. AGEB [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_19_v3.pdf.
- DECHEMA, 2017. Low carbon energy and feedstock for the european chemical industry - Technology study. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf.
- E&M Combustion, 2019. E & M Combustion develops a hydrogen burner for a chemical plant in Portugal. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://emcombustion.es/en/hydrogen-burner/>.
- Fahl U, Hufendiek K, Kittel L, et al., 2021. Kurzdossier: Industrierende - Wettbewerbseffekte und Carbon Leakage. Neue Politikmaßnahmen im Zuge des Europäischen Green Deal. | Ariadne. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/kurzdossier-carbonleakage/>.
- Fleiter T, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Hrsg), 2013. Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart (ISI-Schriftenreihe „Innovationspotenziale“) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2013/Umweltforschungsplan_FKZ-370946130.pdf.
- Fleiter T, Rehfeldt M, Herbst A, Elstrand R, Klingler A-L, Manz P, Eidelloth S, 2018. A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. Energy Strategy Reviews, 22:237–254 DOI: 10.1016/j.esr.2018.09.005.
- Geres R, Kohn A, Lenz SC, Ausfelder F, Bazzanella A, Möller A, FutureCamp Climate GmbH, DECHEMA G für CT und B, 2019. Roadmap Chemie 2050 auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland: eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://edocs.tib.eu/files/e01fn19/1682254917.pdf>.
- International Energy Agency I, 2020. Iron and Steel Technology Roadmap. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf.
- Madeddu S, Ueckerdt F, Pehl M, Peterseim J, Lord M, Kumar KA, Krüger C, Luderer G, 2020. The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). Environ Res Lett, 15(12):124004 DOI: 10.1088/1748-9326/abbd02.
- Material Economics, 2018. The Circular Economy - a Powerful Force for Climate Mitigation. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://materialeconomics.com/material-economics-the-circular-economy.pdf?cms_fileid=340952bea9e68d9013461c92fbc23cae.
- Neuwirth M, Fleiter T, 2020. Hydrogen technologies for a CO₂-neutral chemical industry – a plant-specific bottom-up assessment of pathways to decarbonise the German chemical industry. In: European Council for an Energy-Efficient Economy -ECEEE-, Stockholm: Industrial Efficiency 2020 - Decarbonise Industry! eceee Industrial Summer Study 2020. , Chalmers Lindholmen Conference Centre, Gothenburg, Sweden; Digital Event, S. 487–497 [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-605874.html>.
- Palacios A, Bradley D, 2021. Conversion of natural gas jet flame burners to hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 46(33):17051–17059 DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.144.

- Purr K, Günther J, Lehmann H, Nuss P, 2019. Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE. Climate Change, 36/2019. In: Umweltbundesamt U (Hrsg) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_auflage2_juni-2021.pdf.
- Rehfeldt M, Fleiter T, Worrell E, 2018. Inter-fuel substitution in European industry: A random utility approach on industrial heat demand. Journal of Cleaner Production, 187:98–110 DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.179.
- Smith C, Hill A, Torrente-Murciano L, 2020. Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. Energy Environ Sci, 13(2):331–344 DOI: 10.1039/C9EE02873K.
- Toyota, 2018. Toyota Develops World’s First General-purpose Hydrogen Burner for Industrial Use: Newly developed structures reduce NOx emissions to below natural gas burner levels, zero CO2 emissions from combustion. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/25260001.html#>.
- UNFCCC, 2021. Inventarbericht und CRF-Tabellen für Deutschland. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2021>.
- Verein Deutscher Zementwerke e.V. V, 2020. Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien: Eine CO2- Roadmap für die deutsche Zementindustrie. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_Zement_Beton_2020.pdf.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg), 2019. Rohstahlproduktion in Deutschland: Jahresbilanz 2018. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.stahl-online.de/medieninformationen/medieninformationen-421/>.
- WS-Wärmeprozessstechnik GmbH, 2020. Green Gas Ready. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://flox.com/documents/22_GreenGasReady.pdf.
- Zhao Y, McDonell V, Samuelsen S, 2019. Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 44(47):26049–26062 DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.011.



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

Folgen Sie dem Ariadnefaden:



@AriadneProjekt



ariadneprojekt.de

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

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

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