

Klimaschutzszenarien 2050: Modellierung, Analyse und Vergleich von Zielszenarien- Sektor Industrie

Sektor Industrie

Karlsruhe, Berlin, 4.
Februar 2026

Autorinnen und Autoren

Öko-Institut e.V.
Dr. Katja Schumacher
Dennis Appenfeller

Fraunhofer ISI
Dr. Matthias Rehfeldt

Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin
Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Fraunhofer ISI
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe
Telefon +49 721 6809-272

Kontakt
info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
2 Vorgehen und Methode	9
3 Ausgestaltung Instrumente	11
4 Folgenabschätzung	13
4.1 THG-Emissionen	13
4.2 Endenergieverbrauch	15
4.3 Strukturelle Entwicklung	16
4.4 Sektorale ökonomische Folgen	22
5 Kernbotschaften	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der Szenariostruktur im Industriesektor	9
Abbildung 2: Treibhausgasemissionen der Industrie (bottom-up Berechnung)	13
Abbildung 3: Endenergiebedarf Industrie	15
Abbildung 4: Endenergiebedarf Industrieöfen	16
Abbildung 5: Endenergiebedarf Industrie für Dampf, Heißwasser und Raumwärme	17
Abbildung 6: Strombedarf Industrie nach Anwendung	19
Abbildung 7: Wasserstoffbedarf Industrie nach Anwendung (energiebedingt)	20
Abbildung 8: Rohstoffbedarf Industrie nach Energieträger	21
Abbildung 9: Mehrinvestitionen und Investitionszuschüsse	24
Abbildung 10: Betriebskosten und Betriebskostenzuschüsse nach Technologiebereich	25
Abbildung 11: Energieträgerkosten	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Instrumente KS1 „Policy Mix“ und KS4 „Ordnungsrecht“ 11

Tabelle 2: Übersicht der Instrumente KS2 „ETS/BEHG-Preis“ und KS3 „Einheitlicher THG-Preis“ 12

Abkürzungsverzeichnis

KS1-4	Klimaschutzszenario 1-4
REF	Referenzszenario
MMS PB23	Mit-Maßnahmen-Szenario aus dem Projektionsbericht 2023
EU-EHS	Europäisches Emissionshandelssystem
BEHG	Nationale Bepreisung von nicht im EU-EHS erfassten Treibhausgasemissionen (nach Brennstoffemissionshandelsgesetz)
MtO	Wasserstoffbasierte Produktionsroute für Olefine (Methanol-to-Olefins)

1 Einleitung

Der Industriesektor umfasst die verarbeitende Industrie, darin besonders energieintensive Branchen (Stahlherstellung- und -verarbeitung, Grundstoffchemie, nicht-metallische Mineralien, Papier, Nicht-Eisen-Metalle, Glas und Keramik, Metallbearbeitung) und relativ dazu weniger oder nicht-energieintensive Branchen (Maschinenbau, Fahrzeugbau, Nahrungsmittelverarbeitung, Sonstige). In dieser Abgrenzung verursachte die Industrie 2021 etwa 29 % der deutschen Endenergiennachfrage (Destatis 2024). Dabei ist die Unterscheidung entlang der Energieintensität auch gesamtwirtschaftlich relevant, da die energieintensiven Branchen zwar knapp 80 % des Energiebedarfs ausmachen, aber nur mit etwa 15 % zu Beschäftigten und der Bruttowertschöpfung der Industrie beitragen (Destatis 2024). Gleichzeitig stellen sie Vorprodukte für jene (nicht-energieintensiven) Branchen bereit, die in hohem Maße zu Beschäftigung und Wertschöpfung beitragen – die verarbeitende Industrie bildet also eng verknüpfte Wertschöpfungsketten.

Aus dieser Struktur ergeben sich mit dem Ziel der Dekarbonisierung allgemeine (branchenübergreifende) und spezifische (auf eine Branche oder ein Produkt fokussierte) Herausforderungen. Um diese hinreichend genau abzubilden, werden in der hier verwendeten Methodik sowohl branchenübergreifende als auch branchenspezifische Strategien dargelegt, die bedeutende Interaktionen berücksichtigen¹. Den Rahmen für diese Strategien bilden die Sektorziele des Klimaschutzgesetzes. Sie erlangen nicht nur durch Gesetzeskraft Relevanz, sondern bilden auch gesamtgesellschaftlich und methodisch einen Rahmen, an denen Dekarbonisierungsstrategien gemessen werden können. Insbesondere adressieren sie Trägheiten des Systems, indem sie zu vorausschauender Transformationsplanung zwingen. Hervorstechende Beispiele dafür sind Infrastrukturbedarfe und Gelegenheitsfenster für Reinvestitionen in industrielle Anlagen mit sehr hohen Lebensdauern.

Eine zentrale branchenübergreifende Herausforderung des Sektors besteht in der Verdrängung von Erdgas als Referenzenergieträger² zur Erzeugung von Prozesswärme – sei es durch direkte Elektrifizierung, biogene synthetische Energieträger, Suffizienz, Effizienz und/oder Kreislaufwirtschaft – wobei alle hierzu diskutierten Strategien weitere Herausforderungen beinhalten. Ein Beispiel für eine produktspezifische Herausforderung ist der Umgang mit prozessbedingten Treibhausgasemissionen in der Verarbeitung von Steinen und Erden – konkret der Herstellung von Zementklinker und Kalk.

Entlang dieser Dimensionen entwirft dieser Bericht Szenarien, mit denen unterschiedliche gesellschaftliche Herangehensweisen – dargestellt über die Ausrichtung politischer Instrumentenpakete – dargestellt werden. In KS1 wird der bisherige Politikmix – bestehend aus starken Rollen für CO₂-Bepreisung und subventionierter Markteinführung CO₂-armer Produktionsverfahren – quantitativ weiterentwickelt, um Klimaziele zu erreichen. In KS2 und KS3³ wird stärker auf die Rolle der CO₂-Bepreisung gesetzt und Subventionsinstrumente nur in strikten Ausnahmen eingesetzt. In KS4 nehmen ordnungsrechtliche Maßnahmen wie Neubauverbote und reglementierter Anlagen austausch maßgeblich Raum ein.

¹ Eine umfassende Abbildung der Vernetzung der Branchen wird hier nicht vorgenommen.

² 2021 war Erdgas mit 30 % Anteil an der Energieverwendung (Endenergie und stoffliche Nutzung) der Industrie der meistgenutzte Energieträger, gefolgt von Strom und Kohle und Mineralölen (Destatis 2024). Betrachtet man ausschließlich die Prozesswärmeerzeugung, lässt sich der Erdgasanteil mit noch etwas höherem Wert (35 %) abschätzen (Fraunhofer ISI 2024).

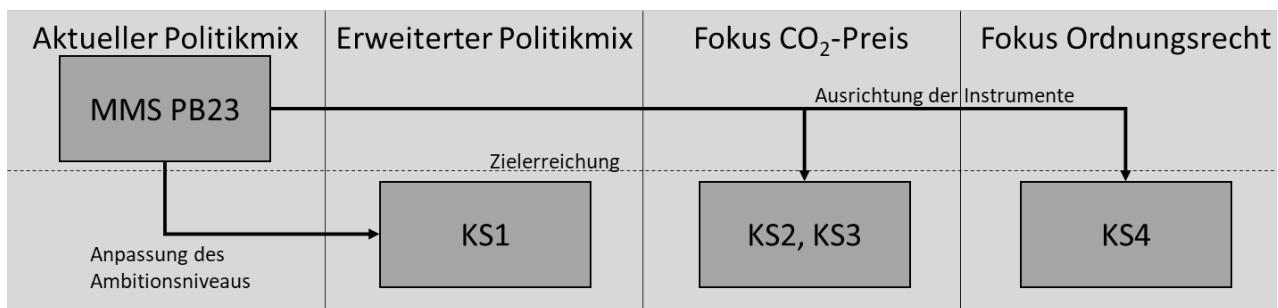
³ Für den Industriesektor sind diese Szenarien sehr ähnlich, in anderen Sektoren sind die Unterschiede prägnanter.

An dieses Szenariodesign besteht die Erwartung, Erkenntnisse über die potenzielle Zielpfadkompatibilität der Ansätze, pfadspezifische Herausforderungen und – im Rahmen der nachgelagerten ökonomischen Folgenabschätzung – die Auswirkungen auf Kosten und ihre gesellschaftliche Verteilung zu gewinnen. Konkret umgesetzt wurden die Szenarien auf Basis des Projektionsberichts 2023 (PB23), dessen Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) zu KS1 weiterentwickelt wurde. Die weiteren Szenarien zielen auf ein Nachfahren des in KS1 erreichten Pfades der Treibhausgasemissionsreduktion ab.

2 Vorgehen und Methode

Zur Berechnung der 4 Klimaschutzszenarien (KS1 bis KS4) wird ausgehend vom Referenzszenario (REF, erstellt aus dem MMS des PB23) ein jeweils in verschiedener Ausformung verschärfter Satz an politischen Instrumenten angewendet (Abbildung 1). Dabei bildet KS1 eine lediglich quantitative Stärkung des im REF vorhandenen Instrumentenmixes ab. Bis 2030 sind nur kleine Ergänzungen notwendig, die sich auf eine Erhöhung der verwendeten Subventionsbudgets um etwa 10 % beschränken. Für das gesamte Szenario gilt, dass gegenüber dem REF die Geschwindigkeit und Reaktivität der Industrie erhöht ist: Bestandsanlagen werden schneller ausgetauscht, der Wechsel von Erdgas zu CO₂-armen Energieträgern erfolgt dadurch schneller. Insbesondere die direkte Elektrifizierung beschleunigt sich – was die implizite (nicht im Modell abgebildete) Annahme voraussetzt, dass Stromanschlüsse an Industriestandorten beschleunigt ausgebaut werden. Nach 2030 – insbesondere für den Zeitraum zwischen 2035 und 2045 – wird der Instrumentenmix fortgeführt und adressiert verstärkt die im REF verbleibenden Treibhausgasemissionsquellen (erdgasbasierte Prozesswärme) und weiteren nicht adressierten Transformationsbedarf (weitere Diffusion CCU/S und wasserstoffbasierte Chemie). Im MWMS (Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario) des PB23 verbleibt 2045 eine Vermeidungslücke von etwa 57 Mio. t CO₂-Äq. Nach Berücksichtigung von etwa 10 Mio. t CO₂-Äq. nicht bzw. schwer vermeidbarer restlichen prozessbedingter Emissionen müssen 2045 etwa 50 Mio. t CO₂-Äq. zusätzlich gemindert werden – dazu muss die Trajektorie ab spätestens 2035 ambitionierter sein. Dies bedeutet, dass von der im MMS und im MWMS vorherrschenden Teilelektrifizierung ein Übergang zur Vollelektrifizierung von Prozesswärmeerzeugung gefunden werden muss. Gleichzeitig unterstellt das Szenario einen graduellen Rückbau (oder Stilllegung, jedenfalls Nichtverfügbarkeit) des Erdgasnetzes nach 2030⁴; mit relevanter Wirkung ab 2040.

Abbildung 1: Schema der Szenariostruktur im Industriesektor



Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer ISI

KS2 und KS3 basieren auf KS1, verzichten aber nach 2030 auf eine Fortführung des etablierten Instrumentenmixes. Stattdessen werden über starke Preissignale im EU-Emissionshandelssystem (EU-EHS) und dem nationalen Zertifikatehandel (nach Brennstoffemissionshandelsgesetz BEHG) gesetzt, die CO₂-arme Verfahren und Technologien wirtschaftlich attraktiv gegenüber fossilen Optionen machen. Die hierfür nötigen Preisniveaus wurden in KS2 nach geltendem Handelsregime (EU-EHS, BEHG), in KS3 vereinheitlicht ermittelt. Abweichend von diesem Grundsatz wird für die

⁴ Die modellierte Wirkung findet auf hohem Abstraktionsniveau statt. So werden keine tatsächlichen Netzstilllegungen explizit modelliert, sondern lediglich ein repräsentierender Faktor der Nutzenbewertung von Erdgas verringert. Dies umfasst, dass sich Unternehmen ab 2030 über die Endlichkeit des Erdgasanschlusses bewusstwerden und ihre Investitionen darauf einstellen – ohne, dass bereits eine Leitung tatsächlich stillgelegt wurde.

Transformation der Olefinproduktion weiterhin ein Subventionsbudget verwendet, da die für die Dekarbonisierung dieser Anwendungen entstehenden Differenzkosten sehr hoch sind – und sich insbesondere von denen anderer Vermeidungstechnologien stark unterscheiden. Eine Ausrichtung der CO₂-Bepreisung an diesen Kosten erzeugte eine starke Verzerrung der Szenarien – da der entstehende extrem hohe CO₂-Preis die Vermeidungskosten anderer Anwendungen stark übersteige. Daher wird in KS2 und KS3 ein Teil der Differenzkosten der Umstellung der chemischen Industrie vom Markt (mit einer als über den CO₂-Preis hinausgehenden angenommenen Mehrzahlungsbereitschaft für die auf den Grundstoffen Ammoniak und Methanol erzeugten Endprodukte), ein Teil vom Staat (Teile der Olefinproduktion) getragen. Insgesamt wird so in KS2 und KS3 etwa ein Drittel der Förderbudgets von REF benötigt. Um die Belastung der Förderbudgets gering zu halten, ist die Transformation der Chemieindustrie überdies verzögert und in die letzten Jahre vor 2045 komprimiert. Für beide Szenarien gilt, dass die Diffusion CO₂-armer Technologien und Verfahren entlang des Anstiegs der CO₂-Preise individuell länger oder schneller als in KS1 erfolgen kann. Übergreifend gilt, dass der starke angenommene Anstieg der CO₂-Preise bis 2035 (siehe Mendelevitch et al. (2022)) zusammen mit einer unterstellten Preisvoraussicht bereits vor 2030 zu Minderungswirkung führt, im Vergleich zu KS1 aber in einigen Technologiebereichen Verzögerungen der Transformation erzeugen kann⁵. Diese Entwicklungen sind allerdings sehr stark von Annahmen getrieben – das Nachfahren des KS1-Pfades ist mit KS2 und KS3 grundsätzlich möglich und wird in guter Näherung auch erreicht.

KS4 schließlich schwenkt auf ordnungsrechtliche Instrumente. Damit sinkt die Bedeutung des bestehenden Politikmixes – darin der CO₂-Bepreisung – und wird ersetzt durch Vorgaben zu Betrieb und Neubau von Anlagen: Ab 2030 ist die Inbetriebnahme neuer fossiler Anlagen zur Prozesswärmeverzeugung in KS4 nicht mehr möglich, gleichzeitig werden fossile Bestandsanlagen beschleunigt ausgetauscht⁶. Dies beinhaltet kein festes Datum einer ordnungsrechtlichen Vorgabe etwa eines Betriebsverbotes, sorgt aber in Kombination mit dem Neubaubot für einen nicht-preisabhängigen Ausstieg aus fossiler Prozesswärmeverzeugung⁷. Ähnliches gilt für den Ersatz von speziellen Produktionsanlagen (Hochöfen, Drehrohröfen, Glaswannen), die in KS1 über den Instrumentenmix (darunter relevant Subventionen) und in KS2 und KS3 über Preissignale zur Transformation angeregt wurden: Ordnungsrechtliche Vorgaben erzwingen einen Wechsel auf die CO₂-armen Alternativverfahren (H₂-Direktreduktion, Nutzung von CCU/S für prozessbedingte Verfahren, Elektrifizierung oder Wasserstoffnutzung). Im Ergebnis fährt auch KS4 den Pfad in KS1 nach – der maßgebliche Unterschied entsteht in der Kostenverteilung, da in KS4 Differenzkosten zu konventionellen Verfahren weder durch Subventionen ausgeglichen noch durch hohe CO₂-Preise gesenkt werden. Qualitativ steht dahinter die Annahme, dass hohe Differenzkosten in der Produktion

⁵ Die jeweiligen Preisanstiege bis 2035 können die Förderbudgets aus KS1 nicht hinreichend ersetzen.

⁶ Die Umsetzung erfolgt modellintern über die Reduktion der erwarteten technischen Lebensdauer der Anlagen. Diese wird ab 2030 auf 85 %, 2035 auf 65 % und 2040 auf 40 % des regulären Wertes gesetzt.

⁷ Indem etwa Bestandsanlagen an eine maximale Betriebsdauer (die kleiner sein muss als die sonst erwartete Betriebsdauer) gekoppelt werden. So entsteht ein beschleunigter Austausch, ohne einheitlich feste Daten festzuschreiben. Der Ansatz ist daher (abgesehen vom Datum 2045) nicht: „Ab 20XX müssen alle erdgasbetriebenen Anlagen den Betrieb einstellen.“, sondern „Erdgasbetriebene Bestandsanlagen maximal XX Jahre in Betrieb gewesen sein.“. Dadurch erfolgt der Austausch der Anlagen (und der Bedarf an neuen Anlagen) organischer und kann dennoch entlang der notwendigen Austauschpfade beschleunigt werden.

von Grundstoffen (Stahl, Olefine, Glas, Zement) durch Mehrzahlungsbereitschaft entlang der Wertschöpfungskette ausgeglichen werden können⁸.

3 Ausgestaltung Instrumente

Tabelle 1: Übersicht der Instrumente KS1 „Policy Mix“ und KS4 „Ordnungsrecht“

Instrumente	KS1 „Policy Mix“	KS4 „Ordnungsrecht“
Instrumente zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren	Leichte quantitative Steigerung (15% höheres Budget) gegenüber REF; Fortführung bis 2045	Begrenzt auf Vermeidungsoptionen mit sehr hohen Differenzkosten (stoffliche Wasserstoffnutzung Industrie)
Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz	Wie in REF	Wirkung wie in REF ¹
CO₂-Bepreisung (EU-EHS und BEHG)	Wie in REF	Wie REF bis 2035, danach keine weitere Steigerung
Sonstige und flankierende Instrumente	Wie in REF	Wie in REF

Quelle: Fraunhofer ISI

1: Die Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz werden anhand ihres Ambitionsniveaus abgebildet. In KS4 ist ihre Wirkung mit REF vergleichbar – ihre Umsetzung kann abweichen, wird jedenfalls nicht modelliert.

⁸ Die Kosten der Grundstoffe werden entlang der Wertschöpfungskette zum Endprodukt stark verteilt und von Kosten der Weiterverarbeitung überlagert – oft machen diese anteilig an ihren Kosten nur geringe einstellige Prozentsätze aus.

Tabelle 2: Übersicht der Instrumente KS2 „ETS/BEHG-Preis“ und KS3 „Einheitlicher THG-Preis“

Instrumente	KS2 ¹ „ETS/BEHG-Preis“	KS3 „Einheitlicher THG-Preis“
Instrumente zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren	Förderung Stahl bis Förderstart ² 2030, wasserstoffbasierte Chemie ab 2040 (insgesamt 39 % Budget von REF)	Förderung Stahl bis Förderstart ² 2030, wasserstoffbasierte Chemie ab 2040 (insgesamt 37 % Budget von REF)
Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz	Wirkung wie in REF	Wirkung wie in REF
CO₂-Bepreisung (EU-EHS und BEHG)	Wie REF bis 2030, dann schnelle Steigerung bis 2035, hernach konstant; Preisvoraussicht ³	Wie REF bis 2030, dann schnelle Steigerung bis 2035, hernach leichter Anstieg bis 2045; Preisvoraussicht ³
Sonstige und flankierende Instrumente	Wie in REF	Wie in REF

Quelle: Fraunhofer ISI

1: Für die Industrie erzeugt die Unterscheidung von KS2 und KS3 abgesehen von den Preispfaden keine im Modell abgebildete Unterscheidung.

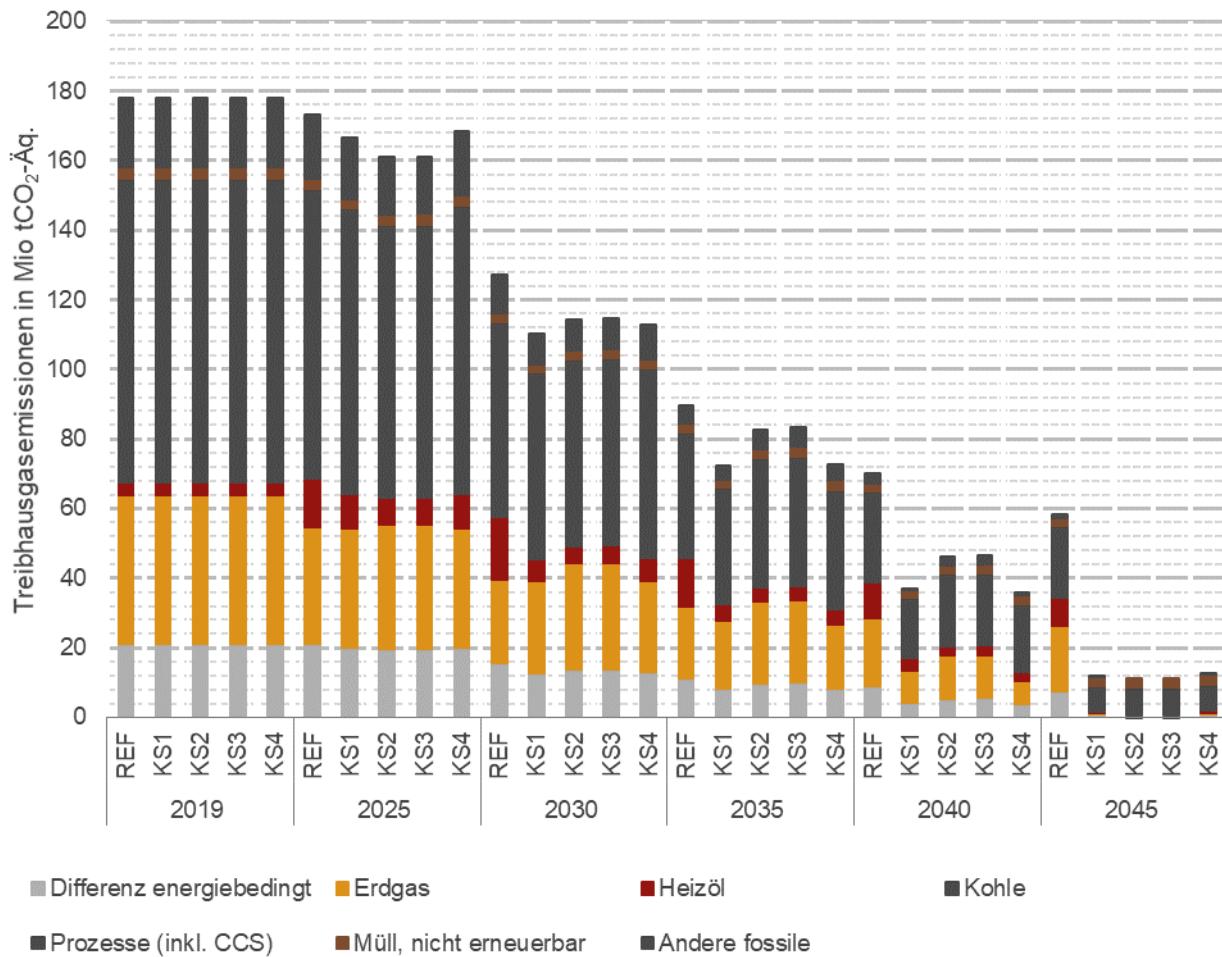
2: Im Rahmen von Klimaschutzverträgen bis 2030 erteilte Förderzusagen für die Transformation der Stahlindustrie werden auch nach 2030 fortgesetzt. Es werden nach 2030 aber keine neuen Verpflichtungen mehr eingegangen. Ab 2040 werden Förderbudgets für die Deckung sehr hoher Vermeidungskosten in der Chemieindustrie eingesetzt.

3: Preisvoraussicht bezeichnet die Fähigkeit der modellierten Investierenden, den deutlich steigenden CO₂-Preis zu erwarten und ihre langfristigen Investitionsentscheidungen bereits vor Inkrafttreten daraufhin anzupassen. Diese Fähigkeit wird hier angenommen, muss aber über entsprechende, den CO₂-Preis flankierende politische Instrumente erzeugt werden.

4 Folgenabschätzung

4.1 THG-Emissionen

Abbildung 2: Treibhausgasemissionen der Industrie (bottom-up Berechnung)



Quelle: Modellrechnung FORECASTIndustry (Fraunhofer ISI)

Die Treibhausgasemissionen der Industrie sinken in allen Szenarien durch zwei grundlegende Entwicklungen (Abbildung 2). Erstens werden energiebedingte Treibhausgasemissionen durch den Umstieg auf CO₂-arme Energieträger reduziert (siehe Abbildung 3). Sie entwickeln sich von der größten Quelle (2019: 124 Mio. t CO₂-Äq.) zur geringfügigen Restmenge (2045: 4-6 Mio. t CO₂-Äq.), von der 2-3 Mio. t CO₂-Äq. inhaltlich relevant sind⁹. Darin enthalten sind in dieser Berechnung lediglich abgeschätzte Treibhausgasemissionen von Industriekraftwerken („Differenz energiebedingt“). Diese werden in der Energiewirtschaft genauer modelliert. Zweitens findet in allen Szenarien eine Reduktion der prozessbedingten Treibhausgasemissionen statt. Im Jahr 2045 ist abgesehen vom REF kein relevanter Unterschied der Szenarien zu erkennen – es verbleiben 7 Mio. t CO₂-Äq., wobei in allen KS-Szenarien Abscheidung prozessbedingter Treibhausgasemissionen in der Zement- und Kalkherstellung in Höhe von 16-17 Mio. t CO₂-Äq. (2045) integriert ist. Die erreichte

⁹ Diese inhaltlich relevante Menge umfasst die Nutzung fossilen Mülls. Der Rest entsteht durch modellbedingte Restmengen, die keinen tatsächlich notwendigen Bedarf anzeigen, vgl. Abbildung 3.

Reduktion der Treibhausgasemissionen der Industrie (knapp 96 % gegenüber 1990) wäre ohne CCS zur Adressierung prozessbedingter Treibhausgasemissionen unter den angenommenen Rahmenbedingungen nicht möglich¹⁰.

Insgesamt sind die Ergebnisse der Modellierung in dem Sinne interpretierbar, dass alle Instrumentenausrichtungen der KS-Szenarien grundsätzlich vergleichbare Zielbilder erzeugen können. Außerdem weichen diese bereits 2030 zum Teil deutlich von REF ab – diese Unterschiede verstärken sich weiter. Unterschiede zwischen den KS-Szenarien im Zielbild 2045 sind nicht aussagekräftig¹¹. Es ist zwar im Transformationsverlauf 2030 bis 2040 zu beobachten, dass die preisbasierten Szenarien fossile Energieträger langsamer ersetzen, was auf eine indirektere und verzögerte Wirkung des CO₂-Preises im Vergleich zu den Instrumenten in KS1 und KS4 zurückgeführt werden kann¹². Allerdings ist auch diese Beobachtung mit Unsicherheit belastet, da Änderungen im Investitionsverhalten bei sehr hohen CO₂-Preisen sowie deren Parametrisierung in Modellen wenig empirische Grundlagen haben.

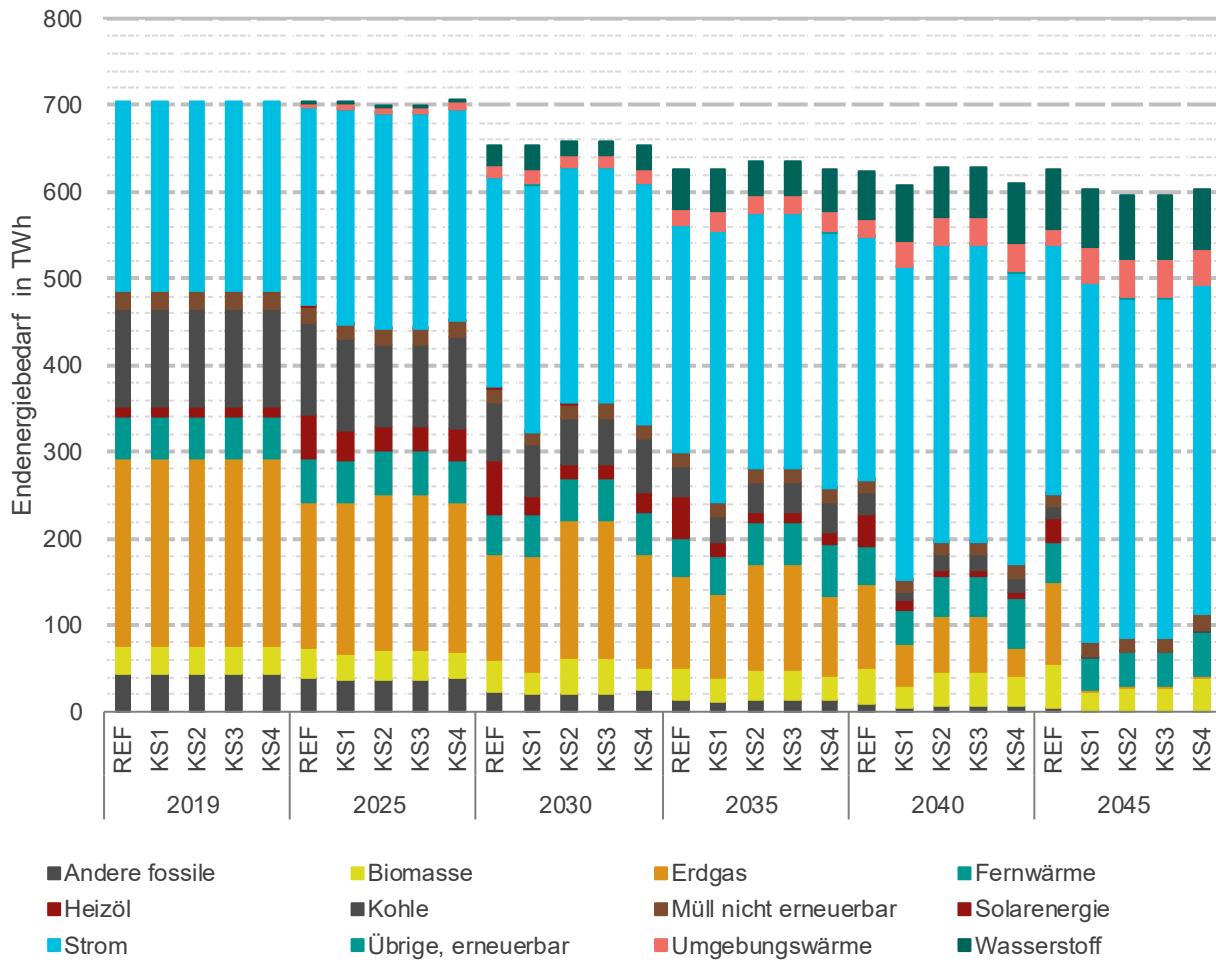
¹⁰ Starke Instrumente zur Stärkung von Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft und Nachfragereduktion waren nicht Gegenstand der Untersuchung.

¹¹ Zum Beispiel gibt es keinen zwingenden Grund, dass KS4 mehr Biomasse nutzt.

¹² Umgekehrt zeigt der Szenariovergleich bis 2025 eine leicht schnellere Transformation von KS2 und KS3 – hier wirken unterstellte Instrumente von KS1 und KS4 noch nicht, während der unterstellte CO₂-Preisanstieg durch Preisvoraussicht Entscheidungen bereits beeinflusst.

4.2 Endenergieverbrauch

Abbildung 3: Endenergiebedarf Industrie



Quelle: Modellrechnung FORECASTIndustry (Fraunhofer ISI)

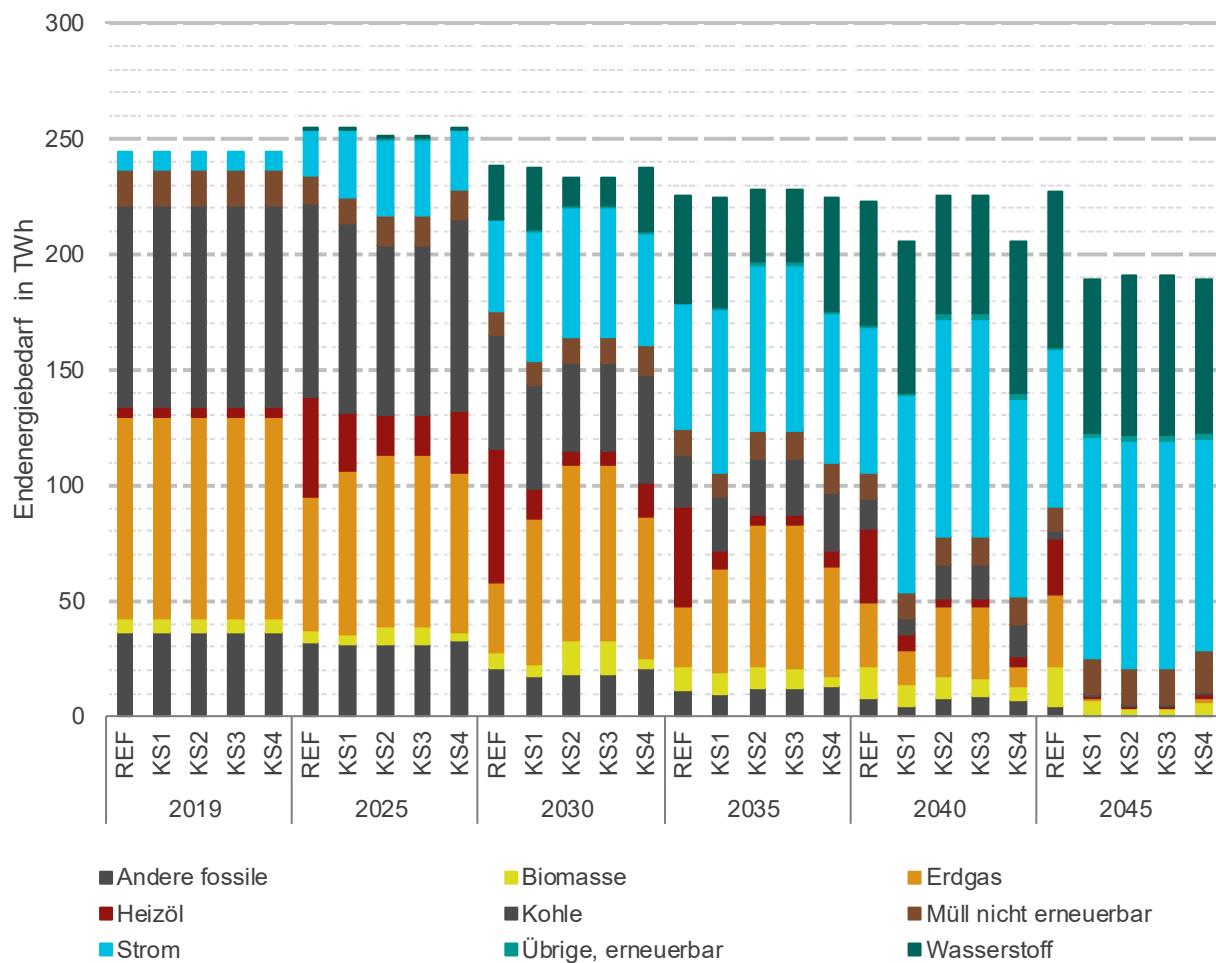
Der Endenergiebedarf der Industrie ist in allen Szenarien zwei grundlegenden Trends unterworfen (Abbildung 3). Erstens sinkt der Endenergiebedarf von 700 TWh (2019) auf um 600 TWh (2045). Dazu tragen klassische, inkrementelle Energieeffizienz, Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft und die Umstellung von Produktion auf CO₂-arme Verfahren bei, die oft auch weniger Energie benötigen¹³. Zweitens findet in allen Szenarien ein Wechsel von fossilen zu CO₂-armen Energieträgern statt. Im Jahr 2045 sind eine fortgesetzte und in Teilen steigenden Nutzung von Biomasse und Fernwärme sowie eine weitere energetische Nutzung von Müll relevant. In Summe bedienen diese Energieträger 2045 noch zwischen 76 TWh (KS1) und 106 TWh (KS4), im REF 110 TWh. Der Hauptteil der Endenergiennachfrage wird durch Strom – zum Teil in Kombination mit Umgebungswärme – gedeckt. Diese Energieträger bedienen zwischen 448 TWh (KS4) und 481 TWh (KS1). Wasserstoff kommt weit überwiegend in der Stahlherstellung zum Einsatz, zwischen 67 TWh (KS1) und 73 TWh (KS2 und KS3). Im REF verbleiben auch 2045 nennenswerte Mengen (141 TWh) fossiler Energieträger,

¹³ Die Energiebedarfsreduktion durch z.B. Elektrifizierung könnte damit auch als Energieeffizienz eingestuft werden, ist aber von inkrementellen Fortschritten (z.B. durch effizientere Motoren oder Dämmung) abzugrenzen.

während die KS-Szenarien nur modellierungsbedingt geringe Restmengen aufweisen (3-6 TWh), die keine inhaltliche Bedeutung tragen.

4.3 Strukturelle Entwicklung

Abbildung 4: Endenergiebedarf Industrieöfen

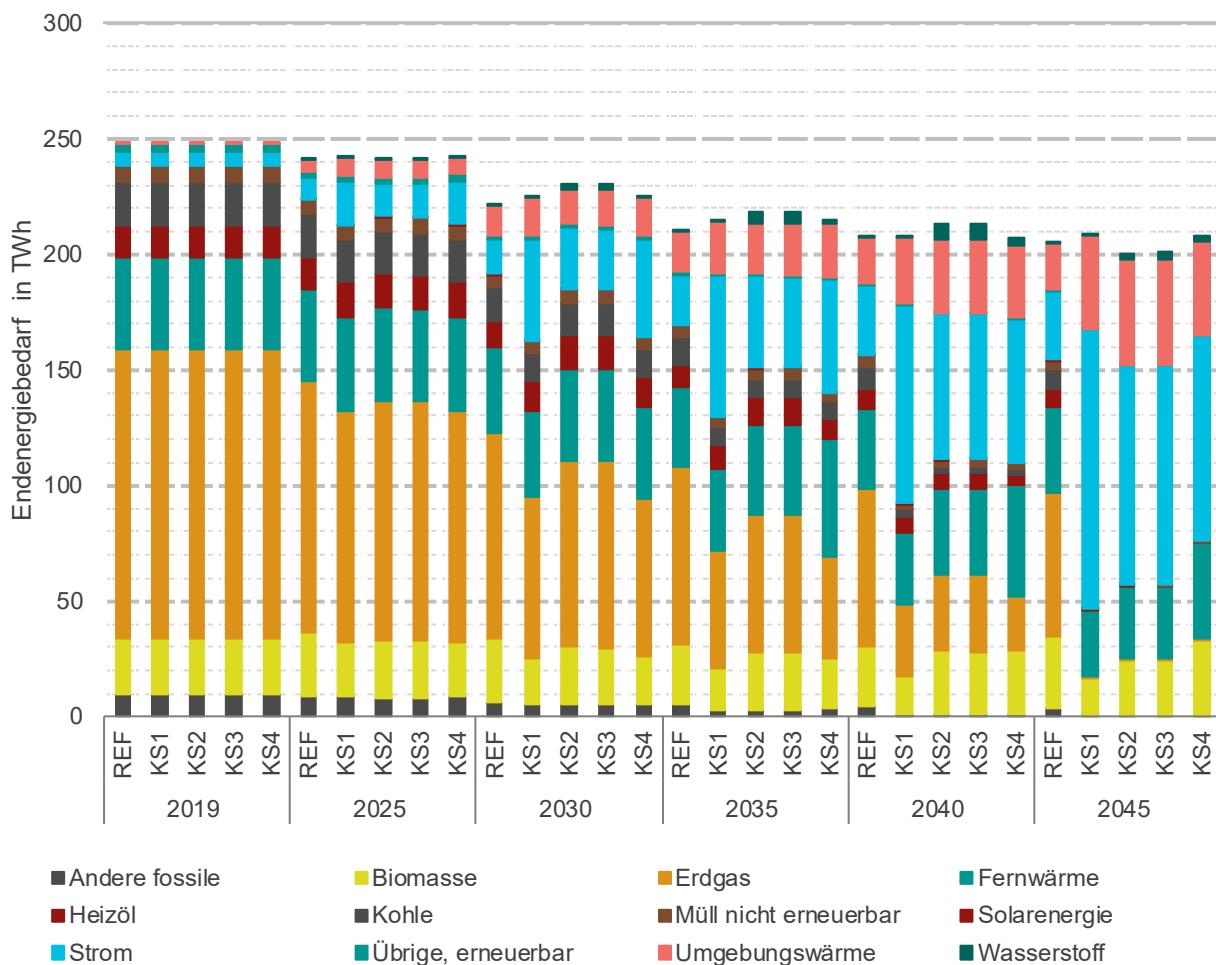


Quelle: Modellrechnung FORECASTIndustry (Fraunhofer ISI)

Der Technologiebereich der Industrieöfen ist als Teil der Prozesswärmeverzeugung starken Veränderungen ausgesetzt (Abbildung 4). Industrieöfen benötigen Hochtemperaturwärme deutlich über 500°C, meist über 1000°C. Dies schränkt die verfügbaren Technologien ein und erfordert hochwertige Energieträger, die in der Lage sind, hohe Energiedichten zu erzeugen. In allen Szenarien nimmt der direkte Elektrifizierungsgrad bis 2045 stark zu. In den KS-Szenarien steigt er auf um die 50 %, im REF auf 30 %. 2019 beträgt er 3 %. Neben der direkten Stromnutzung ist Wasserstoff der zweite maßgebliche Energieträger für jene Anwendungen, in denen eine direkte Elektrifizierung durch hohe Energiedichten erschwert ist. Sein Anteil an diesem Technologiebereich steigt bis 2045 in den KS-Szenarien auf 35 %. Im REF beträgt er 30 %. Gegenüber 2019 wird so maßgeblich Kohle aus der Stahlindustrie (Hochofenroute) und Erdgas (vielfältige Öfen je nach produkt/Prozess) aus allen anderen Sektoren, insbesondere der Chemieindustrie, verdrängt. Als

Reaktion auf die Energiekrise, gekennzeichnet durch einen starken Preisanstieg von Erdgas, steigt der Einsatz von Heizöl kurzzeitig an – wird aber mittelfristig wieder zurückgeführt. Neben den beiden Hauptenergeträgern Strom und Wasserstoff verbleibt in den KS-Szenarien 2045 ein kleiner Teil Biomasse und fossiler Müll¹⁴. Die Summe der Endenergiennachfrage sinkt in den KS-Szenarien vor allem durch Verfahrenswechsel in der chemischen Industrie, wodurch Energiebedarfe in andere Technologiebereiche verlagert werden¹⁵. Hinzu kommen leichte Effizienzgewinne durch Elektrifizierung.

Abbildung 5: Endenergiebedarf Industrie für Dampf, Heißwasser und Raumwärme



Quelle: Modellrechnung FORECASTIndustry (Fraunhofer ISI)

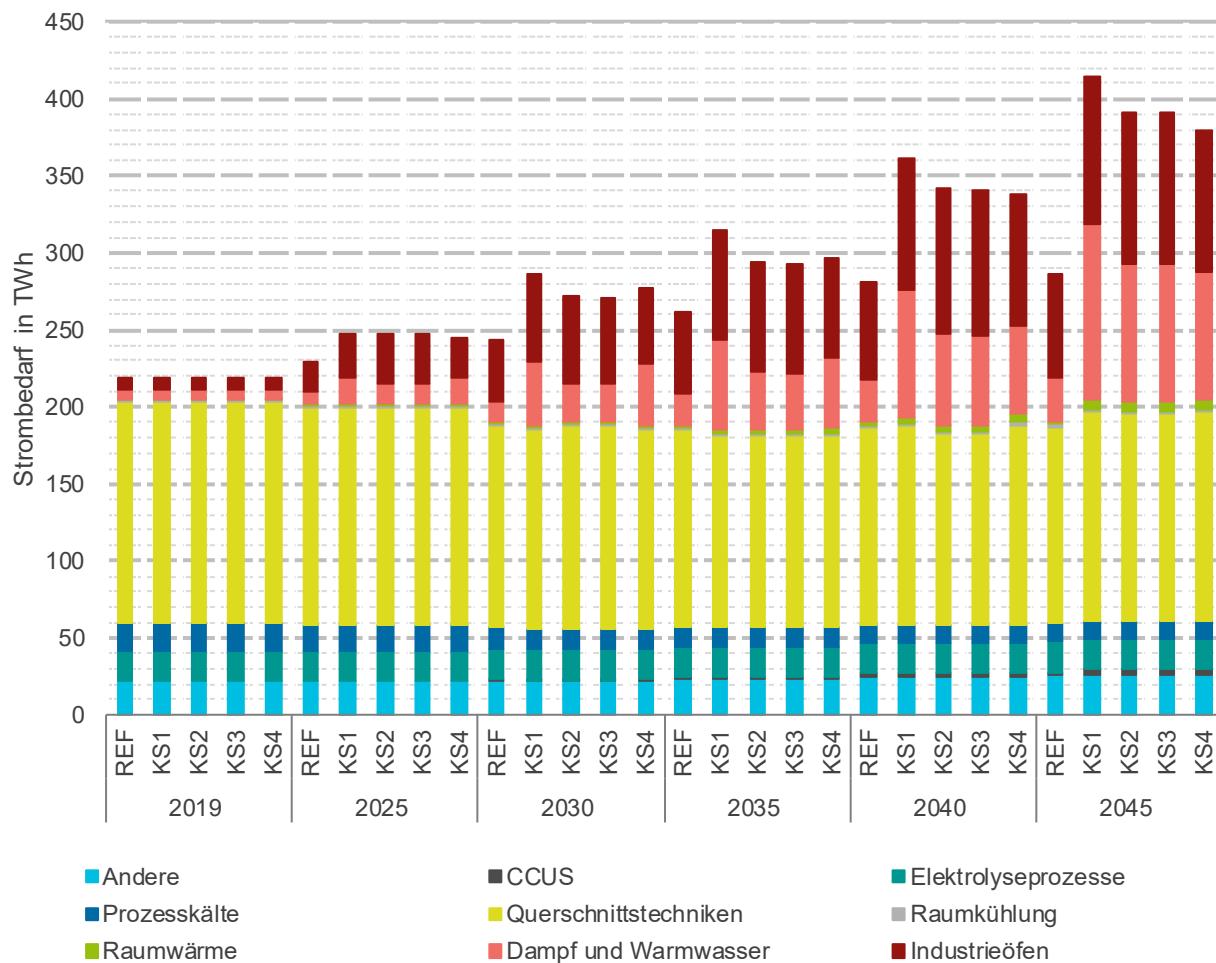
¹⁴ „Fossiler Müll“ bezieht sich vorrangig auf hochkalorische Abfallfraktionen, die für die Nutzung in Zementwerken aufbereitet werden. Diese bestehen meist aus Kunststoffmüll. Im Zuge der Umstellung der Grundstoffchemie kann sich die Herkunft des im Kunststoff enthaltenen Kohlenstoffs ändern. Dies ist stark abhängig vom unterstellten Konzept. Falls ein starker Fokus auf Kreislaufführung prozessbedingter Treibhausgasemissionen gelegt wird, ist der Müll vermutlich zu hohen Anteilen auch 2045 noch von fossilem Kohlenstoff geprägt.

¹⁵ Beispielsweise wird der Energiebedarf von Dampfspaltöfen den Industrieöfen zugerechnet. Durch den Umstieg auf die MtO-Route wird ein Teil dieses Energiebedarfs in die rohstoffliche Nutzung verlagert, ein anderer Teil von Industrieöfen zum Dampfbedarf (aufgrund unterschiedlicher Temperaturbedarfe der Verfahren).

Der Technologiebereich Dampferzeugung, Heißwasser und Raumwärme ist durch die Nachfrage nach Nieder- bis Mitteltemperaturwärme geprägt (Abbildung 5). In der hier verwendeten Methodik ist er bis 500°C definiert, der Großteil der Nachfrage nach Prozesswärme findet allerdings bis etwa 200°C statt (etwa 75 % unter 200°C). Durch die Entkopplung der Erzeugung und der Nutzung der Prozesswärme über die Medien Heißwasser und Dampf ist der Technologiebereich homogener als der der Industrieöfen. Außerdem ist er durch das niedrige Temperaturniveau attraktiv für die Nutzung von Wärmepumpen. In den KS-Szenarien findet eine starke Elektrifizierung der Prozess- und Raumwärme statt – bis 2045 steigt der Elektrifizierungsgrad auf 44 % (KS4) bis 58 % (KS1)¹⁶. Wasserstoff wird nur in sehr geringem Umfang (<5 TWh) eingesetzt, da er gegenüber den leicht zugänglichen Elektrifizierungstechnologien (für durch Wärmepumpen nicht erreichbare Temperaturbereiche Elektrodenkessel) wenig Vorteile aufweist und in den Szenarien als relevant teurer angenommen wurde. Weitere Energieträger in diesem Technologiebereich sind Fernwärme und Biomasse – Letztere besteht maßgeblich aus produktionsinterner Reststoffnutzung in der Papierherstellung und Holzverarbeitung¹⁷.

¹⁶ Darin enthalten ist die direkte Stromnutzung und die eingesetzte Umgebungswärme, da diese über Wärmepumpen bereitgestellt wird.

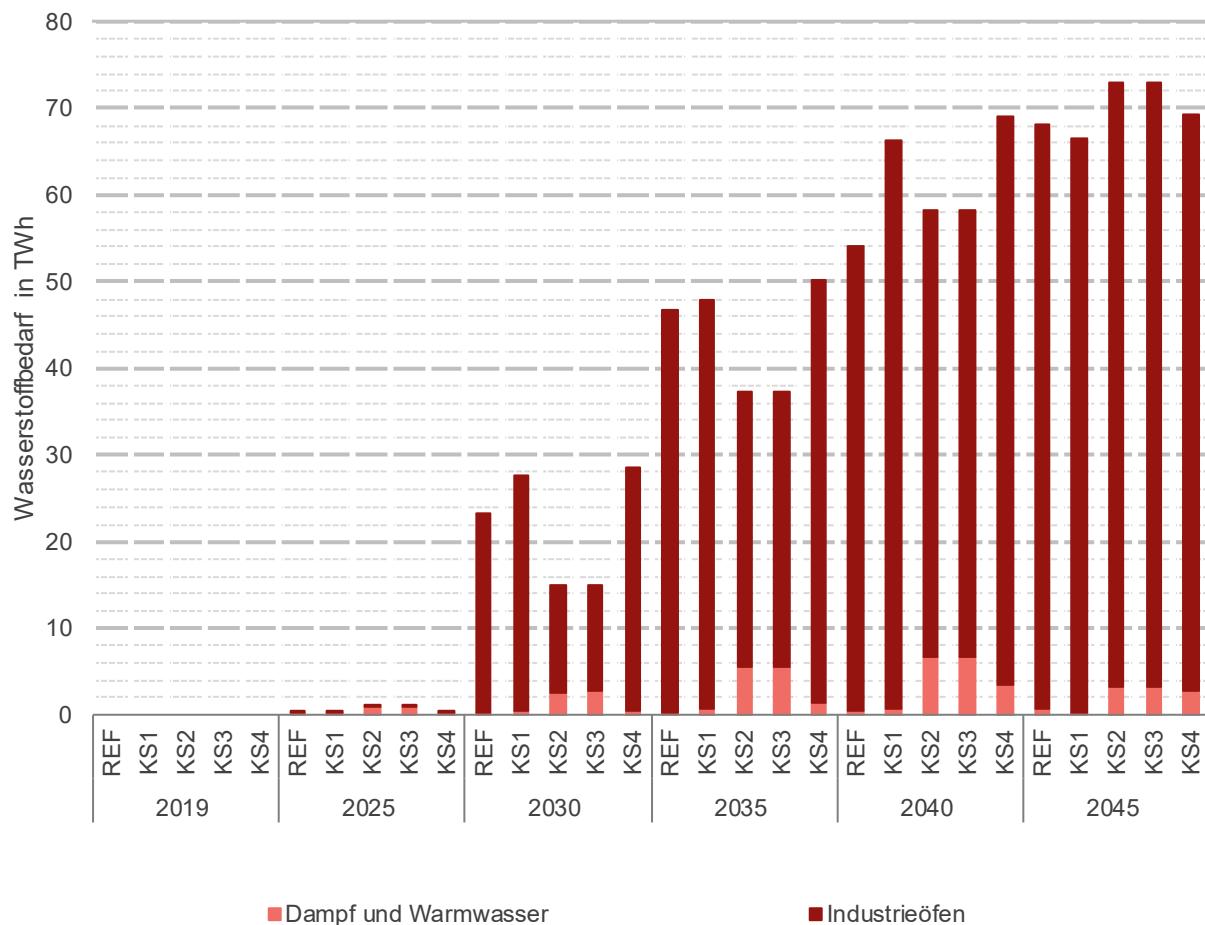
¹⁷ Die deutlich höhere Nutzung von Biomasse in KS4 ist mit Herausforderungen der Modellierung bei der ordnungsrechtlichen Eingrenzung der Biomassenutzung bedingt. Sie ist nicht inhaltlich begründet.

Abbildung 6: Strombedarf Industrie nach Anwendung

Quelle: Modellrechnung FORECASTIndustry (Fraunhofer ISI)

Direkte Elektrifizierung nimmt in allen betrachteten Szenarien und Technologiebereichen eine bedeutende Rolle ein. Dabei werden bereits 2019 große Mengen Strom (200 TWh) in der Industrie direkt eingesetzt (Abbildung 6). Dies erfolgt allerdings vor allem zur Bereitstellung von mechanischer Energie („Querschnittstechniken“) über Pumpen, Motoren, Gebläse und Ähnliches. Darüber hinaus wird Strom zur Kühlung eingesetzt und für industrielle Elektrolyse, z.B. in der Aluminium- und Chlorherstellung. Nur geringe Mengen (etwa 14 TWh) werden bereits 2019 zur Erzeugung von Prozesswärme verwendet. Dies ändert sich in allen KS-Szenarien – abgeschwächt auch im REF – massiv. Während die Stromnutzung für die klassischen Anwendungen trotz Wachstum der wirtschaftlichen Aktivität stagniert bzw. nach 2035 nur leicht wächst, steigt die Nutzung von Elektrizität für die Erzeugung von Dampf, Warmwasser und in Industrieöfen auf etwa 200 TWh an. Prozesswärme wird damit zur Anwendung mit dem größten Strombedarf. Der gesamte Strombedarf verdoppelt sich in etwa (mehr in KS1, weniger in KS2-4)¹⁸.

¹⁸ Auch hier gilt, dass die Unterschiede in den KS-Szenarien vor allem aufgrund der herausfordernden Harmonisierung der Ergebnisse im Modell entstehen. Für die Interpretation können die KS-Szenarien als 2045 strukturell identisch angesehen werden.

Abbildung 7: Wasserstoffbedarf Industrie nach Anwendung (energiebedingt)

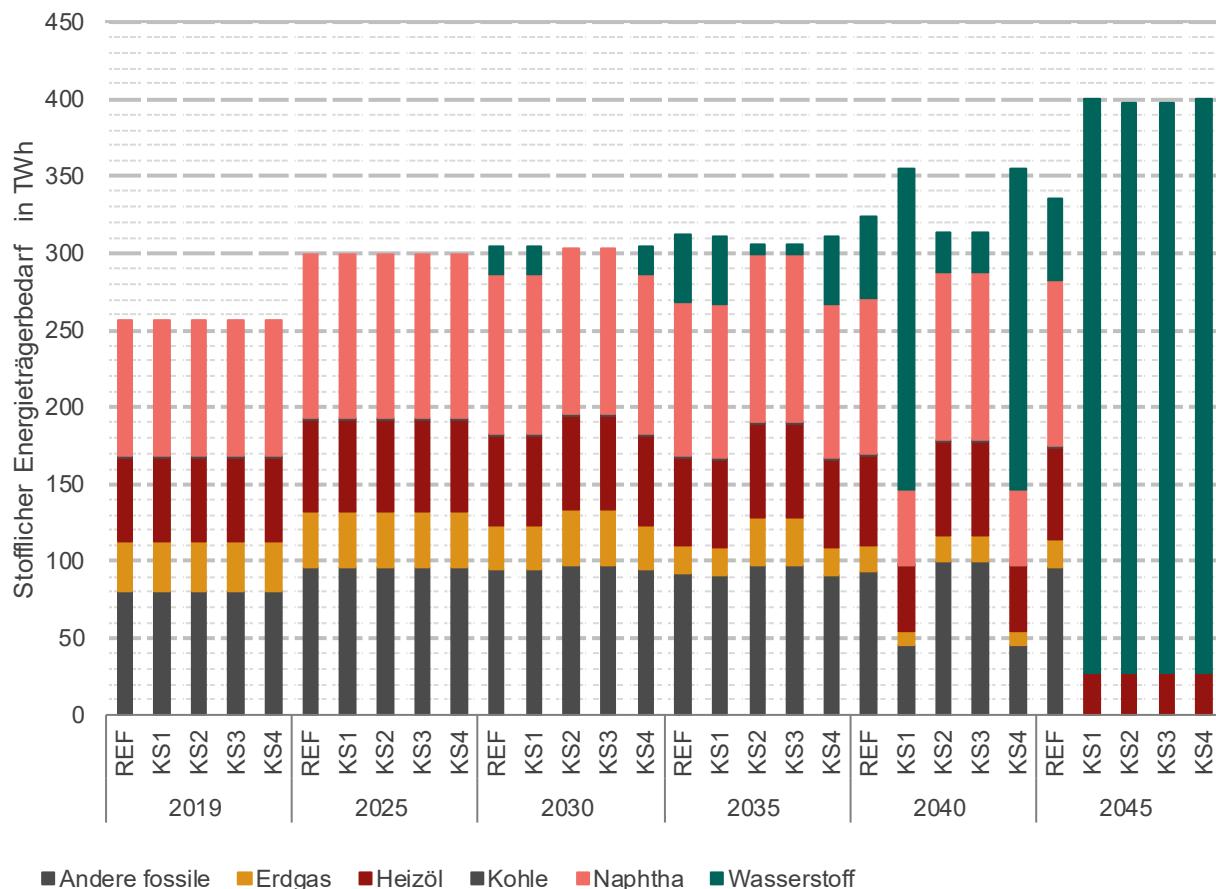
Quelle: Modellrechnung FORECASTIndustry (Fraunhofer ISI)

Die energetische Nutzung von Wasserstoff nimmt in allen Szenarien zu (Abbildung 7). Sie ist allerdings stark im Technologiebereich der Industrieöfen konzentriert – und darin fast ausschließlich in der Eisen- und Stahlherstellung. Dabei sind im Zielbild 2045 kaum Unterschiede zwischen den Szenarien festzustellen. Dies ist vor allem methodisch bedingt, da die Wasserstoffnutzung stark an den angenommenen Hochlauf der Direktreduktion von Eisenerz gekoppelt ist. Lediglich im Zeitraum 2030 bis 2040 sind zwischen KS2 und KS3 einerseits, und KS1 und KS4 andererseits deutlich Unterschiede im Hochlauf auszumachen. Diese sind durch den zeitlich verschobenen Anreiz zum Ausbau durch den steigenden CO₂-Preis bedingt – in den Szenarien KS2 und KS3 erfolgt ein Teil (2030: 50 %, 2040: <10 %) der Direktreduktion zunächst und länger über Erdgas¹⁹. Grundsätzlich ist eine stärkere energetische Nutzung von Wasserstoff in der Industrie – insbesondere im

¹⁹ Im Licht aktueller Entwicklungen scheinen diese Pfade plausibler zu sein und eine breite Umstellung auf Grünen Wasserstoff erst in der zweiten Hälfte der 2030er Jahre erwartbar. Da in diesem Bereich allerdings hohe Dynamik und Unsicherheit vorherrschen, können die KS-Szenarien eher als Bandbreite dienen. Es scheint aber weiterhin plausibel, dass eine Fokussierung auf nach 2030 steigende CO₂-Preise (verbunden mit einer Reduktion der Förderbudgets) die Transformation der Stahlindustrie in diesen Zeitraum verlagert und damit verzögert.

Hochtemperaturbereich – denkbar. Dies ist aber stark von Annahmen zu Energieträgerpreisen abhängig, die in den untersuchten Szenarien nicht variiert wurden.

Abbildung 8: Rohstoffbedarf Industrie nach Energieträger



Quelle: Modellrechnung FORECASTIndustry (Fraunhofer ISI)

Die stoffliche Nutzung von Energieträgern in der chemischen Industrie ist einem starken – und in Teilen hochgradig dynamischen – Wandel unterworfen. Die Gesamtmenge der eingesetzten Energie steigt parallel zu Aktivität des Sektors bis 2030 in allen Szenarien auf etwa 300 TWh an. Im Zuge der Umstellung der Rohstoffbasis von fossilen Energieträgern auf Wasserstoff wird ein Teil der zuvor als energiebedingt bilanzierten Energiemenge in den stofflichen Bereich verschoben²⁰. Dabei wird in KS1 und KS4 angenommen, dass die Umstellung der chemischen Industrie frühzeitig und graduell verläuft, um möglichst verlässliche Investitions- und Erprobungsumgebungen zu schaffen. In beiden Szenarien könnte dies gesteuert werden. Dadurch entsteht eine recht sanfte Diffusion der

²⁰ Bedeutendes Beispiel hierfür ist die Produktion von Olefinen und Aromaten: Im Konventionellen Prozess im Dampfspaltöfen wird Energie (energiebedingt) eingesetzt, um langkettige fossile Kohlenwasserstoffe aufzuspalten. Der CO₂-arme Alternativprozess (Methanol to Olefins, MtO) nutzt (stofflich) Wasserstoff und benötigt deutlich weniger Prozessenergie. Dafür wird aber ein Teil des Wasserstoffs benötigt, um Sauerstoff in Form von Wasser aus dem Prozess entfernen. Dadurch steigt der stoffliche Bedarf, während der energetische Bedarf sinkt. In Summe steigt der Gesamtenergiesträgerbedarf (stofflich + energetisch) auch unter Berücksichtigung steigender Produktionsmengen leicht (~10%) an.

Technologien und damit verbundenen Geschäftsmodelle. In KS2 und KS3 besteht diese Möglichkeit nicht – die erwartet hohen Differenzkosten der wasserstoffbasierten Chemie werden daher so lange wie möglich vermieden. Eine Umstellung auf CO₂-arme Verfahren findet so erst ab 2040 statt – ob das damit verbundene extrem hohe Umstellungstempo umsetzbar ist, unterliegt hoher Unsicherheit. Da sich die Differenzkosten aber deutlich auf den Betrieb (und nicht die Investition) konzentrieren, lässt sich zumindest qualitativ beschreiben, dass die tatsächliche Umstellung der Produktion ab 2040 zuvor investiv bereitet wurde. Insgesamt sind diese hier gezeigten Pfade aber als vor allem qualitativ stark angegrenzte Narrative zu verstehen, die mögliche Effekte der unterschiedlichen Instrumente darstellen. Es handelt sich nicht um zwingende Entwicklungen – allerdings zeigen sie, dass ein den CO₂-Preis ergänzendes Instrument für die Umstellung der wasserstoffbasierten Chemie im Allgemeinen – und für eine frühzeitige Umstellung im Speziellen – notwendig scheint.

4.4 Sektorale ökonomische Folgen

Die sektoralen ökonomischen Folgen der zuvor beschriebenen Technologiepfade werden in drei Gruppen unterteilt dargestellt: Mehrinvestitionen und Investitionszuschüsse, Betriebskosten und Betriebskostenzuschüsse (nach Technologiebereichen) sowie Energiekosten (nach Energieträgern). Die dargestellten Kosten ergeben sich aus der Kombination aus Energiebedarf (vgl. Abschnitt 4.2) und Energieträger- und CO₂-Preisen (vgl. Mendelevitch et al. 2022), den für die Bereitstellung dieser Energie benötigten Anlageninvestitionen und – in je nach Szenario unterschiedlichem Maße – der für die Erzeugung eines wirtschaftlich attraktiven Geschäftsmodells benötigten Deckung von Differenzkosten zu fossilen Referenztechnologien. Die Mehrinvestitionen umfassen einerseits den Aufbau von neuen klimafreundlichen Produktionskapazitäten und andererseits die Erneuerung bestehender Produktionskapazitäten für eine CO₂-ärmere bzw. -neutrale Produktion. Die Mehrinvestitionen stellen damit den Teil der Gesamtinvestitionen im Sektor dar, der in den Szenarien jeweils mit Klimaschutzbezug anfällt. Die dargestellten Jahresscheiben repräsentieren jeweils den Bereich +/- 2 Jahre um das angegebene Jahr herum²¹.

Die durch die Politikinstrumente angeregten Mehrinvestitionen und die Betriebskosten werden in folgende Kategorien aufgeteilt:

- Dampferzeugung: Anlagen zur Erzeugung von Prozesswärme in Form von Dampf (bis 500°C, aber überwiegend bis 250°C). Beinhaltet Erdgas-Dampfkessel, Hochtemperaturwärmepumpen, Elektrodenkessel und KWK-Anlagen.
- Industrieöfen: Anlagen zur Erzeugung von Prozesswärme in Öfen mit Direktbeheizung (bis 2000°C). Vielfältiger Einsatz, hauptsächlich in der Grundstoffindustrie für Hochtemperaturprozesse, unter anderem in der Produktion von Stahl, Mineralien und Nicht-Eisen-Metalle.
- Raumwärme: Erzeugung von Raumwärme, wenn die Raumwärme nicht über die Abwärme der Prozesswärmeverzeugung bereitgestellt wird.
- Effizienz: Umfasst sehr heterogenes und kleinteiliges Feld von prozessspezifischen Einsparoptionen und deren Anwendungen. Beinhaltet Einzelmaßnahmen wie erweiterte Abwärmenutzung und Gichtgasrückführung, aber auch abstraktere Pakete wie effizientere Motoren und Gebläse, effizientere Druckluft und effizientere Prozesskälteerzeugung. Es

²¹ Der Bereich „2030“ in Abbildung 9 gibt den Mittelwert der jährlichen Investitionen zwischen Mitte 2027 und Mitte 2032 an.

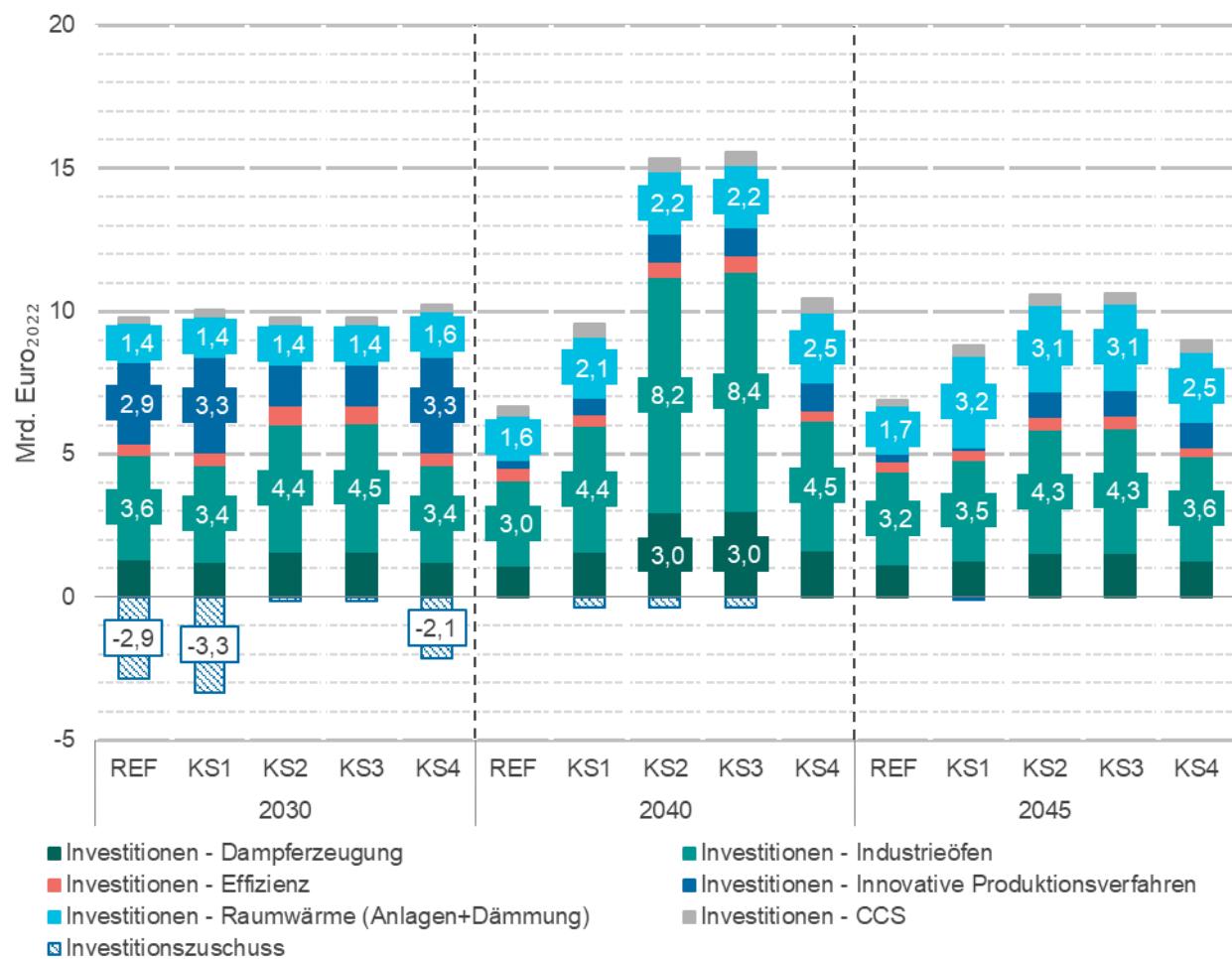
dominieren die Effizienzsteigerungen von Querschnittstechniken, die in erster Linie mechanische Energie durch Stromnutzung bereitstellen.

- Innovative Produktionsverfahren: Ganze Produktionsanlagensysteme, z. B. die Direktreduktion von Eisenerz, (teil)-elektrifizierte Schmelzwannen für Flachglas und wasserstoffbasierte Chemie.
- CCS: Anlagen zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung (oder -Nutzung (CCU))
- Stoffliche Nutzung (nur Betriebskosten): Die stoffliche Nutzung bezieht sich auf die Verwendung von Rohstoffen und Materialien zur Herstellung von Produkten, bei der die chemischen oder physikalischen Eigenschaften der Stoffe genutzt und umgewandelt werden, ohne deren energetische Nutzung zum primären Zweck zu haben.

Die Erfassung der Mehrinvestitionen (Abbildung 9) stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Aufgrund von Datenlücken (insbesondere bei Industrieöfen) und der in mehreren Technologiebereichen vorherrschenden hohen Heterogenität, sind hohe Abweichungen zu erwarten und die Ergebnisse eher qualitativ zu interpretieren. Dennoch können je Stützjahr einige Beobachtungen angestellt werden: Um 2030 herum sind die Investitionen in Prozesswärme (Dampferzeugung und Industrieöfen) in KS2 und KS3 gegenüber den anderen Szenarien erhöht. Dies lässt sich auf die Wirkung der Preisvoraussicht auf den bedeutenden CO₂-Preisanstieg nach 2030 begründen. Gleichzeitig erfolgen deutlich geringere Investitionen in innovative Produktionsverfahren, darin vor allem Stahl. Dies beinhaltet vor allem die zwischen 2030 und 2035 entstehende Wirtschaftlichkeitslücke, die in KS1 durch auch nach 2030 weitergehende Förderung und in KS4 durch Ordnungsrecht adressiert wird. Um 2040 herum stechen die hohen Investitionen in KS2 und KS3 hervor – dies lässt sich qualitativ durch eine höhere Bedeutung von kapitalintensiveren KWK-Anlagen (Dampferzeugung) in diesen Szenarien erklären, die vor allem noch 2040 ausgeprägt ist. Allerdings ist die entstehende Differenz quantitativ als deutlich geringer einzuschätzen, da der methodische Ansatz, aus der Dampferzeugung auf die weitgehend unbekannte Größe der Industrieofeninvestitionen zu schließen, hier versagt. Die höheren Investitionen in Industrieöfen in KS2 und KS3 im Jahr 2040 sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf methodische Limitationen zurückzuführen. Die Mehrinvestitionen dürften vielmehr in einer mit KS4 und KS1 vergleichbaren Höhe liegen. Um 2045 sind die Mehrinvestitionen der KS-Szenarien weitgehend gleich – der größte Unterschied entsteht durch innovative Produktionsverfahren, die in KS1 bereits vollständig umgestellt sind, während in KS2, KS3 und KS4 insbesondere die wasserstoffbasierte Chemie erst gegen Ende des Modellierungszeitraums transformiert.

Investitionsförderungen sind in REF, KS1 und bis 2030 in KS4 relevant. In KS2 und KS3 existieren zwei Anwendungsfälle: Ermöglichung eines Einstiegs in H₂-DRI (während CH₄-DRI als kostengünstigerer Übergang dort stärker vertreten ist) – sichtbar im Stützjahr 2030 – und die rasche Umstellung auf wasserstoffbasierte Chemie ab 2040 (die ohne Förderung auch bei hohen CO₂-Preisen nicht wirtschaftlich ist). In KS4 werden Investitionsförderungen nach 2030 eingestellt (daher zeigt der gemittelte Wert in 2030 einen niedrigeren Wert als in KS1).

Abbildung 9: Mehrinvestitionen und Investitionszuschüsse



Quelle: Eigene Darstellung, Modellrechnung Fraunhofer ISI

Anmerkungen: Werte sind über 5 Jahre gemittelt (z. B. enthält 2030 den Durchschnittswert 2028-2032); Mehrinvestitionen ohne MwSt.; Die höheren Kosten der Industrieöfen in KS2 und KS3 im Jahr 2040 sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf methodische Unzulänglichkeit zurückzuführen. Die Gesamtkosten dürften vielmehr in einer mit KS4 und KS1 vergleichbaren Höhe liegen.

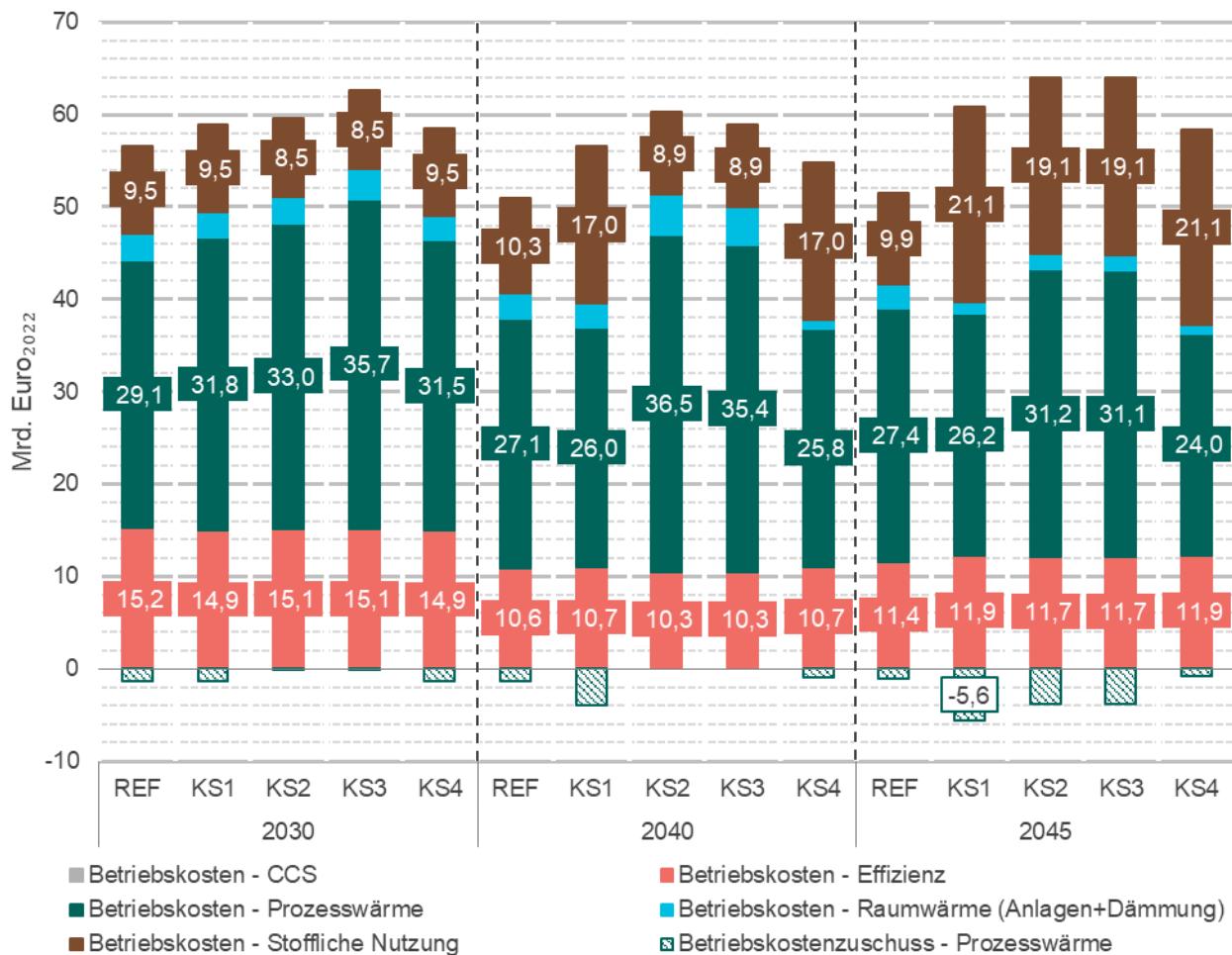
Die Betriebskostenberechnung (Abbildung 10) spiegelt in weiten Teilen die Erkenntnisse der Investitionen wider: um 2030 sind die Kosten von Prozesswärme in KS2 und KS3 leicht erhöht, da dort die unterstellte Preisvoraussicht Mehrinvestitionen anreizt, die akut noch nicht (aber erwartet im Laufe ihrer Lebensdauer) wirtschaftlich sind. Die Betriebskosten der stofflichen Nutzung sind hingegen in KS2 und KS3 geringer, da die Transformation der Chemie nach hinten verschoben wird. Beides ist um 2040 besonders deutlich ausgeprägt. Insbesondere sind die hohen Betriebskosten für Prozesswärme in KS2 und KS3 darauf zurückzuführen, dass die Umstellung auf CO₂-arme und hochwertige Energieträger zwar funktioniert (und Betriebskosten erhöht), gleichzeitig aber auch die fossile Nutzung teurer wird. Um 2045 nähern sich die Betriebskosten wieder an, da vergleichbare Zielzustände erreicht werden²² und der CO₂-Preis durch weitestgehende Dekarbonisierung keine Kosten mehr verursacht.

Die Betriebskostenzuschüsse kompensieren vor allem in KS1 die entstehenden Mehrkosten – in den anderen Szenarien werden diese weitgehend anders getragen. Um 2045 steigen jedoch auch

²² Aufgrund der Mittelung über einen längeren Zeitraum verbleiben Unterschiede.

in KS2 und KS3 die Zuschüsse, um die hohen Differenzkosten der wasserstoffbasierten Chemie auszugleichen²³. In KS4 wird unterstellt, dass diese Kostendifferenz weitgehend im Markt getragen werden kann – geringe Betriebskostenförderungen verbleiben auch um 2045 noch als Nachwirkung von Instrumenten bis 2030 (vgl. Tabelle 1). Insgesamt sind die Kostensteigerungen sehr gering – ohne stoffliche Nutzung sinken diese sogar. Dies liegt an Annahmen sinkender Strom- und Wasserstoffpreise sowie dem effizienzbedingten Rückgang des Endenergiebedarfs (siehe Abbildung 3).

Abbildung 10: Betriebskosten und Betriebskostenzuschüsse nach Technologiebereich



Quelle: Eigene Darstellung, Modellrechnung Fraunhofer ISI

Anmerkungen: Werte sind über 5 Jahre gemittelt (z. B. enthält 2030 den Durchschnittswert 2028-2032); Betriebskosten enthalten Energieträgerkosten mit Energiesteuern und CO₂-Kosten, aber ohne MwSt.; Sonstige Kosten wie Wartung, Löhne und Material sind in den Betriebskosten nicht enthalten

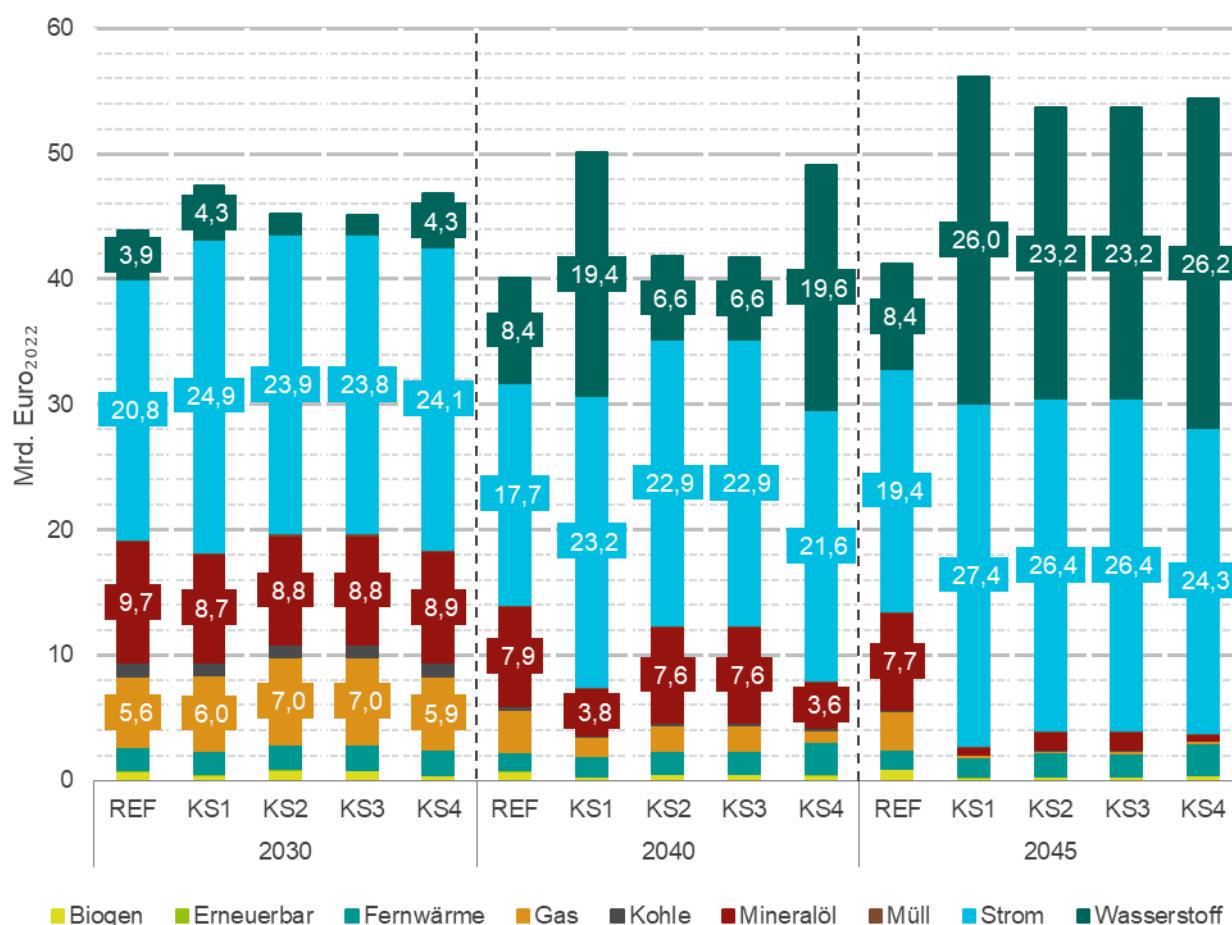
Die Darstellung der Energieträgerkosten als Teilmenge der Betriebskosten²⁴ verdeutlicht das zuvor argestellte (Abbildung 11): Um 2030 sind die Energieträgerkosten noch sehr ähnlich, Unterschiede

²³ Der in allen Szenarien dann deutlich gestiegene CO₂-Preis hilft, die Zuschüsse geringer zu halten. Allerdings sind diese in KS1, KS2 und KS3 ohne langfristiges Alternativmodell dauerhaft.

²⁴ Hier ist als einzige weitere berücksichtigte Komponente der Betriebskosten in der Industrie der CO₂-preisbedingte Anteil herausgerechnet. Andere Betriebskostenkomponenten (Wartung, Löhne, Material) sind in beiden Darstellungen nicht enthalten.

zeichnen sich durch die Berücksichtigung der ersten Jahre nach 2030 im Mittelwert aber bereits ab. So sind die Kosten für Wasserstoff – Nutzung in der Stahlindustrie und als chemischer Rohstoff) in KS2 und KS3 geringer. Die Kosten für Erdgas aber sind leicht erhöht. Aufgrund der hohen Preise ist Strom bereits 2030 der größte Kostenblock. Um 2040 werden in KS2 und KS3 noch mehr fossile Energieträger verwendet (Erdgas und Mineralöle) – hier ähnelt das Profil eher dem Referenzszenario denn KS1 und KS4. Der größte Unterschied aber ist die in KS2 und KS3 verzögerte – deutlich wasserstoffbezogene Kosten sparende – Transformation der Chemieindustrie. Um 2045 gleichen sich die Unterschiede wieder an und wie beim Energiebedarf und den Treibhausgasemissionen ist von keinem relevanten Unterschied der Energieträgerkosten der KS-Szenarien auszugehen.

Abbildung 11: Energieträgerkosten



Quelle: Eigene Darstellung, Modellrechnung Fraunhofer ISI

Anmerkungen: Werte sind über 5 Jahre gemittelt (z. B. enthält 2030 den Durchschnittswert 2028-2032); Energieträgerkosten mit Energiesteuern, aber ohne CO₂-Kosten und ohne MwSt.

5 Kernbotschaften

Aus dem Vergleich der Szenarien lassen sich einige Kernbotschaften ableiten, die sich auf das Zielbild 2045, den Entwicklungspfad dorthin und die Unterschiede der Szenarien beziehen.

1. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass in allen untersuchten Schwerpunkten der politischen Instrumente (erweiterter Instrumentenmix, Ordnungsrecht, CO₂-Bepreisung) das an KS1 angelehnte Zielbild mit weitgehender Dekarbonisierung der Industrie erreichbar ist.
2. Dieses Zielbild umfasst starke direkte Elektrifizierung, beschreibt damit aber nur eine von mehreren möglichen Zukünften. Es ist also nicht als ausschließliche Möglichkeit zu sehen, sondern als jene, die modellbasiert auf Basis der Annahmen entsteht. Robuste Anwendungen für direkte Elektrifizierung finden sich im Niedertemperaturbereich – aber auch Hochtemperaturanwendungen können elektrifiziert werden. In Letzteren ist allerdings die Konkurrenz mit Wasserstoff in vielen Anwendungen plausibel.
3. Im Entwicklungspfad – insbesondere 2030-2040 – sind relevante Unterschiede zwischen den preisbasierten Szenarien KS2/3 und KS1/4 zu erkennen. Hier wirkt vor allem der angenommene CO₂-Bepreisungspfad und verzögert die Einführung innovativer Produktionsverfahren in KS1 und KS4 etwas. Dadurch steigen die kumulierten Treibhausgasemissionen des Sektors.
4. Auch hohe CO₂-Preise sind nicht ohne weitere Instrumente in der Lage, die Transformation der Industrie vollständig anzureißen. In den Szenarien KS2 und KS3 musste eine starke Preisvoraussicht (10 Jahre) angenommen werden, um eine starke Umsetzungslücke zwischen 2030 und mindestens 2035 zu vermeiden. Darüber hinaus existieren Vermeidungstechnologien, die auch bei einem Preisniveau von über 300 €/t CO₂ nicht wirtschaftlich attraktiv werden. Diese – vorrangig in der wasserstoffbasierten Grundstoffchemie gelagerten – Anwendungen müssen auch in KS2 und KS3 zusätzlich durch Förderbudgets (oder alternativ über Leitmärkte) gestützt werden. Methodisch sind Reaktionen auf sehr hohe CO₂-Preise vielfältig und schwer zu erfassen – es ist von einer Lücke zwischen der Erklärfähigkeit der Modellierung und der Realität auszugehen.
5. Lange Lebensdauern von industriellen Anlagen erfordern, dass ab sofort keine neuen fossilen Investitionsentscheidungen mehr umgesetzt werden. Alternativ dazu müssen solche Anlagen deutlich vor dem Ende ihrer technischen Lebensdauern abgeschaltet, oder mit – im Rahmen der Annahmen – wirtschaftlich nicht effizienten Umrüstungen auf teurere Energieträger auskommen. Frühe Signale sind daher sowohl aus klimapolitischer als auch aus wirtschaftlicher Perspektive wichtig für eine effiziente Zielerreichung.
6. Die Anwendung von Ordnungsrecht in KS4 erlaubt modellseitig viele Freiheiten und kann effektiv eingesetzt werden. Allerdings werden viele Herausforderungen dieses Vorgehens in der verwendeten Methodik nur unzureichend oder gar nicht abgebildet²⁵. Es ist auch hier von einer Lücke zwischen der Erklärfähigkeit der Modellierung und der Realität auszugehen.
7. Die Modellierung des erweiterten Instrumentenmixes in KS1 kann sich am ehesten auf bestehende Erfahrung stützen, ist allerdings durch aktuell wahrgenommene Restriktionen des Staatshaushalts beschränkt. Insgesamt scheint der Pfad in KS1 allerdings weniger spekulativ als jene in KS2/3/4.

²⁵ Dazu gehören internationaler Wettbewerb, Umsetzbarkeit in politischer und gesellschaftlicher Sphäre und die für die Produktion und Installation der neuen Anlagen benötigten Vorleistungen. Zwar betreffen diese modellbedingten Einschränkungen alle untersuchten Szenarien. In KS4 scheinen diese aber besonders wichtig und bedenkenswert – gerade weil die Implementierung im Modell sehr einfach ist.

Literaturverzeichnis

Destatis - Statistisches Bundesamt (2024): Bedeutung der energieintensiven Industriezweige in Deutschland. Statistisches Bundesamt (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/produktionsindex-energieintensive-branchen.html>, zuletzt geprüft am 18.07.2024.

Fraunhofer ISI (2024): Direct electrification of industrial process heat, An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU. Study on behalf of Agora Industry. Online verfügbar unter <https://www.agora-industry.org/publications/direct-electrification-of-industrial-process-heat>, zuletzt geprüft am 18.07.2024.

Mendelevitch, R.; Repenning, J.; Matthes, F. C. (2022): Rahmendaten für den Projektionsbericht 2023. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/rahmendaten-fuer-den-projektionsbericht-2023>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.