

STUDIEN

*Christian
Schützenhofer
et al.*

transform.industry

Transformationspfade und FTI-Fahrplan für eine
klimaneutrale Industrie 2040 in Österreich

Wien, Jänner 2024

Erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds

transform.industry

Transformationspfade und FTI-Fahrplan für eine klimaneutrale Industrie 2040 in Österreich

Ausschreibung	Energieforschung 2020
Projektstart	01.10.2021
Projektende	31.07.2023
Auftragnehmer (Institution)	AIT Austrian Institute of Technology GmbH (Koordinator) Österreichische Energieagentur, Montanuniversität Leoben und Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz
Ansprechpartner	Christian Schützenhofer (Projektkoordinator, AIT)
E-Mail	christian.schuetzenhofer@ait.ac.at

Executive Summary	03
1.0 Einleitung	05
2.0 Methodik	06
3.0 Szenarien für die Dekarbonisierung der österreichischen Industrie	08
3.1 Technologien für die Transformation der Industrie	08
3.2 Beschreibung der Szenarien	13
3.2.1 Szenario Erneuerbare Gase	14
3.2.2 Szenario Kreislaufwirtschaft	16
3.2.3 Szenario Innovation	18
3.2.4 Szenario Sektorkopplung	20
3.3 Ökonomische Implikationen	26
3.3.1 Investitionsbedarfe für die Transformation	27
3.3.2 Energieträgerkosten und Importbedarfe	31
3.3.3 Volkswirtschaftliche Analyse und Auswirkungen der Transformation	33
3.3.4 Zusammenfassung der wirtschaftlichen Effekte	42
4.0 FTI-Fahrplan und Handlungsempfehlungen	43
4.1 Zukunftstechnologien	44
4.2 Handlungsfelder	46
4.2.1 Förderung von F&E	47
4.2.2 Anreize und Förderungen von Investitionen	49
4.2.3 Energieinfrastrukturen und Energiebereitstellung	50
4.2.4 Bereitstellung von Material und Rohstoffe	51
4.2.5 Auf- und Ausbau von Infrastrukturen	51
4.2.6 Kooperation und Vernetzung	51
4.2.7 Gesetzliche Rahmenbedingungen	52
4.2.8 Öffentliche Beschaffung und Nachfrage	52
4.2.9 Aus- und Weiterbildung sowie gesellschaftlicher Wandel	53
Literaturverzeichnis	55
Abkürzungsverzeichnis	56
Kontaktdaten	57

Executive Summary

Die Transformation der österreichischen Industrie hin zur vollständigen Vermeidung von Treibhausgasemissionen gewinnt immer mehr an Tempo. Die letzten Jahre brachten bedeutende Fortschritte bei der Entwicklung und dem Einsatz entsprechender Technologien, vor allem dort, wo klare Zielsetzungen und Rahmenbedingungen vorhanden waren. Diese Studie soll für Klarheit in Bezug auf zu entwickelnde und einzusetzende Technologien sorgen und stellt dazu Grundlagen für Transformationspfade für 13 Industriebranchen vor.

Die Basis für die Aufrechterhaltung von Wohlstand und die Erreichung klimapolitischer Ziele ist wertschöpfende Tätigkeit und Innovation. Die entsprechenden Strategien und Geschäftsmodelle der Industrie bauen auf der innovativen Kombination von spezialisierten Prozess- und Fertigungstechniken auf. Hier setzt diese Studie an: ausgehend von neun Technologiefamilien zur Prozesstransformation und acht Basistechnologien zur Wärmebereitstellung wurde unter Berücksichtigung unterschiedlicher Formen der Energiebereitstellung ein Verbrauchsmodell für die Industrie entwickelt. Um maximal robuste Ergebnisse zu erzielen, wurden bewusst nicht Szenarien modelliert, die als besonders wahrscheinlich anzusehen sind, sondern in vier den Raum der Möglichkeiten ausfüllende Extremszenarien die maximale Ausprägung von Technologie- und Energieträger-Anwendungen modelliert und verglichen. Diese Extremszenarien sind in sich konsistent, d. h. sie erreichen alle die für 2040 gesetzten klimapolitischen Ziele. Sie erlauben eine technologiespezifische Sensitivitätsbewertung und geben Aufschluss über die kombinierten Anwendungs- bzw. Durchdringungswahrscheinlichkeiten.

Die vier Szenarien sind:

- **Erneuerbare Gase:** hier gelingt die Transformation der Industrie größtenteils durch die Bereitstellung von erneuerbaren Energien durch die Energieversorger.
- **Kreislaufwirtschaft:** hier gelingt die Transformation durch eine gesteigerte Materialeffizienz und höhere Recyclingquoten, wodurch die energieaufwändige Grundstoffherstellung substantiell reduziert werden kann. Dies erfordert eine Integration der Wertschöpfungsketten auch zwischen Betrieben.
- **Innovation:** hier werden in hohem Ausmaß Best-Available und Breakthrough Technologien eingesetzt, was durch eine hohe Integration der Wertschöpfungsketten vor allem in den Betrieben erfolgt.
- **Sektorkopplung:** hier wird ein Optimierungsansatz verfolgt, bei dem der inländische Primärenergieverbrauch auf Basis der nachgefragten Energiedienstleistungen minimiert wird und zu diesem Zweck Energie exergetisch optimal eingesetzt wird.

Auf Grundlage von Energie- und Treibhausgasemissionen und den eingesetzten Technologien wurden im Projekt im Weiteren Investitions- und Energiekosten abgeschätzt und eine volkswirtschaftliche Bewertung der unterschiedlichen Szenarien vorgenommen. Daraus wurden die folgenden **Handlungsempfehlungen** abgeleitet.

- Die in Österreich verfügbaren Energieträger, insbesondere Elektrizität und Biomasse, sollten maximal wertschöpfend genutzt werden. Die Nutzung der Energieträger muss nach technologischen Erfordernissen sowie nach Temperaturniveaus priorisiert werden (z. B. CO₂-neutrale Gase für Hochtemperaturprozesse und Deckung von stofflichen Bedarfen, Heizen und Kühlen durch Abwärme und Wärmepumpen bedienen).

- Mit der nötigen Planungssicherheit bezüglich der Rahmenbedingungen können die Industrieunternehmen ihre Technologien umstellen. Die wichtigsten dazu sind:
 - Energiepreis- und Verfügbarkeitssicherheit
 - Rasche Genehmigungen von Netzen und Anlagen bei insgesamt überwiegendem Umweltnutzen gem. eigentlicher Intention des Umweltverträglichkeits-Prüfungs (UVP) Verfahrens
 - Klarheit bezüglich Treibhausgasbesteuerung (ETS und CBAM¹)
 - Infrastrukturen für Transport von CO₂-neutralen Gasen, einschließlich Gemischen und Wasserstoff-Derivaten rasch bereitstellen
 - Logistische Lösungen und gesetzliche Grundlagen für den Transport und die Nutzung von CO₂
- Aufgrund der Elektrifizierung und tlw. lokalen Elektrolyse wird sich der Strombedarf der Industrie bis zum Jahr 2040 verdoppeln. Dazu sind maximale Anstrengungen durch den Ausbau in Österreich vorkommender erneuerbarer Potentiale aber auch Infrastruktur höchste Priorität zu schenken, um Preisstabilität und Planbarkeit zu gewährleisten.
- Ohne Kohlenstoffabscheidung sind die Ziele nicht erreichbar. Eine Speicherung ist nach dem anfallenden Volumen gerechnet nahezu immer volkswirtschaftlich günstiger als die Nutzung von Kohlenstoff, da dies energetisch viel effizienter ist. Zudem sind die anfallenden Mengen so groß, dass ein reiner Export nicht in Frage kommt. Entsprechend ist die Kohlenstoffspeicherung zu ermöglichen.
- Der nicht energieintensive Sektor muss die Einführung bereits weit entwickelter sektorübergreifender Technologien (z. B. Wärmepumpen) beschleunigen, um auf dem Weg zur Erreichung der Ziele zu bleiben und seinen Wettbewerbsvorteil zu wahren. Folglich sind dringend industrie-, standort- und innovationspolitische Strategie und Maßnahmenpakete unter Einbindung aller Sozialpartner und der betroffenen Bundesländer und Regionen zu entwickeln.
- In den energieintensiven Sektoren müssen spezifische Produktionstechnologien rasch weiterentwickelt und in der Folge demonstriert und breit ausgerollt werden, um die Klimaneutralität bis 2040 erreichen zu können.
- F&E-Bedarf und eine entsprechende öffentliche Unterstützung besteht vornehmlich bei der Integration und Implementierung von Technologien im industriellen Maßstab.
- Um die Zielsetzung in der gewünschten Zeit zu erreichen, sind neben den bestehenden, regulativen Instrumenten auch positive Anreize erforderlich. Dazu zählen Förderungen für Investitionen und Betriebskosten zur Ergänzung bestehender aber zur Zeitschiene inkohärenter Besteuerung von Externalitäten.

¹ Emissions Trading System/Emissionshandelssystem, Carbon Border Adjustment Mechanism/CO₂-Grenzausgleichssystem

1.0 Einleitung

Innerhalb der kommenden zwei Jahrzehnte wird Österreich zu einem klimaneutralen Land umgebaut. Die Transformation ist eine enorme Herausforderung, besonders in der Industrie. Um dieses Ziel zu erreichen, braucht es große Mengen erneuerbarer Energie, Investitionen in Produktionsprozesse, die zum Teil noch neu entwickelt werden müssen, sowie einen Innovationsvorsprung im internationalen Wettbewerb.

Das Projekt *transform.industry* liefert Antworten auf die Frage, wie die Transformation der Industrie in Österreich am besten gestaltet werden kann.

Transform.industry ist ein Forschungsprojekt, das den produzierenden Sektor beim Weg in die Klimaneutralität unterstützt. Das Projektteam rund um AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Österreichische Energieagentur, Montanuniversität Leoben und Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz zeigt, wie sich Klimaschutz, Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit in unterschiedlichen Bereichen der österreichischen Industrie miteinander vereinbaren lassen.

Eine Bestandsaufnahme in 13 Sektoren und die Identifikation von Schlüsseltechnologien, mit denen Treibhausgasemissionen verhindert oder entfernt werden können, bilden das Fundament. Anhand von Transformations-szenarien werden der Investitions- und Energiebedarf sowie volkswirtschaftliche und ökologische Effekte abgeschätzt. Auf dieser Basis entwickeln die ExpertInnen gemeinsam mit VertreterInnen der industriellen Praxis einen strategischen Forschungs-, Technologie- und Innovationsfahrplan. Weiters sprechen sie Handlungsempfehlungen aus, welche Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, um innovative Schlüsseltechnologien „Made in Austria“ zu entwickeln und zur Marktreife zu bringen und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie weiter ausbauen können.

Die Ergebnisse von *transform.industry* sind in diesem Bericht sowie ergänzend in separat publizierte Branchen-Aktionsplänen zusammengefasst.

Die F&E-Dienstleistung ist im Auftrag des Klima- und Energiefonds entstanden und mit Mitteln des Energieforschungsprogramms 2020 finanziert.

2.0 Methodik

Der Arbeitsablauf, der im Projekt *transform.industry* zur Ermittlung von Transformationsszenarien sowie dazugehörigen Investitions- und Energiebedarfen und volkswirtschaftlicher und ökologischer Effekte angewandt wurde, setzte sich aus den im Folgenden beschriebenen Teilschritten zusammen (vgl. auch Abbildung 1).

Im **ersten Schritt wurde zum einen für alle Branchen der Status Quo** von wirtschaftlichen, energiebezogenen und emissionsbezogenen Kennzahlen basierend auf der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (*Statistik Austria, Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung*, 2020) sowie der Energiegesamtrechnung (*Statistik Austria, Energiegesamtrechnung*, 2020) und den im Rahmen der Vorzeigeregion New Energy for Industry ermittelten Werte (Alton *et al.*, 2022) **erhoben sowie vielversprechende Technologien**, die zur Transformation der Industrie zu einem klimaneutralen Sektor beitragen, **identifiziert** sowie ihre Einsatzmöglichkeiten und die technischen, ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen ermittelt. In **Schritt zwei** wurden **Storylines** entwickelt, die verschiedene Entwicklungspfade zum Ausdruck bringen, um das übergeordnete Ziel der Klimaneutralität der Industrie bis 2040 zu erreichen. Für jeden Entwicklungspfad wurden in der nachfolgenden **Modellierung (Schritt 3)** die eingesetzten Technologien aus dem ersten Schritt

zugeordnet, sowie die Anteile des Einsatzes der Technologien in den einzelnen Branchen definiert. Allen Szenarien ist gemein, dass sie nur den Energieverbrauch der Industrie analysieren. Die Kosten für die Aufbringung der Energieträger, z. B. von Wasserstoff, werden nicht analysiert. Im **vierten Schritt wurden** für die vier Szenarien und den jeweiligen eingesetzten Energieträgern, den dazugehörigen Mengen und Technologien eine **volkswirtschaftliche Bewertung** für den gesamten industriellen Sektor vorgenommen. Darauf aufbauend wurde eine Synthese der unterschiedlichen Entwicklungspfade vorgenommen und gemeinsam mit den Erkenntnissen der Technologierecherche und -identifikation wurden im **fünften Schritt die branchenspezifischen Schlüsseltechnologien** abgeleitet. Basierend auf (i) den Erkenntnissen aus zwei Workshops mit TeilnehmerInnen aus unterschiedlichen Branchen sowie (ii) den Modellierungsergebnissen für den Energiebedarf und zu den volkswirtschaftlichen Effekten, sind in **Schritt 6** Handlungsempfehlungen abgeleitet worden. Diese zeigen auf, welche Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, um innovative Schlüsseltechnologien „Made in Austria“ zu entwickeln und zur Marktreife zu bringen und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie weiter ausbauen zu können.

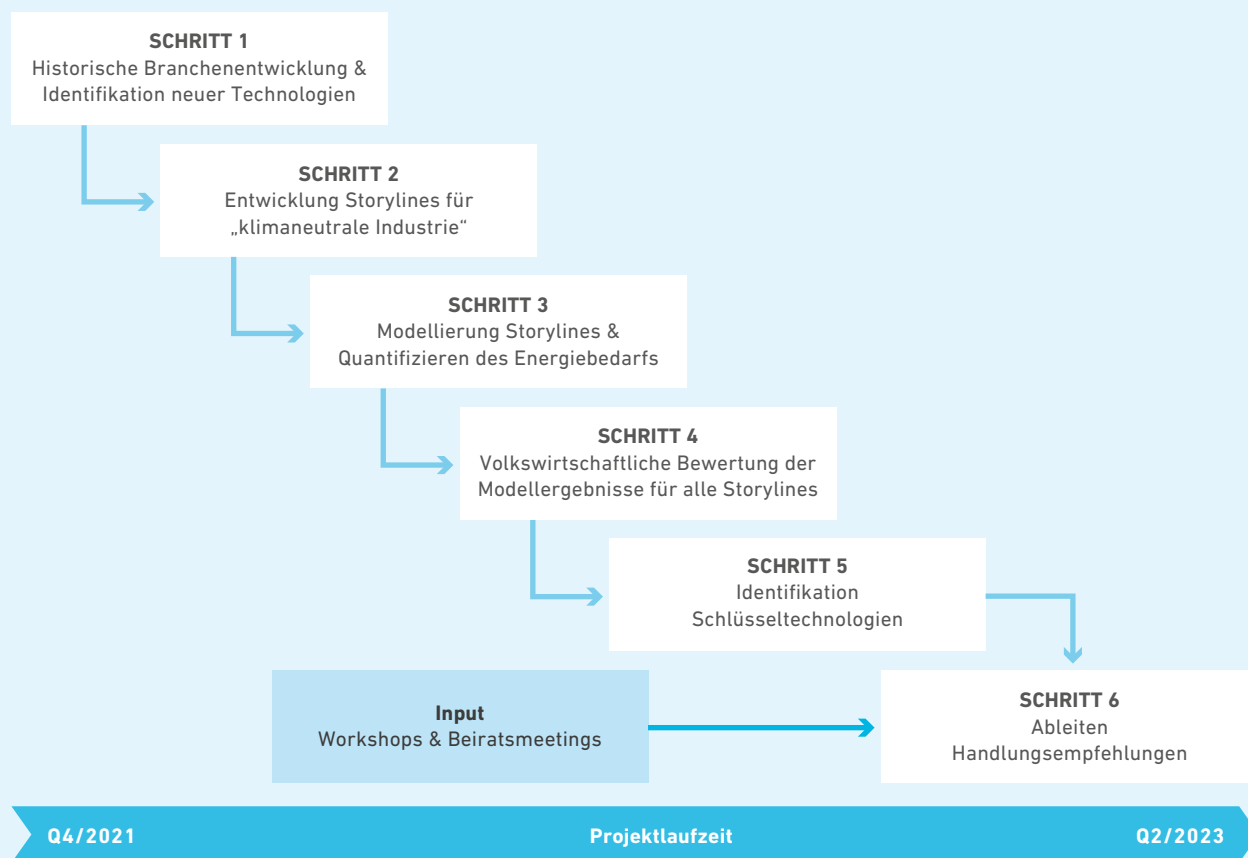


Abbildung 1
Darstellung Arbeitsschritte sowie Projektlaufzeit

Diese gewählte Methodik der Extremszenarien, welche einen Möglichkeitsraum aufspannen, steigern durch ihre große Variation möglicher nichtlinearer Effekte die Robustheit der Ergebnisse. Gleichzeitig kann und wurden nur Szenarien des Bedienens der historisch extrapolierten Energienachfragen, abgeleitet aus historischen Produktionsmengen und Wertschöpfungs-

beiträgen erstellt. Nachfrageseitige Variation ist nicht Teil dieser Studie da die Komplexität möglicher Rückkopplungseffekte nicht für alle Produkte der Industrie abbildbar ist. Dem wurde damit Rechnung getragen, dass die Erwartungen der Industrie bezüglich Technologieinsatz aus dem Vorprojekt NEFI Lab² übernommen wurden.

² Siehe nefi.at/en/decarbonisation-scenarios

3.0 Szenarien für die Dekarbonisierung der österreichischen Industrie

3.1 Technologien für die Transformation der Industrie

Die im Projekt analysierten Entwicklungspfade für eine klimaneutrale Produktion im industriellen Sektor, die durch vier Szenarien aufgespannt sind und für Fünfjahresschritte analysiert wurden, bauen auf unterschiedlichen Maßnahmen und folglich auch auf verschiedenen Technologien zur Dekarbonisierung auf. Die als relevant identifizierten Technologien wurden basierend auf dem Knowhow der Partner aus österreichischen und internationalen Projekten abgeleitet. Zudem wurden für jede Technologie, ergänzend zu einer Kurzbeschreibung, folgende Eigenschaften und Parameter erhoben bzw. bewertet:

- Eignung für die spezifischen Branchen
- Eignung für die Nutzenergiekategorien bzw. Anwendungsbereiche
- Erforderliche Energieträger
- Technology-Readiness-Level (jeweils für 2025 bis 2040 in Fünfjahresschritten)
- Spezifischer Energiebedarf (jeweils für 2025 bis 2040 in Fünfjahresschritten)
- Prozessbedingte CO₂-Emissionen (jeweils für 2025 bis 2040 in Fünfjahresschritten)
- Investitionskosten bzw. CAPEX (jeweils für 2025 bis 2040 in Fünfjahresschritten)
- Energiekosten bzw. OPEX (jeweils für 2025 bis 2040 in Fünfjahresschritten)
- Kalkulatorische Nutzungsdauer (jeweils für 2025 bis 2040 in Fünfjahresschritten)

Vor dem Hintergrund der Architektur der Szenarien bzw. ihrer Storylines wurden zum einen Technologien und Maßnahmengruppen identifiziert, die für alle vier Szenarien von wesentlicher Bedeutung sind, zum anderen aber auch solche, die nur in ausgewählten Szenarien zum Einsatz kommen. Im Rahmen der Transformation zur Klimaneutralität im österreichischen industriellen Sektor, sind folgende Maßnahmen-gruppen von wesentlicher Bedeutung:

- **Elektrifizierung und Energieeffizienz**
(bspw.: Wärmepumpe, Abwärmenutzung, Prozessverbesserungen oder Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen)
- **Wechsel des Energieträgers und Einsatz Erneuerbarer Gase** und Biomasse (z. B. SNG, H₂, BIO-CH₄)
- **Einsatz von Carbon Capture** für prozessbedingte Emissionen
- Verbesserte **Kreislaufwirtschaft** zur Reduktion des Gesamtenergiebedarfs für den produzierenden Sektor.

Der (anteilige) Einsatz der berücksichtigten Technologien in den einzelnen Szenarien sowie die angenommenen techno-ökonomischen Parameter für die wirtschaftliche Analyse werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

Es wurden sieben Technologien zur Wärmebereitstellung für die Bereiche Raumwärme, Prozesswärme <200 °C, und Prozesswärme >200 °C (zusätzlich zu den Bestandstechnologien) sowie Standmotoren berücksichtigt:

- Wärmepumpe mit Umgebungswärme als Wärmequelle, üblicherweise zur Bereitstellung von Raumwärme
- Biomassekessel für Raumwärmebereitstellung
- Fernwärme zur Raumwärmebereitstellung
- Wärmepumpe mit Abwärme als Wärmequelle, üblicherweise zur Bereitstellung von Raumwärme oder Prozesswärme
- Direkte Abwärmenutzung für Raum- bzw. Prozesswärme
- Biomassekessel für Prozesswärme
- Gaskessel (erneuerbares Gas) für Raum- bzw. Prozesswärme

Des Weiteren wurden neun Technologien zur Prozessumstellung für die Stahl- und Zementproduktion, sowie die chemische Industrie herangezogen:

- Direktreduktion mit Methan (Primärstahlerzeugung)
- Direktreduktion mit Wasserstoff (Primärstahlerzeugung)
- Elektrolichtbogenofen (Sekundärstahlerzeugung)
- Carbon Capture mit Aminwäsche (Zementherstellung)
- Carbon Capture mit Oxyfuel-Verfahren (Zementherstellung)
- Methanolherstellung aus Wasserstoff (chemische Industrie)
- Methanolherstellung aus Methan für Olefinproduktion (chemische Industrie)
- Olefinproduktion aus Methanol (chemische Industrie)
- Ammoniakproduktion aus Wasserstoff (chemische Industrie)

Zur Identifikation der Schlüsseltechnologien je Branche bzw. in Synthese für den gesamten Sektor wurden die berücksichtigten Technologien für die unterschiedlichen Storylines bzw. Szenarien modelliert. Dabei wurde die Implementierung dieser Technologien als Maßnahmen für die unterschiedlichen Nutzenergiekategorien (Anwendungsbereiche) bzw. für den Produktionsbereich hinsichtlich folgender Kriterien verglichen:

- Emissionsreduktions-Potenzial im Sektor,
- Investitionsbedarf bzw. Energiekosten im Vergleich zu Alternativen für den Anwendungsbereich,
- Primärenergiereduktions-Potenzial und
- Reifegrad der Maßnahme.

Die Zusammenfassung dieses Vergleichs wurde für jede Branche in einer Tabelle dargestellt. Im Folgenden ist die Tabelle für den Sektor Eisen und Stahl dargestellt als Beispiel für die Bewertung der Technologien für die Relevanz in den einzelnen Branchen (vgl. Tabelle 1) dargestellt.

Die Ausprägung der Bewertungskriterien wurde für jede Branche individuell festgelegt. Sie bilden gemeinsam mit der ökonomischen Analyse die Grundlage für die Identifikation einer Maßnahme als Schlüsseltechnologie. Darüber hinaus wurde für alle Schlüsseltechnologien in den jeweiligen Branchen-Aktionsplänen eine Beschreibung folgender Aspekte vorgenommen:

- Relevanz für die Branche
- Vor- und Nachteile
- Herausforderungen
- Technische Rahmenbedingungen und Umsetzung

Tabelle 2 zeigt die Ausarbeitung der technologischen Eigenschaften exemplarisch für eine Technologie, die zur Dekarbonisierung des Produktionsprozesses in der Branche Eisen und Stahl eingesetzt werden kann. In den Branchen-Aktionsplänen sind solche Beschreibungen für alle für die jeweilige Branche als relevant identifizierten Technologien angeführt.

Anwendungsbereich	Kurzbezeichnung Maßnahme	Emissionsreduktionspotenzial in der Branche bzw. branchenübergreifend (hoch, mittel, niedrig)	Invest-Bedarf in Relationen zu Alternativen im Anwendungsbereich (günstig, mittel, teuer)	Energiekosten in Relation zu Alternativen im Anwendungsbereich (günstig, mittel, teuer)	Primärenergie-reduktionspotenzial in Relation zu Alternativen im Anwendungsbereich (hoch, mittel, niedrig)	Reifegrad (vor-marktreif, marktreif, marktverfügbar, etabliert)	Klassifikation der Maßnahme (empfehlenswert, bedingt empfehlenswert, nicht empfehlenswert)
Raumwärme	Integration Wärmepumpen – Nutzung Umgebungswärme oder industrielle Abwärme (standortintern oder -übergreifend)	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Marktverfügbar	Empfehlenswert
	Direkte Wärmerückgewinnung (standortintern oder -übergreifend)	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Marktverfügbar	Empfehlenswert
	Erhalt/Ersatz der Bestandsstruktur & Energieträgerwechsel für fossile Brennstoffe (erneuerbare Gase – grüner H ₂ /erneuerbares CH ₄)	Niedrig	Günstig	Mittel	Niedrig	Etabliert	Empfehlenswert
Prozesswärme <200 °C	Erhalt/Ersatz der Bestandsstruktur bzw. Neuanlagen und Energieträgerwechsel für fossile Brennstoffe (erneuerbare Gase – grüner H ₂ /erneuerbares CH ₄)	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Etabliert	Bedingt empfehlenswert
	Erhalt Bestandsstruktur bzw. Neuanlagen für feste Brennstoffe wie Biomasse oder Ersatzbrennstoffe	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Etabliert	Bedingt empfehlenswert
	Vergasung biogener Rohstoffe und Einsatz in anderen Branchen	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Vor-marktreif	Bedingt empfehlenswert
	Elektrifizierung bzw. Integration Hochtemperatur-Wärmepumpe	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Vor-marktreif	Empfehlenswert
	Branchen-übergreifende direkte Abwärmenutzung	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Marktverfügbar	Empfehlenswert
Prozesswärme >200 °C	Erhalt Bestandsstruktur & Energieträgerwechsel für fossile Energieträger (erneuerbare Gase – grüner H ₂ oder erneuerbares CH ₄)	Hoch	Günstig	Teuer	Niedrig	Etabliert	Empfehlenswert
	Erhalt Bestandsstruktur für feste Energieträger wie Biomasse oder Ersatz-Energieträger	Hoch	Günstig	Mittel	Niedrig	Etabliert	Empfehlenswert
	Elektrifizierung der Prozesswärmebereitstellung < 1000 °C	Hoch	Mittel	Teuer	Hoch	Marktverfügbar	Empfehlenswert
	Elektrifizierung der Prozesswärmebereitstellung > 1000 °C	Hoch	Mittel	Teuer	Hoch	Vor-marktreif	Bedingt empfehlenswert



Anwendungsbereich	Kurzbezeichnung Maßnahme	Emissionsreduktionspotenzial in der Branche bzw. branchenübergreifend (hoch, mittel, niedrig)	Invest-Bedarf in Relationen zu Alternativen im Anwendungsbereich (günstig, mittel, teuer)	Energiekosten in Relation zu Alternativen im Anwendungsbereich (günstig, mittel, teuer)	Primärenergie-reduktionspotenzial in Relation zu Alternativen im Anwendungsbereich (hoch, mittel, niedrig)	Reifegrad (vor-marktreif, marktreif, marktverfügbar, etabliert)	Klassifikation der Maßnahme (empfehlenswert, bedingt empfehlenswert, nicht empfehlenswert)
Standmotoren	Selbstfahrende Arbeitsmaschinen: Ersatz von Dieselantrieben durch BEV bzw. FCEV	Mittel	Mittel	Mittel	Niedrig	Vor-marktreif	Empfehlenswert
Prozess-emissionen	Prozesswechsel vom konventionellen Hochofen zum Bio CH ₄ -Direktreduktion und EAF	Hoch	Teuer	Teuer	Niedrig	Etabliert	Empfehlenswert
	Prozesswechsel vom konventionellen Hochofen zum H ₂ -Direktreduktion und EAF	Hoch	Teuer	Teuer	Niedrig	Marktreif	Empfehlenswert
	Nutzung von Stahlschrott – vermehrte Kreislaufwirtschaft	Mittel	Mittel	Günstig	Hoch	Etabliert	Empfehlenswert
	Elektrolichtbogenofen (EAF)	Mittel	Mittel	Günstig	Hoch	Etabliert	Empfehlenswert

Tabelle 1

Beispielhafte Ausarbeitung – Branchenspezifische

Schlüsseltechnologien in der Branche Eisen- und Stahlerzeugung

Kriterium	Beschreibung
Relevanz für die Branche Eisen und Stahlerzeugung	Verwendung von Bio-CH ₄ oder Wasserstoff als Reduktionsmittel anstelle von Kohle zur Reduktion von Eisenerzpellets in einem Schachtofen. Diese Technologie eliminiert Prozessemissionen, und das Emissionseinsparungspotenzial für die Eisen- und Stahlindustrie kann bis zu 95 % betragen.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> – Hohes CO₂-Reduktionspotenzial (> 95 % Reduktion) – Etablierte Technologie (DRI mit Bio-CH₄ ist eine etablierte Technologie, H₂-Direktreduktion ist marktreif) – Geringerer Energieverbrauch im Vergleich zur konventionellen Methode (ohne Berücksichtigung des Energiebedarfs für Elektrolyseur) – Möglichkeit, mehr Schrott zu verwenden und den Anteil des Rohstoffverbrauchs (Eisenerz) zu verringern
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe initiale Investitionen – Einstellung/Erhalt/Erhöhung der Produktqualität im Rahmen der Technologieintegration eine Herausforderung
Herausforderungen	<ul style="list-style-type: none"> – Erfordert erneuerbare Gase (Bio-CH₄ und H₂), um die Emissionen vollständig zu reduzieren. – Verfügbarkeit von ausreichend Energieträgern (bspw. H₂ oder Bio-CH₄).
Technische Rahmenbedingungen und Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> – TRL: 9 DRI mit Bio-CH₄ (IEA, 2022) – TRL: 7 DRI mit H₂ (IEA, 2022) – DRI mit Bio-CH₄, eine etablierte Technologie (TRL 9), erfordert Änderungen der Anlageninfrastruktur. – DRI mit H₂ ist noch nicht etabliert (TRL 7) und muss noch einige Herausforderungen bewältigen, z. B. infrastrukturelle Veränderungen, höhere Investitionen als DRI mit Bio-CH₄ und Sicherheitsfragen, um die Technologie vollständig umzusetzen (IEA, 2022). – Bei dieser Prozessänderung (sowohl CH₄- als auch H₂-DRI mit EAF, bei der sowohl Eisenerz als auch Stahlschrott verwendet werden) ist es eine technische Herausforderung, die Qualität der Stahlerzeugnisse auf dem Niveau des Primärstahls zu halten.

Tabelle 2

Beispielhafte Ausarbeitung: Schlüsseltechnologie

Direktreduktionseisen (DRI) mit Bio CH₄/H₂ und

Elektrolichtbogenofen: Eigenschaften der Technologie

3.2 Beschreibung der Szenarien

Energieszenarien stellen ein wertvolles Werkzeug für die Identifikation von No-Regret Maßnahmen³ in Bezug auf die in Kapitel 4 dargestellten Handlungsempfehlungen dar. Durch das Aussteuern in Richtung verschiedener Schwerpunkte, können die Auswirkungen von Technologie- und Energieträgereinsatz, Energieträgerversorgung und Prozesskettengestaltung gegeneinander verglichen werden. Dadurch können robuste Ergebnisse erzeugt werden, die die Transformation zu einer klimaneutralen Industrie in Österreich unterstützen können.

In gegenständlicher Studie werden ausgehend vom derzeitigen wirtschaftlichen Wachstumstrend, welcher im Modell als Berechnungsbasis dient, vier Nachfrageszenarien untersucht, die in unterschiedliche Entwicklungsrichtungen aussteuern: (I) Innovation und Umbau hauptsächlich im Sektor Energieversorgung, (II) Transformation der industriellen Produktion Richtung Sekundärproduktion, (III) Innovation innerhalb der produzierenden Betriebe. Allen gemein ist die grundlegende Annahme, dass die Klimaneutralität 2040 in der österreichischen Industrie erreicht wird. Abbildung 2 bildet eine schematische Darstellung der angewandten Szenarienarchitektur ab.

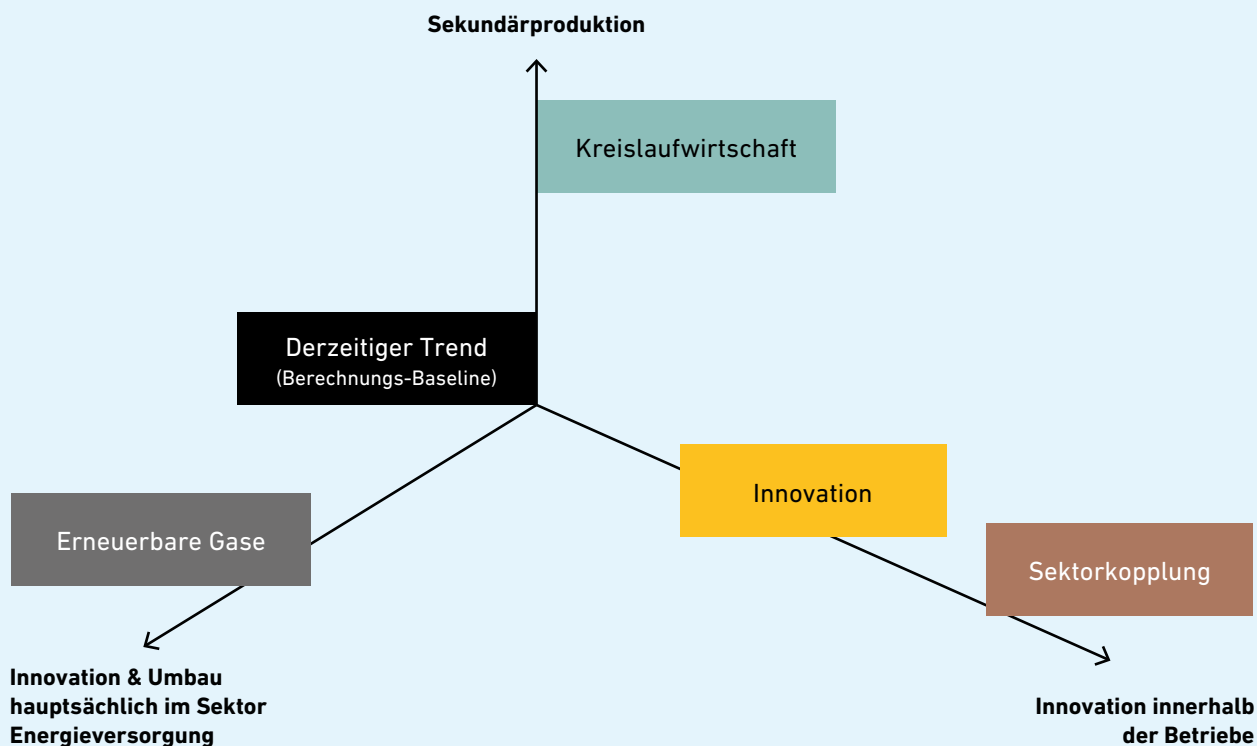


Abbildung 2
Schematische Darstellung der Szenarienarchitektur

³ No-Regret-Maßnahmen sind Maßnahmen, die unabhängig von der eingeschlagenen Strategie oder dem Ausmaß der tatsächlich eintretenden Klimafolgen ökonomisch, ökologisch und sozial sinnvoll sind.

Die dargestellten Szenarien werden im Folgenden im Detail in Bezug auf ihre Annahmen und Modellierungsparameter beschrieben.

3.2.1 Szenario Erneuerbare Gase

Das Szenario Erneuerbare Gase (EG) setzt zur Erreichung der industriellen Klimaneutralität auf einen tiefgreifenden Strukturwandel in der heimischen Energieversorgung. Dort, wo heute noch fossile Energieträger im Allgemeinen und fossile Gase im Speziellen eingesetzt werden, soll in diesem Szenario bis 2040 auf erneuerbares Gas gesetzt werden. Dies ermöglicht es, bestehende Strukturen und Infrastruktur weiter zu nutzen, und den Umstellungsaufwand für die Industrie zu minimieren.

In der Stahlindustrie wird die derzeit eingesetzte Hochofenroute durch die Direktreduktion des Eisenerzes mittels erneuerbarem Gas und durch Elektro-Lichtbogenöfen ersetzt. In der chemischen Industrie erfolgt die Herstellung wesentlicher Grundstoffe (Ammoniak, Urea, Methanol und Olefinen) ebenfalls auf Basis von Biomethan. Prozessbedingte Restemissionen in der Zementherstellung werden abgeschieden.

Abbildung 3 zeigt den Bedarf an Energieträgern, der in der Industrie im Szenario Erneuerbare Gase bis 2040 besteht.

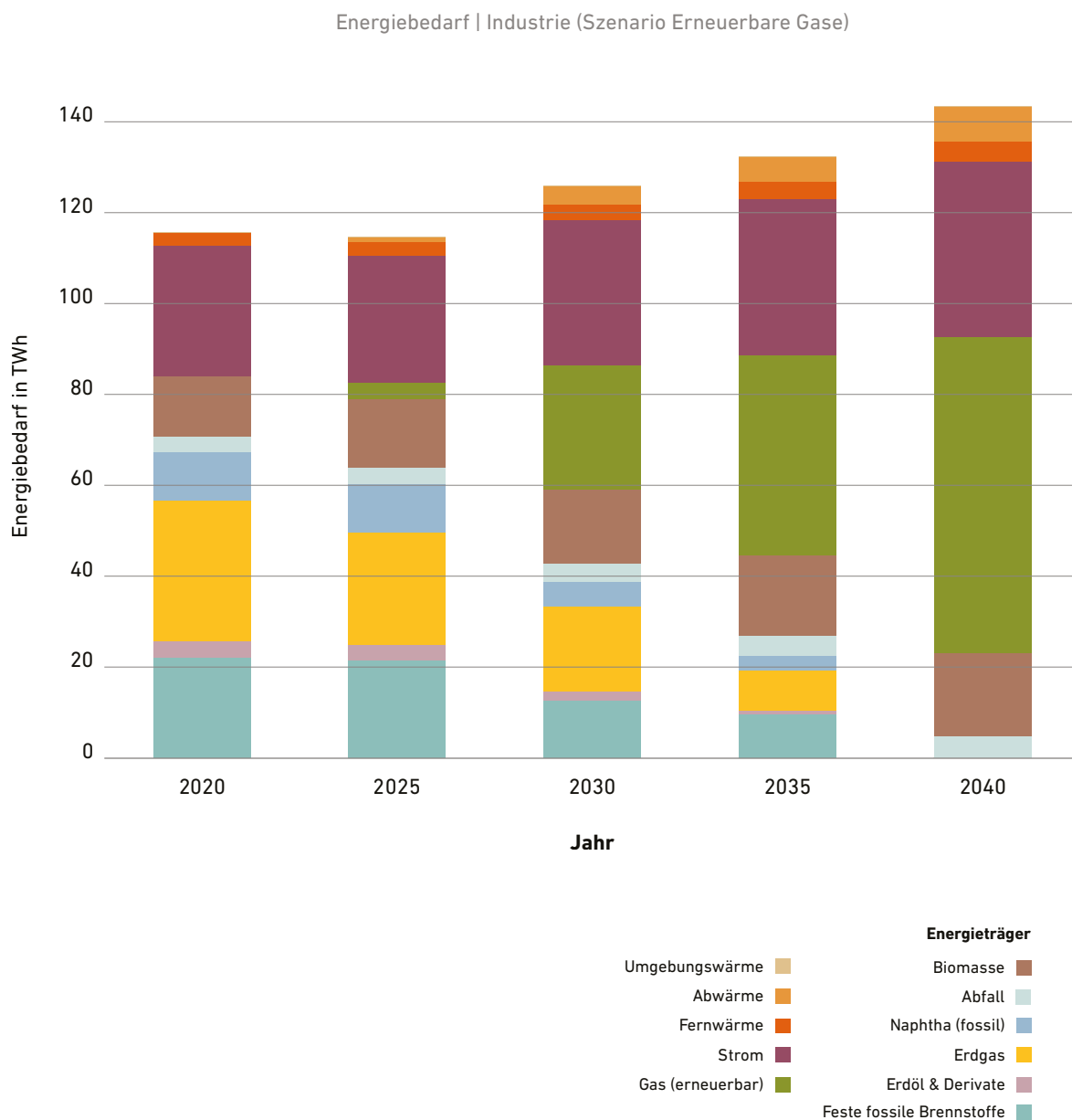


Abbildung 3
Energieträgerbedarf der Industrie
im Szenario Erneuerbare Gase

Die Abbildung zeigt die Entwicklung des Energieträgerbedarfs der Industrie im Szenario Erneuerbare Gase in 5-Jahres-Schritten von 2020 bis 2040. Die in der Abbildung dargestellten Energiemengen und die daraus resultierende Entwicklung ist in den folgenden Absätzen des Textes beschrieben.

Abbildung 3 illustriert, dass der Energieträgerbedarf der Industrie gleichmäßig von 116 TWh im Jahr 2020 bis auf 144 TWh im Jahr 2040 wächst. Der Verbrauch von fossilen Energieträgern im Jahr 2020 in der Höhe von insgesamt 67 TWh (davon 22 TWh Kohle, 31 TWh Erdgas, und 11 TWh fossiles Naphtha) sinkt im Jahr 2040 auf null.

Im Gegensatz dazu steigt die Nutzung von fester Biomasse von 13 auf 18 TWh, von Strom um ein Drittel von 29 auf 39 TWh, und von industriellen Abfällen und Ersatzbrennstoffen bzw. Fernwärme leicht von jeweils 3 auf 5 bzw. 4 TWh. Neu im Verbrauch des Jahres 2040 sind neben 8 TWh Abwärme **70 TWh erneuerbare Gase, die nahezu die Hälfte des Bedarfs in 2040 abdecken.**

3.2.2 Szenario Kreislaufwirtschaft

Das Szenario Kreislaufwirtschaft (KW) baut auf den Annahmen des Szenarios Erneuerbare Gase auf, etabliert allerdings dort, wo es unter Wahrung bisheriger Produktportfolios und Qualitäten möglich ist, im Bereich der Grundstoffindustrie weitreichende Sekundärproduktionsrouten. Dadurch erfolgt etwa die Stahlerzeugung zu 50% auf Basis von Schrott anstelle von Eisenerz bzw. Eisenschwämmen. PET und Kunststoff werden in hohem Ausmaß recycelt, CO₂ wird zur Produktionsressource, ebenfalls verbessert sich die Erzeugungseffizienz für Mineralstoffe.

Abbildung 4 zeigt den Bedarf an Energieträgern der Industrie im Szenario Kreislaufwirtschaft bis 2040.

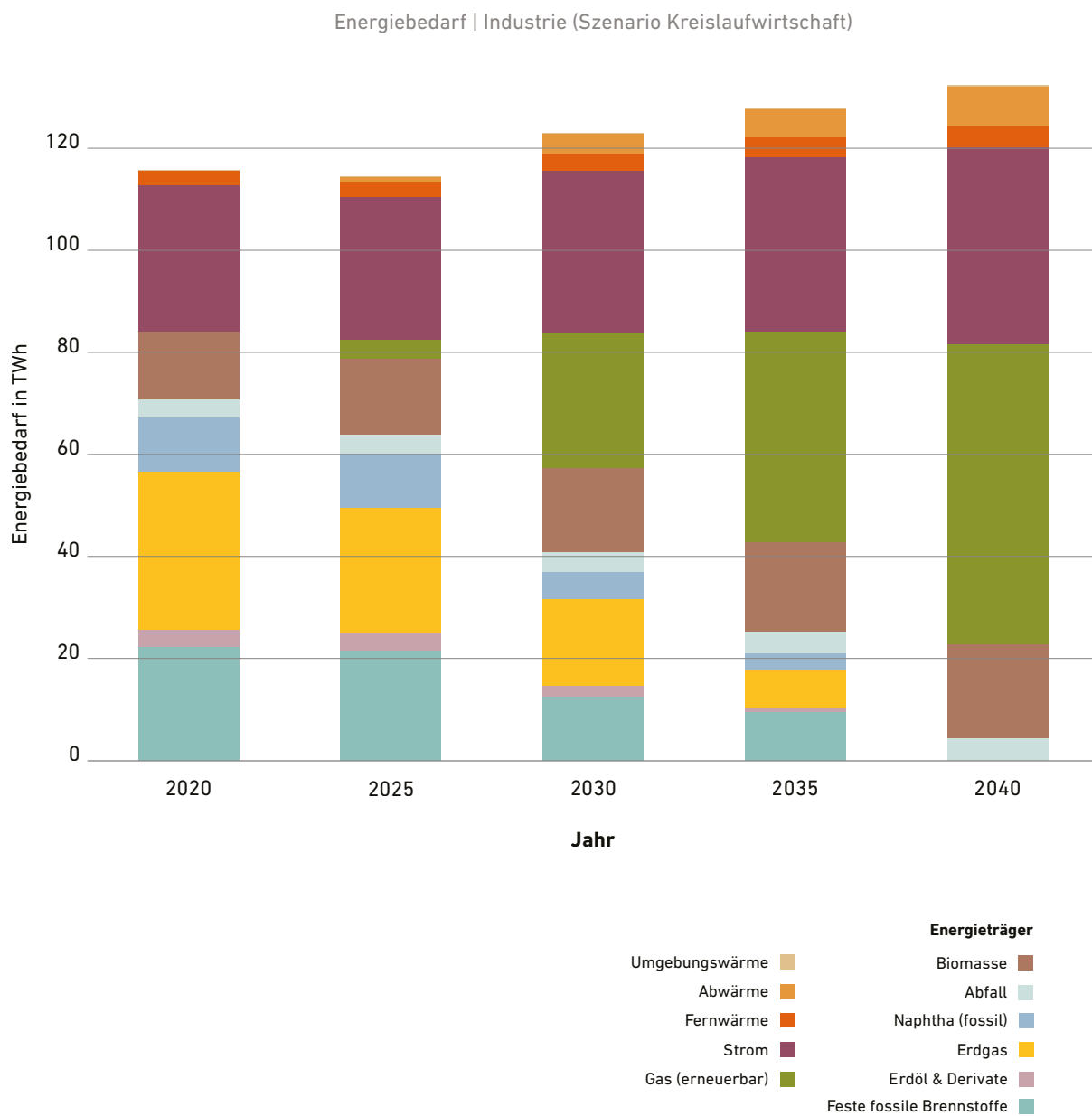


Abbildung 4
Energieträgerbedarf der Industrie
im Szenario Kreislaufwirtschaft

Man sieht in *Abbildung 4*, dass der Energieträgerbedarf der Industrie gleichmäßig von 116 TWh im Jahr 2020 bis auf 132 TWh im Jahr 2040 zunimmt. Der Verbrauch von fossilen Energieträgern im Jahr 2020 in der Summe von insgesamt 67 TWh (davon 22 TWh Kohle, 31 TWh Erdgas, und 11 TWh fossiles Naphtha) sinkt – wie bereits im Szenario Erneuerbare Gase – im Jahr 2040 auf null.

Im Gegensatz dazu steigt die Nutzung von fester Biomasse von 13 auf 18 TWh, von Strom von 29 auf 38 TWh, und von industriellen Abfällen und Ersatzbrennstoffen bzw. Fernwärme leicht von jeweils 3 auf 5 bzw. 4 TWh. Neu im Verbrauch des Jahres 2040 sind 59 TWh erneuerbare Gase sowie 8 TWh Abwärme.

3.2.3 Szenario Innovation

Das Szenario Innovation (IN) stellt im Gegensatz zu den beiden oben beschriebenen Szenarien die progressive Ausbreitung von Best-Available und Breakthrough Technologien in den betrachteten Branchen in den Fokus der Untersuchungen. Energieträger werden in diesem Szenario verstärkt nach Art des Energiebedarfs eingesetzt. Die eingesetzten innovativen Technologien ermöglichen vielfach energieeffizientere Produktionsprozesse.

Die zur Stahlerzeugung erforderliche Roheisenerzeugung erfolgt in diesem Szenario mittels Direktreduktion auf Basis von Wasserstoff und unterscheidet sich damit von den Szenarien Erneuerbare Gase und Kreislaufwirtschaft. Die Grundstoffherstellung der chemischen Industrie erfolgt zum Teil (Urea, Ammoniak und Methanol) auf Basis von Wasserstoff, die Herstellung von Olefinen basiert auf nachhaltig hergestelltem Naphtha. Die Abscheidung der prozessbedingten Emissionen der Zementherstellung erfolgt mittels Oxyfuel-Technologie.

Abbildung 5 zeigt den Bedarf an Energieträgern der Industrie im Szenario Innovation bis 2040.

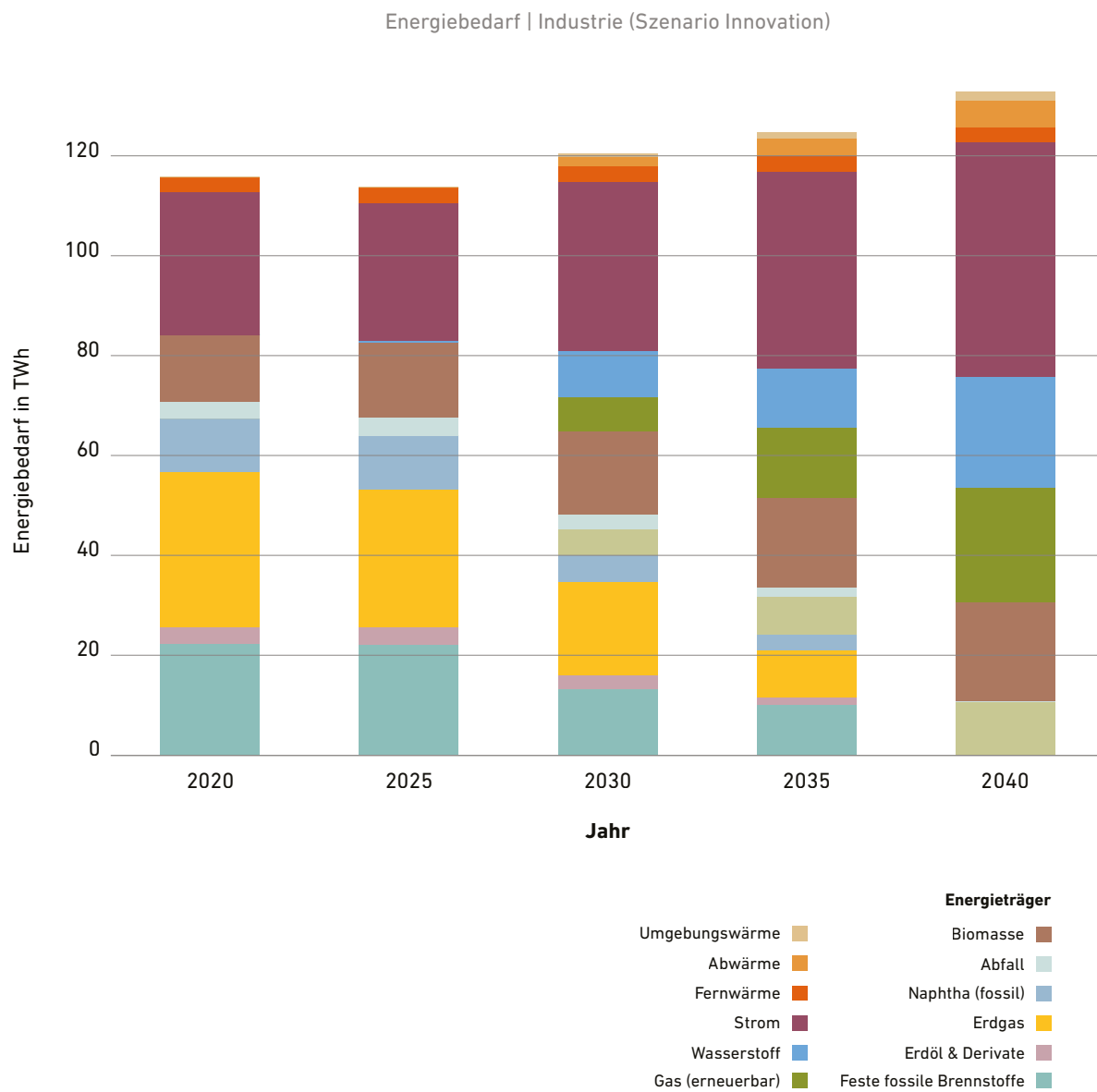


Abbildung 5
Energieträgerbedarf der Industrie
im Szenario Innovation

Abbildung 5 illustriert, dass der Energieträgerbedarf der Industrie in diesem Szenario gleichmäßig von 116 TWh im Jahr 2020 bis auf 133 TWh im Jahr 2040 anwächst. Der Verbrauch von fossilen Energieträgern im Jahr 2020 in der Summe von insgesamt 67 TWh (davon 22 TWh Kohle, 31 TWh Erdgas) sinkt – wie bereits im Szenario Erneuerbare Gase – im Jahr 2040 auf null. Der Verbrauch von industriellen Abfällen und Ersatzbrennstoffen verschwindet ebenfalls. Der Verbrauch von fossilem Naphtha in der Höhe von 11 TWh wird durch Naphtha aus nachhaltiger Erzeugung ersetzt. Der dargestellte Wasserstoff wird als solcher benötigt und ist aus erneuerbaren Quellen angenommen (lokale Produktion und Importe). Für Bereiche, wo die chemische Zusammensetzung des erneuerbaren Gases technisch irrelevant ist, ist dieses als „Gas (erneuerbar)“ dargestellt. Es ist ein veränderliches Gemisch aus erneuerbarem Methan und Wasserstoff. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass keine Annahmen zu einem Blending getroffen werden. Die Darstellung zielt auf die Zusammensetzung des Gassystems in Österreich als Ganzes ab und kann daher auch durch für den ausschließlichen Transport von H_2 und CH_4 vorbereiteten Leitungen realisiert werden.

Im Gegensatz dazu steigt die Nutzung von fester Biomasse von 13 auf 20 TWh und von Strom um zwei Drittel von 29 auf 47 TWh. Der Fernwärmeverbrauch bleibt mit 3 TWh konstant. Neu im Verbrauch des Jahres 2040 sind 23 TWh erneuerbare Gase, 22 TWh Wasserstoff sowie 5 TWh Abwärme und 2 TWh Umgebungswärme.

3.2.4 Szenario Sektorkopplung

Das Energiemengengerüst im Szenario Sektorkopplung (SK) leitet sich durch eine exergiebasierte Analyse⁴ der in Österreich nachgefragten Energieanwendungen aus dem Szenario WAM2019 ab (Umweltbundesamt, 2020).

Das bedeutet, dass jeder Energieträger kaskadisch, möglichst beginnend bei der Anwendung mit dem höchstwertigen Bedarf (z. B. Elektrizität für IT oder Bewegung, Gas für hohe Temperaturniveaus), eingesetzt wird. Mithilfe der Nutzenergieanalyse des Jahres 2019 werden den im WAM ermittelten Energieträgern je Sektor die nachgefragten Nutzenergiekategorien zugeordnet und mit mittleren Technologieeffizienzen zunächst auf Nutzenergien umgerechnet. In einem weiteren Schritt werden diese Nutzenergien mithilfe von auf Temperaturniveau bzw. Art der Nutzenergie (thermisch vs. mechanisch oder elektrisch) ermittelten Exergiefaktoren auf Nutzenergien umgerechnet.

Darüber hinaus wurden für die industriellen Verbraucher Energiebedarfe für die Primärstahlerzeugung mittels Direktreduktion und Elektrolichtbogenofen, die Erzeugung von Methanol, Ammoniak, Harnstoff und Olefinen in der chemischen Industrie und für die CO_2 -Sequestration im Sektor Steine und Erden, Glas berücksichtigt. Mittels linearer Optimierung die den Ausführungen nach (Sejkora *et al.*, 2022) entspricht, wird ein Szenario ermittelt, in dem der Bruttoinlandsverbrauch Österreichs über das gesamte Jahr gerechnet den Minimalwert erreicht. In diesem Szenario fließen neben den Energiemengen aus Photovoltaik, Windkraft, Wasserkraft und Biomasse insbesondere auch Potentiale der industriellen Abwärme in die Berechnungen ein.

In der parallel zu dieser Studie durchgeführten Studie InfraTrans2040 werden die Ergebnisse dieses Szenarios in Bezug auf infrastrukturelle Engpässe und deren Lösungsmöglichkeiten analysiert.⁵

Abbildung 6 zeigt den Bedarf an Energieträgern, der in der Industrie im Szenario Sektorkopplung bis 2040 besteht.

⁴ Exergie ist ein Maß für die Menge an Arbeit, die aus einem thermodynamischen System gewonnen werden kann.

⁵ Lehrstuhl für Energieverbundtechnik an der MU Leoben; Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation an der TU Graz; Österr. Wirtschaftsforschungsinstitut, 2023: InfraTrans2040

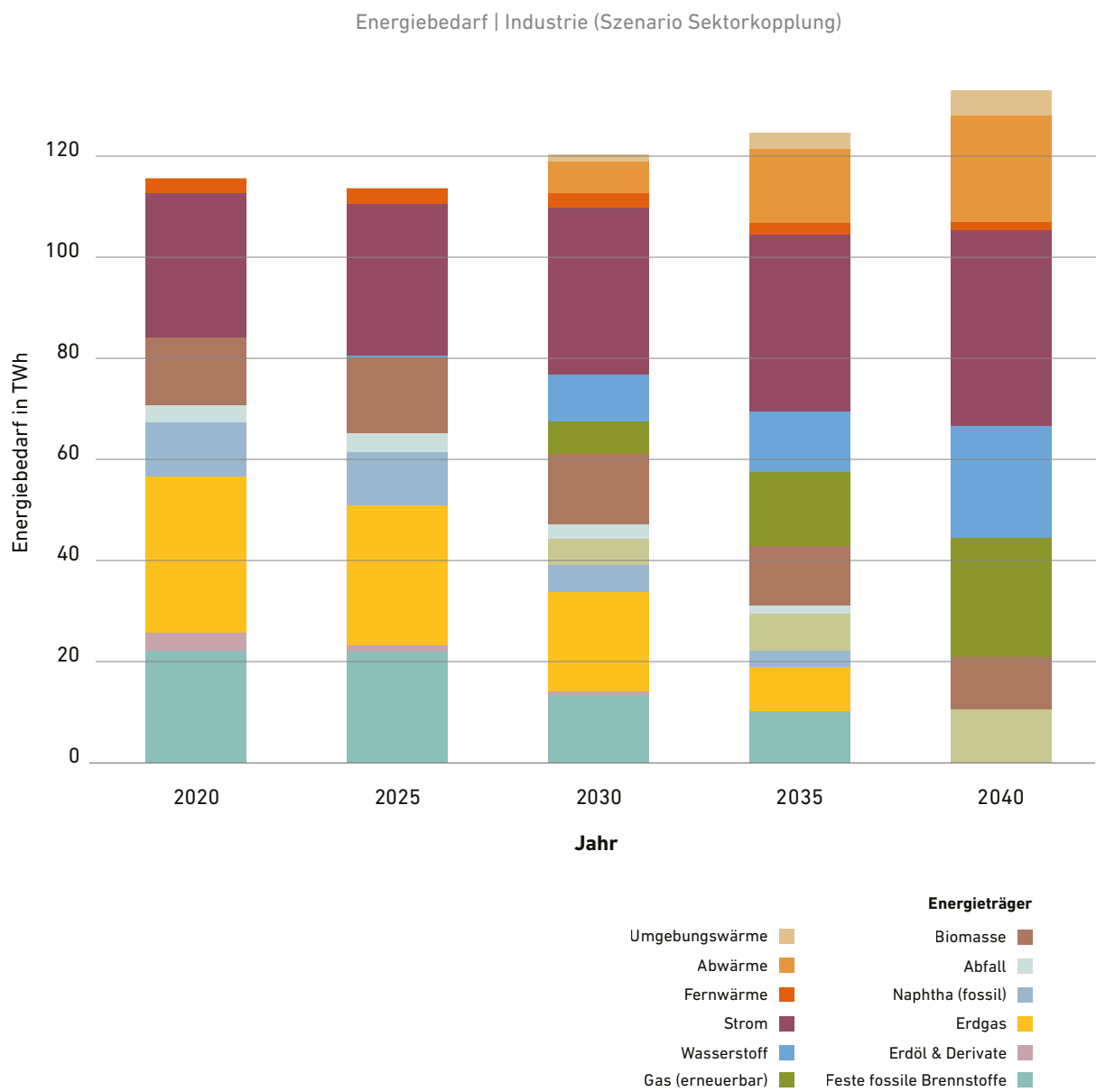


Abbildung 6
Energieträgerbedarf der Industrie
im Szenario Sektorkopplung

In *Abbildung 6* ist ersichtlich, dass der Energieträgerbedarf der Industrie gleichmäßig von 116 TWh im Jahr 2020 bis auf 133 TWh im Jahr 2040 steigt. Der Verbrauch von fossilen Energieträgern im Jahr 2020 in der Summe von insgesamt 67 TWh (davon 22 TWh Kohle, 31 TWh Erdgas) sinkt – wie auch in allen anderen Szenarien – im Jahr 2040 auf Null. Der Verbrauch von industriellen Abfällen und Ersatzbrennstoffen verschwindet ebenfalls. Der Verbrauch von fossilem Naphtha in der Höhe von 11 TWh wird durch Naphtha aus nachhaltiger Erzeugung ersetzt. Die Nutzung von fester Biomasse sinkt von 13 auf 10 TWh, der Fernwärmeverbrauch leicht von 3 auf 2 TWh.

Der Verbrauch von Strom steigt von 29 auf 39 TWh. Neu im Verbrauch des Jahres 2040 sind 23 TWh erneuerbare Gase, 22 TWh Wasserstoff, 21 TWh Abwärme und 5 TWh Umgebungswärme.

Der Vergleich des Energieträgerbedarfs der untersuchten Szenarien im Jahr 2040 untereinander und mit dem heutigen Energieträgerbedarf zeigt die Auswirkungen der verschiedenen untersuchten Ansätze zur Dekarbonisierung der Industrie. *Abbildung 7* integriert die Einzelergebnisse der in Abschnitt 3.2.1 bis 3.2.4 untersuchten Szenarien in einer Darstellung.

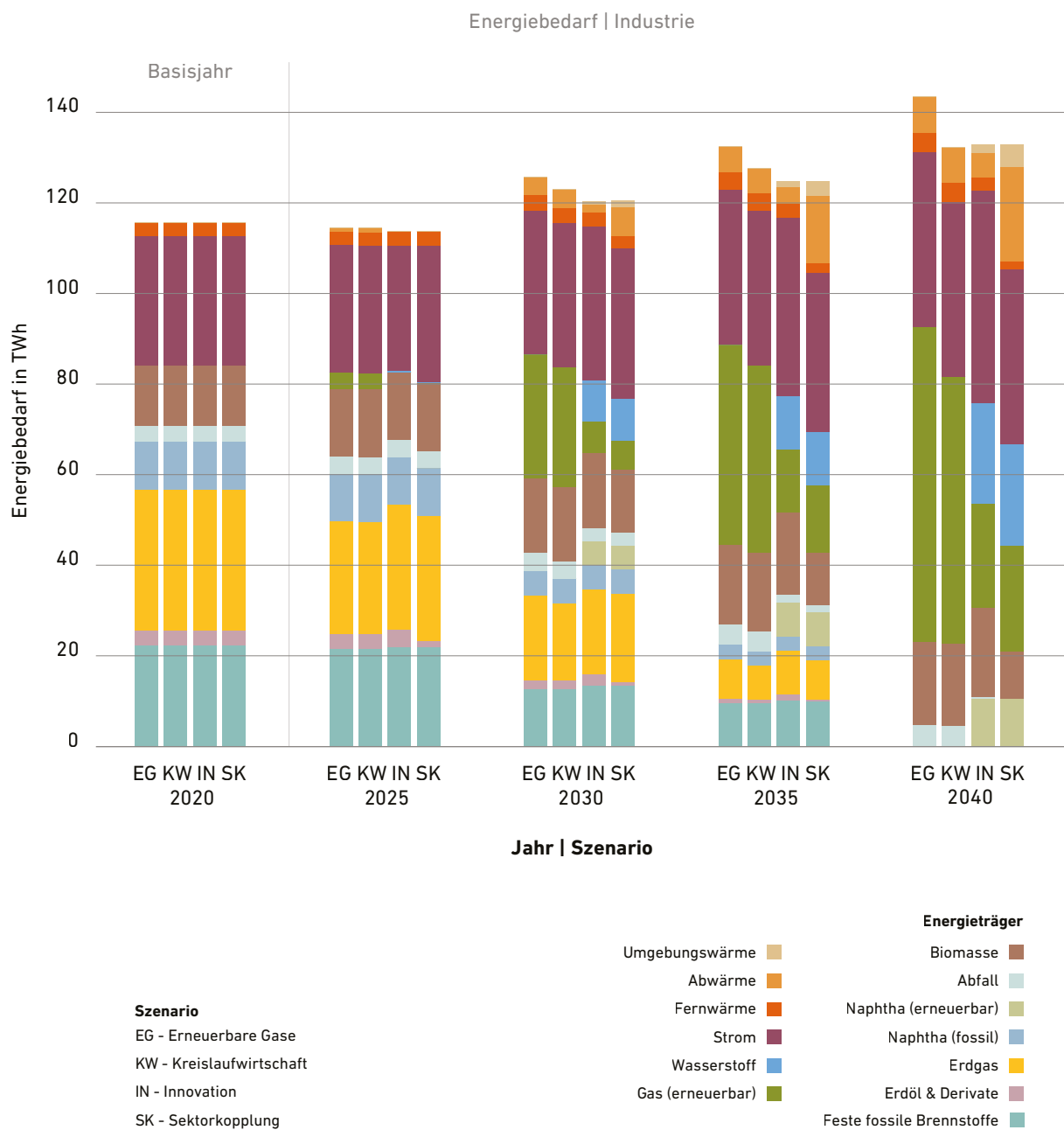


Abbildung 7
Entwicklung des Energieträgerbedarfs der untersuchten
Szenarien bis 2040 in 5-Jahres-Schritten

Um die Auswirkungen der in den einzelnen Szenarien abgebildeten Dekarbonisierungspfade zu identifizieren, wird in Abbildung 8 ein Vergleich der Ergebnisse für

das Jahr 2040 mit dem heutigen Energieträgerverbrauch dargestellt.

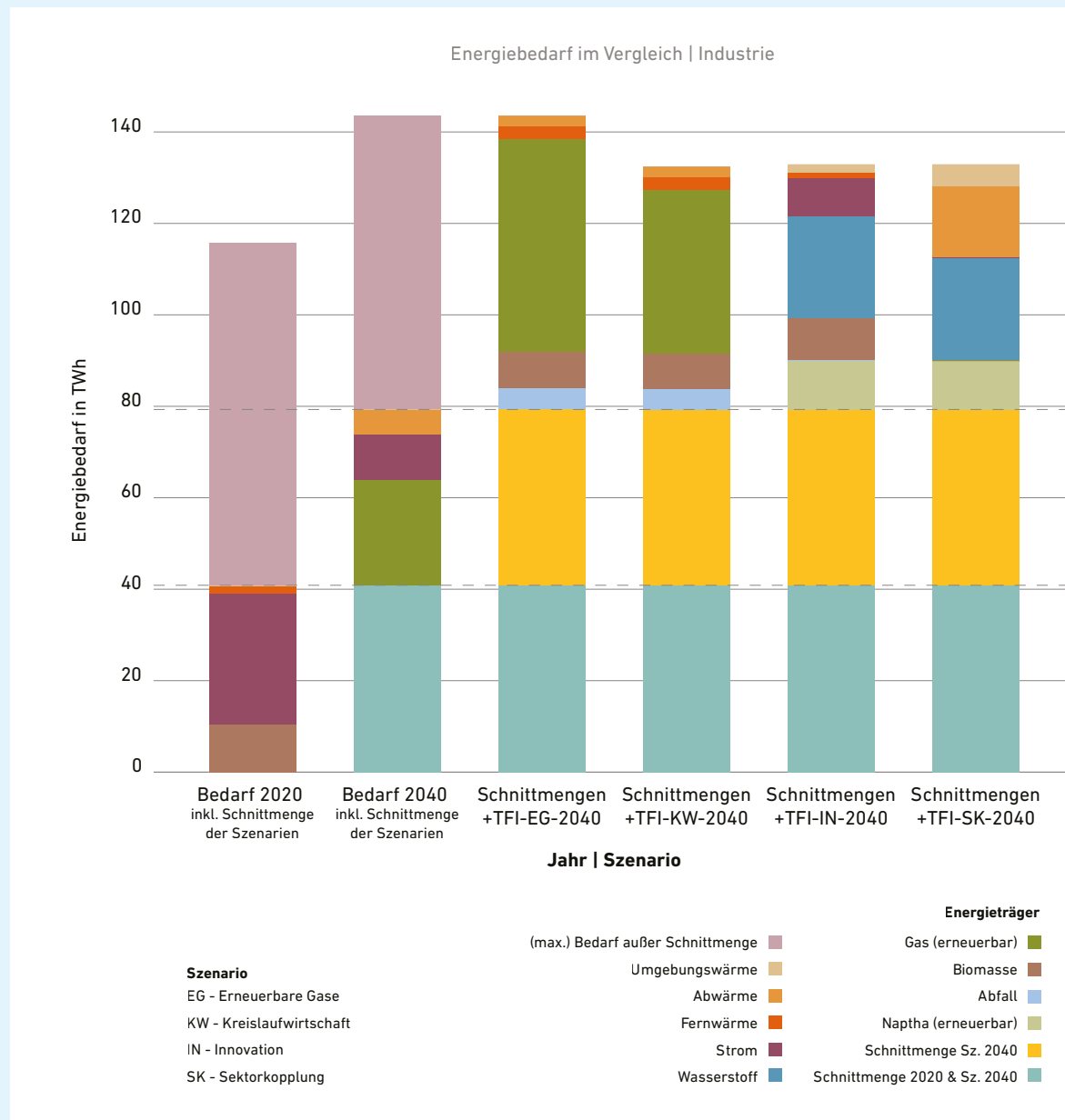


Abbildung 8

Vergleichende Darstellung des heutigen Energieträgerbedarfs sowie des Bedarfs im Jahr 2040 in allen Szenarien

In der ersten Säule von links ist der Bedarf an Energieträgern des Jahres 2020 dargestellt, der sowohl im Jahr 2020 als auch in allen Szenarien im Jahr 2040 besteht. Dieser Bedarf in der Höhe von 41 TWh besteht aus 10 TWh fester Biomasse, 29 TWh Strom sowie 2 TWh Fernwärme. Der übrige Verbrauch (weißer Balken darüber) des Jahres 2020 wird bis ins Jahr 2040 durch andere Energieträger ersetzt.

Die zweite Säule besteht aus den Energieträgern des Jahres 2040, welcher unabhängig vom Szenario besteht, also die Schnittmenge der Szenarien darstellt. Dieser Bedarf von insgesamt 38 TWh besteht aus 23 TWh erneuerbaren Gasen, 10 TWh Strom, sowie 5 TWh Abwärme.

Die erste und zweite Säule zeigen den Energieträgerbedarf in jedem Szenario, unabhängig von der Wahl des Dekarbonisierungsansatzes, und stellen damit die No-Regret-Option der Dekarbonisierung der Industrie dar. Dieser Anteil an jedenfalls bereitzustellenden Energieträgern besteht in Summe aus insgesamt 39 TWh Strom, 23 TWh Biomethan, 10 TWh fester Biomasse, 5 TWh Abwärme sowie 2 TWh Fernwärme, und bildet – je nach Szenario – 55 bis 60% des jeweiligen Gesamtverbrauchs jedes Szenarios.

Die restlichen vier Säulen in Abbildung 8 zeigen den Energieträgerbedarf der sich in jedem der untersuchten Szenarien bis ins Jahr 2040 ändert, bzw. zum Verbrauch der ersten beiden Säulen (d. h. der No-Regret-Option) hinzukommt.

Die Säulen drei und vier zeigen, dass in den Szenarien Erneuerbare Gase und Kreislaufwirtschaft zusätzlich 5 TWh industrielle Abfälle und Ersatzbrennstoffe, 8 TWh feste Biomasse, 3 TWh Fernwärme und 2 TWh Abwärme benötigt werden. Der wesentliche Unterschied

liegt im zusätzlichen Bedarf an erneuerbaren Gasen, der im Szenario Erneuerbare Gase mit 47 TWh um 11 TWh höher liegt als im Szenario Kreislaufwirtschaft.

Der spezifische Zuwachs in den Szenarien Innovation und Sektorkopplung wird in den Säulen 5 und 6 ersichtlich. In beiden Szenarien ist ein Bedarf von Wasserstoff von 22 TWh sowie von nachhaltigem Naphtha von 11 TWh enthalten. Während es im Szenario Innovation (Säule 5) zu einem zusätzlichen Bedarf von 8 TWh Strom, 9 TWh fester Biomasse sowie 2 TWh Umgebungswärme und 1 TWh Fernwärme kommt, steigt der Bedarf im Szenario Sektorkopplung um 16 TWh Abwärme und 5 TWh Umgebungswärme.

Zusammenfassend zeichnen die vier untersuchten Szenarien folgendes Bild:

- Der **Energieträgerbedarf der Industrie steigt bis 2040 um 15 bis 24 %** auf eine Höhe von 132 bis 144 TWh.
- **55 bis 60 % und damit der Großteil des gesamten Energieträgerbedarfs** ist in jedem Szenario gleich und stellt damit einen gesicherten Bedarf, oder die **No-Regret-Option** dar.
- Gleichzeitig sind 40 bis 45% der Energieträger szenariospezifisch und damit davon abhängig, in welche Technologien zur Dekarbonisierung in den Unternehmen und Branchen investiert wird und welche Energieträger durch die Energiewirtschaft bereitgestellt werden, bzw. legislativ ermöglicht werden.
- **Elektrizität und erneuerbare Gase** sind in unterschiedlichem Ausmaß, in allen Fällen aber mit **gemeinsam zwei Drittel bis drei Viertel des Verbrauchs** die wesentlichen Säulen des Energieträgerbedarfs.

- Generell sind zwei Pfade zur Dekarbonisierung zu erkennen, die entweder auf erneuerbaren Gasen oder auf einem Mix von Strom, Wasserstoff und Abwärme basieren.
- Die Verschiebung von Primär- zu Sekundärstahlproduktion führt zu einer signifikanten Reduktion des Bedarfs an erneuerbaren Gasen.
- Exergieoptimierter Energieeinsatz und Standortübergreifender Austausch von Energieträgern und die dadurch ermöglichte verstärkte Nutzung von Abwärmepotentialen reduzieren den Bedarf an Strom um 18%.

3.3 Ökonomische Implikationen

Neben der Betrachtung auf Seiten des Energiebedarfs und der verwendeten Energieträger wurden auch die wirtschaftlichen Implikationen der Transformation der Industrie auf Basis der definierten Szenarien analysiert. Dies betrifft sowohl die direkten Auswirkungen im Hinblick auf die notwendigen Investitionen in die benötigten Technologien, als auch die mittelfristigen Effekte auf die österreichische Volkswirtschaft. Diese ökonomischen Implikationen sind in den folgenden Abschnitten erläutert.

Quer über alle Szenarien zeigt sich, dass die Unterschiede beim absoluten Gesamtenergiebedarf mit 8% relativ gering sind. Der wesentliche Unterschied liegt bei den Energieträgern. Überwiegend ergeben sich Unterschiede in den Mengen, welche auf die Berechnungen in den Szenarien zurückzuführen sind, teilweise sind sie aber auch direkt auf die Annahmen für ein Szenario zurückzuführen, z. B. im Bereich des erneuerbaren Naphthas. Es folgen dadurch potenziell signifikante OPEX Unterschiede.

Unabhängig vom Szenario, ist eine stärkere Koordinierung zwischen den Branchen notwendig; die Koordination der industriellen Produktion im Szenario Sektorkopplung ermöglicht eine um 13 bis 16 TWh (und damit drei- bis vierfach) höhere Nutzung von Abwärmepotentialen. Der Gesamtenergiebedarf ist ähnlich hoch wie in den anderen Szenarien (außer Erneuerbare Gase Szenario), aber die Energie wird gemeinschaftlich effizienter eingesetzt. Die Flächen für Abwärme und Umgebungswärme in *Abbildung 8* entsprechen keinem Primärenergiebedarf. Ebenfalls klar ableitbar ist der Effekt der Kreislaufwirtschaft auf den Energieverbrauch: dieses Szenario vergleicht ein gewisses Ausmaß an Kreislaufwirtschaft mit dem Erneuerbare-Gase-Szenario und zeigt erzielbare Einsparungen von ca. 7%, v. a. durch die vermiedene Primärproduktion. Insbesondere die Szenarien Innovation und Sektorkopplung sind mit höheren Investitionen verbunden. Viele dieser Investitionen sind als die Gesamtenergieeffizienz erhöhende Maßnahmen anzusehen und gehen folglich mit geringeren Energiebedarfen einher, wodurch sich langfristig OPEX-Vorteile ergeben. Vor der Darstellung der ökonomischen Analyse ist nochmals auf die unterschiedlichen, den Szenarien hinterlegten Narrativen hinzuweisen; z. B. kann erneuerbares Gas in den Szenarien *Erneuerbares Gas* und *Kreislaufwirtschaft* auch Wasserstoff sein, während in den Szenarien *Innovation* und *Sektorkopplung* explizit Wasserstoff als solcher ausgewiesen wird. Für die Szenarien Innovation und Sektorkopplung ist (das mutmaßlich teure) erneuerbare Naphtha als Energieträger definiert, während die Szenarien Erneuerbares Gas und Kreislaufwirtschaft auf Biomethan zurückgreifen.

3.3.1 Investitionsbedarfe für die Transformation

Zur Einordnung der notwendigen Investitionen für die Transformation der Industrie wurden die in den Szenarien definierten Technologien entsprechend des Umfangs ihres Einsatzes mit Kosten hinterlegt. Insgesamt wurden hier folgende Technologien berücksichtigt:

- Sieben unterschiedliche Technologien zur Wärmebereitstellung für die Bereiche Raumwärme, Prozesswärme <200 °C, und Prozesswärme >200 °C (zusätzlich zu den Bestandstechnologien):
 - Wärmepumpe mit Umgebungswärme
 - Biomassekessel für Niedertemperaturwärme
 - Fernwärme
 - Wärmepumpe mit Abwärme
 - Direkte Abwärmenutzung
 - Biomassekessel für Hochtemperaturwärme
 - Gaskessel (erneuerbares Gas)
- Neun Technologien zur Prozessumstellung für die Stahl- und Zementproduktion, sowie die chemische Industrie:
 - Direktreduktion mit Methan (Primärstahlerzeugung)
 - Direktreduktion mit Wasserstoff (Primärstahlerzeugung)
 - Elektrolichtbogenofen (Sekundärstahlerzeugung)
 - Carbon Capture mit Aminwäsche (Zementherstellung)

- Carbon Capture mit Oxyfuel-Verfahren (Zementherstellung)
- Methanolherstellung aus Wasserstoff (chemische Industrie)
- Methanolherstellung aus Methan für Olefinproduktion (chemische Industrie)
- Olefinproduktion aus Methanol (chemische Industrie)
- Ammoniakproduktion aus Wasserstoff (chemische Industrie)

Die für die Berechnungen angenommenen spezifischen Investitionskosten, die als Produkt mit der Anlagengröße die direkten Anschaffungskosten (CAPEX) ergeben, sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Technologie	Spezifische Investitionskosten für den Industriebetrieb
Wärmepumpe mit Umgebungswärme als Wärmequelle, üblicherweise zur Bereitstellung von Raumwärme [1]	420 €/kW _{th}
Biomassekessel für Niedertemperaturwärme, üblicherweise zur Bereitstellung von Raumwärme [1]	360 €/kW _{th}
Fernwärme, üblicherweise zur Bereitstellung von Raumwärme [6]	30 €/kW _{th}
Wärmepumpe mit Abwärme als Wärmequelle, zur Bereitstellung von Raumwärme oder Prozesswärme [1]	600 €/kW _{th}
Direkte Abwärmenutzung für Raum- bzw. Prozesswärme	50 €/kW _{th}
Biomassekessel für Hochtemperaturwärme (Prozesswärme) [1]	360 €/kW _{th}
Gaskessel (erneuerbares Gas) üblicherweise zur Bereitstellung von Prozesswärme [1]	30 €/kW _{th}
Direktreduktion mit Methan bzw. H ₂ (Primärstahl-erzeugung) [2,5]	270 €/t _{Rohstahl}
Elektrolichtbogenofen (Sekundärstahlerzeugung) [2,5]	240 €/t _{Rohstahl}
Carbon Capture mit Aminwäsche (Zementherstellung) [3]	210 €/t _{CO₂}
Carbon Capture mit Oxyfuel-Verfahren (Zementherstellung) [3]	160 €/t _{CO₂}
Ammoniak- und Methanolherstellung aus H ₂ (chemische Industrie) [2]	60 €/t _{MeOH}
Olefinherstellung mittels Methanol-to-Olefines Route (chemische Industrie) [4]	860 €/t _{Olefine}
Olefinproduktion aus erneuerbarem Naphtha (chemische Industrie)	– Annahme: keine Umstellung nötig

Tabelle 3

Zukunftstechnologien und ihre spezifischen Installationskosten. Gerundete direkte CAPEX-Kosten für 2025, wobei in den Modellen teilweise sinkende Kosten für die Folgejahre hinterlegt sind.

- [1] DEA (2022), "Technology Data for Industrial Process Heat", ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-industrial-process-heat
- [2] IEA (2019), "The Future of Hydrogen – Assumptions Annex", www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen
- [3] DEA (2021), "Technology Data for Carbon Capture, Transport and Storage", ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-carbon-capture-transport-and-storage
- [4] Schneider, C. et al. (2019): Klimaneutrale Industrie: Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Analyse im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin, November 2019.
- [5] BCG (2013), "Steel's contribution to a Low Carbon Europe 2050. Technical and Economic Analysis of the sector's CO₂ abatement potential"
- [6] EC (2017), "Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU"

Zusätzlich zu den direkten Anschaffungskosten (CAPEX) für diese Technologien wurden indirekte Kosten für die Errichtung und Installation (Engineering, Hoch- und Tiefbauarbeiten, Rohrleitungen, etc.) über Zuschlagsfaktoren berücksichtigt.

Basierend auf den in den Szenarien ermittelten Energiebedarfen und daraus resultierenden Technologiekapazitäten wurden, je nach Szenario, kumulierte Investitionsbedarfe von etwa 17,4 – 24,4 Mrd. € bis 2040 ermittelt (vgl. Abbildung 9). Der geringste Investitionsbedarf wird dabei für das Szenario Kreislaufwirtschaft gesehen, durch den reduzierten Bedarf an neuen Anlagen für Primärproduktion bei gleichzeitiger Annahme eines

vernachlässigbaren Umrüstbedarfs durch die Substitution heutiger fossiler Energieträger durch erneuerbare Gase. Allerdings bleiben dabei notwendige zusätzliche Anstrengung auf Seiten der Abfallwirtschaft (inkl. Aufbereitung, aber auch Bewusstseinsbildung, etc.) unberücksichtigt. Die höchsten Investitionsbedarfe werden bei einer weitgehenden Umrüstung der industriellen Wärmeversorgung zur Reduktion des Primärenergiebedarfs und Erhöhung der Exergie- und Energieeffizienz, wie in den Szenarien Innovation und Sektorkopplung erwartet. Wie in Abbildung 9 ersichtlich, entfallen dabei nur rund ein Drittel der einzusetzenden Investitionen auf die Technologiekomponenten an sich, der Rest auf indirekte Investitionen.

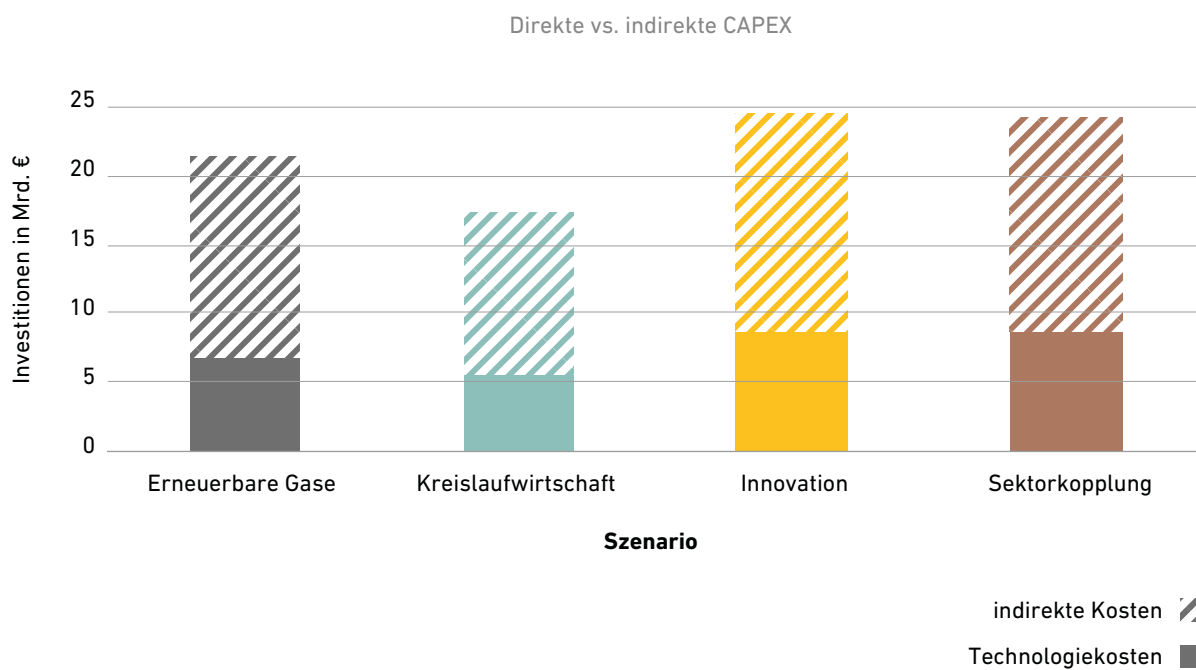


Abbildung 9

Direkte und indirekte Investitionsbedarfe für die betrachteten Szenarien kumuliert bis 2040

Den Vergleich der notwendigen Investitionsbedarfe über die einzelnen Branchen zeigt **Abbildung 10**. Der mit 10 bis 14 Mrd. € hohe Investitionsbedarf in der Stahlerzeugung ist hier bemerkenswert, der sich weitgehend Szenario-unabhängig durch den Ersatz der bestehenden Hochöfen zu Direktreduktionsanlagen, betrieben mittels Wasserstoff oder Biomethan, und Elektrolichtbogenöfen ergibt. Investitionen von bis zu rund 4 Mrd. € sind auch für die erforderliche CO₂-Abtrennung bei der Zementproduktion und für die

Prozessumstellungen in der chemischen Industrie zu erwarten. Ähnlich hoch fallen, je nach Transformationspfad, die Kosten für die Transformation der Wärmebereitstellung in der Branche Papier & Druck aus. In den weiteren Branchen ist der Investitionsbedarf stark von den eingesetzten Technologien zur Raum- und Prozesswärmeversorgung bzw. der Integration in bestehende Prozesse (sowohl der Elektrifizierung als auch der Wärmerückgewinnung) und damit dem jeweiligen Transformationspfad abhängig.

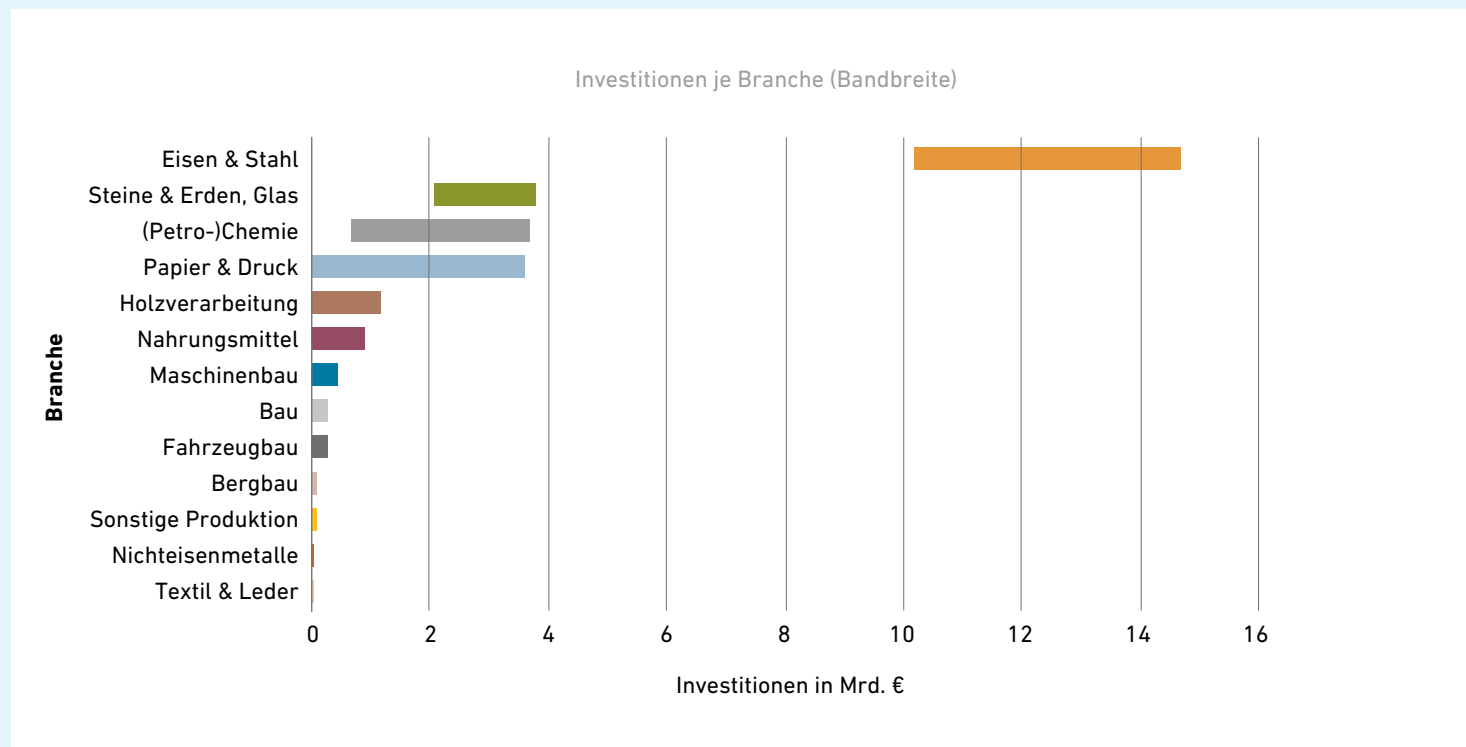


Abbildung 10
Bandbreite der Investitionsbedarfe
in den einzelnen Branchen

3.3.2 Energieträgerkosten und Importbedarfe

Zusätzlich zu den Installationskosten der Anlagen stellt der dadurch festgelegte Energieträgerbedarf für deren Betrieb einen wesentlichen Kostenfaktor der Transformation dar. Für eine entsprechende übergreifende Einordnung der resultierenden Gesamtkosten (ohne Wartungs-, Lizenz oder sonstigen Nebenkosten) wurden die in dem Berechnungsmodell berücksichtigten Energieträger mit entsprechenden Kosten zur Aufbringung bzw. Bereitstellung hinterlegt. Für die drei Energieträger Wasserstoff, Biomethan und erneuerbares Naphtha wurden aufgrund

des stark zunehmenden Bedarfs und deren aktuell vergleichsweise geringen Marktverfügbarkeit sinkende Preispfade hinterlegt, um entsprechend zu erwartende Lernkurven und Skaleneffekte abzubilden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Preisentwicklungen für Strom, Wasserstoff, Biomethan und Naphtha werden zusätzlich in Sensitivitätsanalysen untersucht, um die Robustheit der Aussagen zu stärken (vgl. Abschnitt 3.3.3.3). Die verwendeten Kosten für alle 13 Energieträger sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Energieträger	Energieträgerkosten (in EUR/MWh)			
	2025	2030	2035	2040
Feste fossile Brennstoffe	20	20	20	20
Erdöl & Derivate	60	60	60	60
Erdgas	40	40	40	40
Naphtha (fossil)	60	60	60	60
Naphtha (erneuerbar)	450	310	240	210
Abfall	15	15	15	15
Biomasse	20	20	20	20
Biomethan	90	85	80	75
Wasserstoff	200	140	110	100
Elektrizität	85	85	85	85
Fernwärme	75	75	75	75
Abwärme	15	15	15	15
Umgebungswärme	–	–	–	–

Tabelle 4

Angenommene Kosten der verwendeten Energieträger im Zeitverlauf. Siehe die nachfolgenden Abbildungen der Sensitivitätsanalysen für potenzielle Variationen.

Zusätzlich zu den Kosten wurde das Potenzial der inländischen Aufbringung der benötigten Energieträger bzw. deren Importbedarf abgeschätzt. Die verwendeten inländischen Potenziale beziehen sich dabei auf verfügbare Studien und nationale Zielsetzungen für die erneuerbaren Energieträger bzw. die heutige Aufbringung. Die angesetzten Maximalpotenziale sind in Tabelle 5

dargestellt. Ausgehend von einer isolierten Betrachtung des Industriesektors⁶ ergeben sich damit aus den angeführten Potenzialen und den in den jeweiligen Szenarien ermittelten Energieträgerbedarfen entsprechende Importbedarfe. Die entsprechenden Bandbreiten für die Importanteile sind in Tabelle 5 angeführt.

Energieträger	Nationales Potenzial (in TWh)				Importanteile (in %)			
	2025	2030	2035	2040	2025	2030	2035	2040
Feste fossile Brennstoffe	–	–	–	–	100	100	100	100
Erdöl & Derivate ^a	7	7	7	7	0	0	0	–
Erdgas ^a	7	7	7	7	72–75	59–64	6–27	–
Naphtha (foss)	–	–	–	–	0	0	0	–
Naphtha (ernb.)	–	–	–	–	–	100	100	100
Abfall	–	–	–	–	–	–	–	–
Biomasse ^b	50	65	80	90	0	0	0	0
Biomethan ^c	2	7,5	14	20	0	0–35	0–27	0–48
Wasserstoff ^d	1	3	5	10	0	0–68	0–58	0–55
Erneuerbares Gas ^e	–	–	–	–	0–18	0–81	0–80	16–68
Elektrizität ^f	78	88	105	132	0	0	0	0
Fernwärme	–	–	–	–	–	–	–	–
Abwärme	–	–	–	–	–	–	–	–
Umgebungswärme	–	–	–	–	–	–	–	–

Tabelle 5
Nationale Potenziale der verwendeten
Energieträger im Zeitverlauf

- a Inländische Förderung basierend auf (BME, 2023)
- b Basierend auf Gesamtpotenzial für Bioenergie lt. (Biomasse-Verband, 2021) abzgl. Potenziale für Biomethan
- c Basierend auf (Baumann *et al.*, 2021) und (BMK, 2023a)
- d Basierend auf (BMK, 2022) und (BMK, 2023b)
- e Der Bedarf für erneuerbares Gas wird für die Bewertung der Importe aufgeteilt auf Biomethan (soweit Restpotenzial im Inland vorhanden) und Wasserstoff (für den Restbedarf).
- f Basierend auf (Bundesrecht, 2023) und (Energie, 2022)

⁶ Es wurde angenommen, dass in erster Linie die errechneten Bedarfe der Industrie gedeckt werden. Die Energiebedarfe der anderen Sektoren und damit verbundene Importbedarfe bzw. Anteile werden hier nicht berücksichtigt.

Deutlich wird, dass aus allen Szenarien ein hoher Importbedarf an erneuerbaren Kohlenwasserstoffen und Wasserstoff resultiert. Während dies in den Szenarien Erneuerbare Gase und Kreislaufwirtschaft in erster Linie große Mengen an Biomethan und nicht-spezifischem erneuerbarem Gas betrifft, sind es in den beiden anderen Szenarien vor allem Wasserstoff und erneuerbares Naphtha. Im Zuge der Transformation sind demnach hier entsprechende Importrouten zu identifizieren und aufzubauen.

3.3.3 Volkswirtschaftliche Analyse und Auswirkungen der Transformation

Zur Bestimmung der gesamtwirtschaftlichen Wirkungen der Transformation der Industrie wurden die makroökonomischen Auswirkungen der Szenarien im Simulationsmodell MOVE2 (Tichler *et al.*, 2014) analysiert. Konkret wird der makroökonomische Beitrag anhand von zusätzlichem Bruttoinlandsprodukt, Konsum (der privaten Haushalte), Investitionen (der Unternehmen), Nettoexporten (Exporte – Importe) und zusätzlichen Beschäftigten durch die Transformation der österreichischen Industrie quantifiziert. Im Gegensatz zur Analyse der unterschiedlichen Industriesektoren steht im Folgenden nicht der einzelne Sektor und deren Mikroebene (Investitionen, Branchen) im Mittelpunkt, sondern die gesamte Volkswirtschaft Österreichs. **Die volkswirtschaftlichen Effekte der einzelnen Szenarien werden dabei im Vergleich zu einem „Business-as-usual“-Szenario ermittelt**, welches die gleiche Wirtschaftsentwicklung zugrunde legt, allerdings ohne Technologie und Energieträgerwechsel in der Industrie. **Demnach sind die Ergebnisse als zusätzliche Effekte, welche ohne die Transformation nicht eintreten würden, zu verstehen.** Diese Effekte beinhalten direkte Wertschöpfungs- bzw. Beschäftigungseffekte, die durch die Investitionen erwirtschaftet werden, indirekte Effekte aus Zulieferbeziehungen bzw. Vorleistungsverflechtungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette und induzierte Effekte, die zusätzliche Konsum- und Investitionsausgaben durch die generierten Arbeitsplätze und zusätzliche Einkommen darstellen.

3.3.3.1 Annahmen und Simulationsdesign

Der volkswirtschaftlichen Simulation liegen einige Annahmen und Rahmenbedingungen zugrunde. Die wesentlichen Parameter sind nachfolgend dargestellt.

a. Simulationshorizont

Analog zu den Betrachtungen zum Energiebedarf wird die volkswirtschaftliche Bedeutung innerhalb des Zeitraums 2025 bis 2040 dargestellt. Längerfristige Effekte über 2040 hinaus werden damit nicht abgebildet.

b. Geografischer und systemischer Bezug

In den Simulationen wird die volkswirtschaftliche Relevanz der Transformation der Industrie verschiedener Szenarien für Österreich analysiert.

c. Investitionswirksamkeit

Die notwendigen Investitionen in Anlagen- und Technologiekomponenten für die Transformation seitens der Industrie werden prioritär in den Sektoren Sachgütererzeugung, Bau und Realitäten- und Unternehmensdienstleistungen wirksam.

d. Wertschöpfungsanteile

Bei den Investitionen in Anlagen- und Technologiekomponenten wird differenziert zwischen Anlagen für Prozesse und Anlagen für die Wärmeerzeugung. Für Anlagen, die für die Umstellung von Produktionsprozessen herangezogen werden, wird ein approximativer heimischer Wertschöpfungsanteil von 50% angenommen, für Komponenten für die Wärmeerzeugung ein heimischer Wertschöpfungsanteil von 80%. Das heißt, es entstehen keine nachgelagerten positiven volkswirtschaftlichen Effekte für Österreich durch 50% der prozessbedingten Investitionen bzw. für 20% der wärmebedingten Investitionen in Anlagen und Maschinen. Die zusätzlichen notwendigen Investitionen durch Baumaßnahmen und Dienstleistungen sowie in weiteren Anlagenkomponenten erhöht den heimischen Wertschöpfungsanteil an den gesamten Investitionen (CAPEX) auf über 85% generierter Wertschöpfung im Inland. Die Investitionen

orientieren sich an der zeitlichen Auflösung der Szenarien (2025, 2030, 2035, 2040) und werden zwischen diesen Zeitpunkten linear verteilt.

e. Energieträger und Energiepreise

Die Bedarfe an Energieträgern und entsprechenden Importanteilen, wie in Tabelle 5 dargestellt, orientieren sich an der zeitlichen Auflösung der Szenarien (2025, 2030, 2035, 2040) und werden dazwischen linear interpoliert. Sowohl für inländische Aufbringung als auch für Importe werden – außer für Biomethan – die gleichen Preise lt. Tabelle 4 angenommen. Bei Biomethan gilt für inländische Aufbringung der jeweilige Preis lt. Tabelle 4, bei importiertem Biomethan wird der Preis für Wasserstoff herangezogen⁷. Nicht näher spezifizierter Bedarf an erneuerbaren Gasen wird, soweit möglich aus inländischen Potenzialen aufgebracht, darüber hinaus ebenfalls zum Preis von Wasserstoff importiert. Die Auswirkung der Energiepreise wird zusätzlich in Sensitivitätsanalysen betrachtet.

f. CO₂-Bepreisung

Für die (verbleibenden) Emissionen aus fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl, Erdgas) wird eine zunehmende Bepreisung von 100 €/t (2025) auf 400 €/t (2040) angenommen. Damit wird von einem sehr progressiven Pfad zur Erreichung einer klimaneutralen Industrie bis 2040 ausgegangen. Für eine nähere Betrachtung der Auswirkungen des CO₂-Preises auf das volkswirtschaftliche Ergebnis wurde ein zusätzlicher Preispfad auf 200 €/t lt. aktuellem WAM-Szenario des Umweltbundesamtes (BMK, 2023b) für eine Sensitivitätsanalyse herangezogen.

3.3.3.2 Ergebnisse der volkswirtschaftlichen Analyse

Die nachfolgend dargestellten Simulationsergebnisse für Österreich zeigen, dass durch die Transformation der österreichischen Industrie ein positiver volkswirtschaftlicher Mehrwert in Form eines Wachstums des BIP sowie einer zusätzlichen Beschäftigung geschaffen werden kann. Grundlage dieser Entwicklungen sind anfangs (hier: 2025) Investitionen in Anlagen für neue Prozesse und Wärmenutzung, welche zu Impulsen in weiteren Sektoren führen. Von diesen getätigten Investitionen werden Folgerunden- bzw. Multiplikatoreffekte induziert, da jedes Unternehmen für die Herstellung seiner Produkte bzw. Dienstleistungen Inputs bzw. Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe aus anderen Wirtschaftssektoren benötigt. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die verwendeten Materialien bzw. ebenfalls die Vorleistungen auch teilweise aus dem Ausland bezogen werden, sodass Wertschöpfungsabflüsse entstehen. Durch das investitionsbedingte Wirtschaftswachstum und daraus resultierende Beschäftigungseffekte ergibt sich ein höheres Einkommen, welches wiederum zu Konsum- und Investitionsausgaben führt. Abbildung 11 illustriert das zusätzliche Wachstum des Bruttoinlandsprodukts (BIP) in den verschiedenen Szenarien zwischen den Jahren 2025 und 2040.

⁷ Hier gilt die Annahme, dass für Biomethan international die natürlichen Potenziale stark eingeschränkt sind. Gleichzeitig ist bei synthetischer Herstellung von Methan aus Wasserstoff mindestens ein gleich hoher Preis zu erwarten.

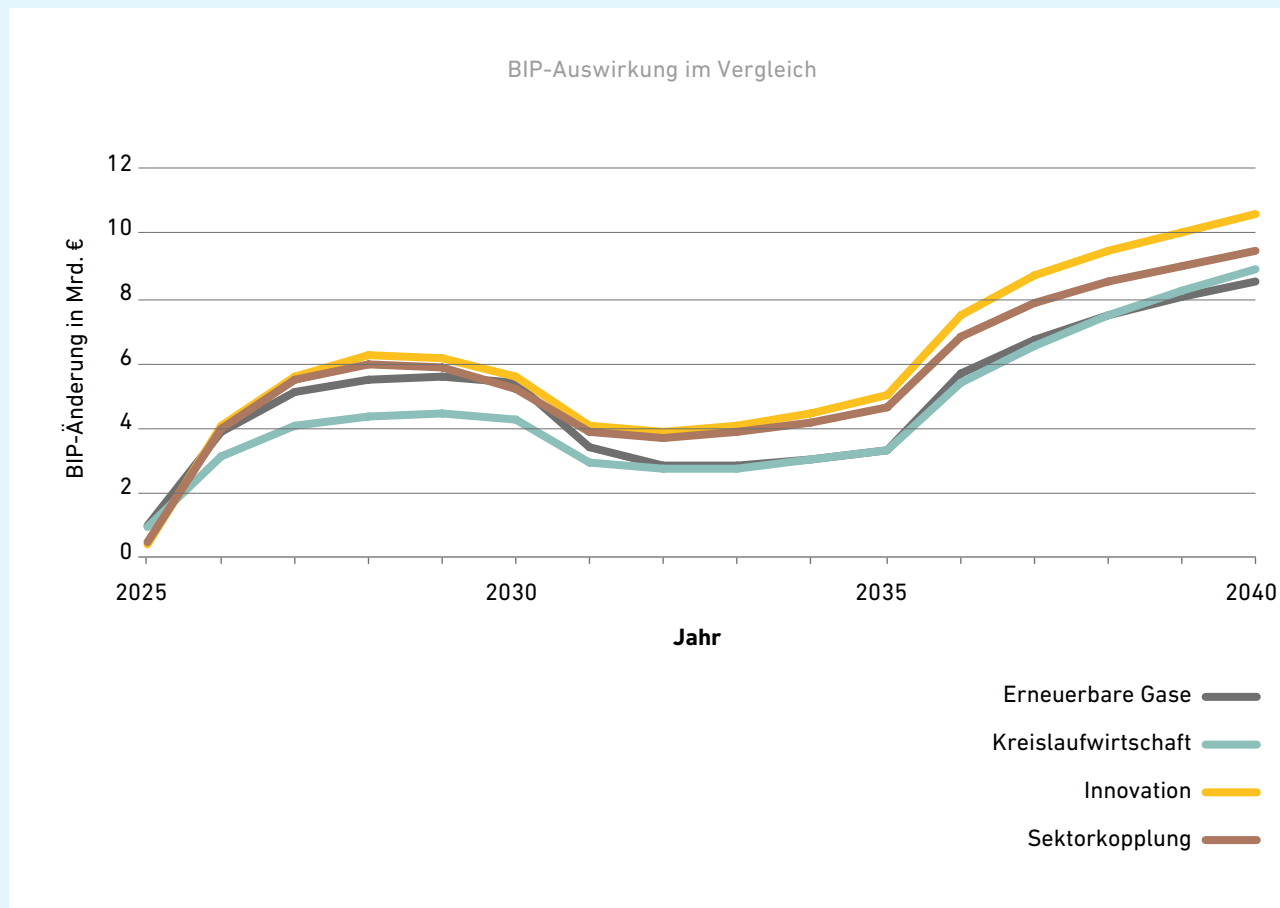


Abbildung 11
Veränderung des Bruttoinlandsprodukts gegenüber dem „business-as-usual“ durch die Transformation

Die Ergebnisse zeigen einen im Durchschnitt höheren Effekt auf das Bruttoinlandsprodukt in den Szenarien, die eine tiefgreifendere Transformation der Wärmebereitstellung vorsehen (*Innovation* und *Sektorkopplung*), im Vergleich zu jenen Szenarien, die primär auf einen Wechsel der Energieträger bei Weiternutzung bestehender Feuerungsanlagen setzen (*Erneuerbare Gase* und *Kreislaufwirtschaft*). Dies ist vor allem auf den höheren Investitionsbedarf und die daraus resultierenden induzierten Folgeeffekte zurückzuführen.

Allerdings weisen alle Szenarien einen hohen Importbedarf für erneuerbare chemische Energieträger (Wasserstoff, Biomethan, Naphtha) auf, woraus langfristig stark negative Nettoexporte für die österreichische Volkswirtschaft resultieren (siehe Abbildung 12, unten). Hier zeigt sich der positive Effekt einer forcierten Sekundärproduktion, wie im Szenario *Kreislaufwirtschaft*, besonders deutlich. Im Gegenzug dämpfen die Importe besonders hochpreisiger Energieträger, wie erneuerbares Naphtha, die positiven Effekte aus den Investitionen deutlich.

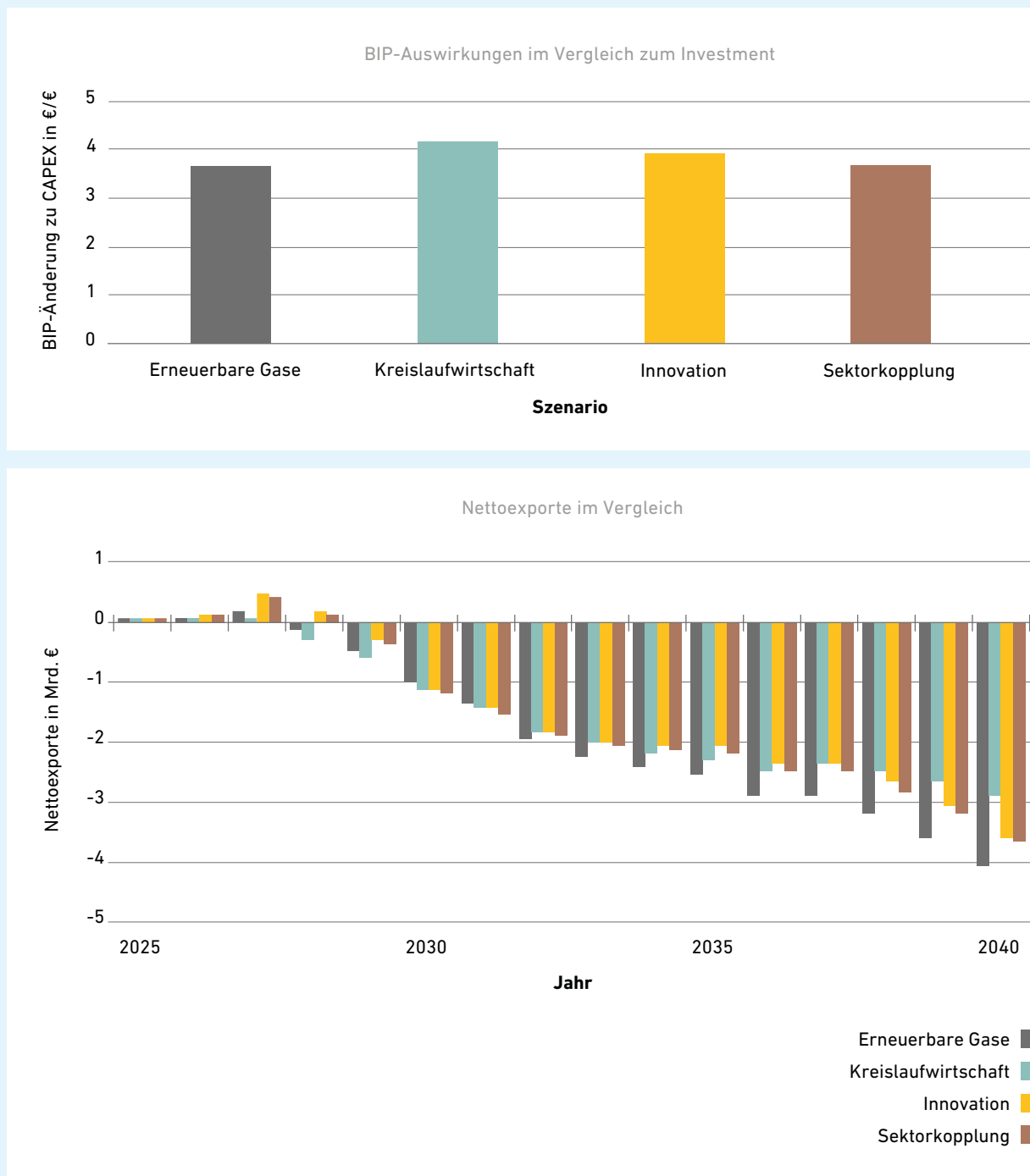


Abbildung 12

Kumulierter BIP-Effekt in Relation zum Investitionsbedarf (oben); jährliche Nettoexporte in den betrachteten Szenarien im Vergleich zum Business as Usual Szenario unten).

Zu beachten ist, dass die Nettoexporte für die teils hochpreisigen erneuerbaren Energieträger den konstant (niedrigpreisigen) fossilen Energieträgern im Business as Usual Szenario gegenübergestellt werden. Für die Abschätzung des Effekts eines höheren Preises der fossilen Energieträger siehe in Analogie die Sensitivitätsanalyse zur CO₂-Bepreisung. Eine Steigerung des Preises der fossilen Energieträger senkt die Nettoexporte deutlich.

Abbildung 12 stellt den kumulierten Effekt auf das Bruttoinlandsprodukt in Bezug zum ermittelten Investitionsbedarf je Szenario dar. Auch hier spiegelt sich der positive Effekt eines reduzierten Primärenergiebedarfs, insbesondere bezogen auf die zu importierenden Energieträger, bei gleichzeitig geringeren Investitionen in neue Prozessrouten wider. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht weniger relevant erscheinen hier die Einsparungen an Primärenergie (Biomasse, Strom) im Szenario *Sektor-kopplung*, da hier, bezogen auf die Industrie, vor allem inländisch verfügbare Energieträger ohne Importbedarf betroffen sind. Allerdings ist nochmals anzumerken, dass hier eine isolierte Betrachtung des industriellen Bedarfs erfolgt ist, womit potenzielle Importbedarfe der anderen Sektoren unberücksichtigt bleiben. Unter diesem Aspekt ist eine Reduktion des Bedarfs an Primärenergieträgern auch seitens des Industriesektors in jedem Fall anzustreben um diese Potenziale für andere Verwendung (inkl. Exporte) nutzbar zu machen und Importabhängigkeiten zu minimieren.

Darüber hinaus sei hier nochmals erwähnt, dass die betrachteten Szenarien Extremfälle unterschiedlicher Technologiepfade darstellen und keineswegs ein volkswirtschaftliches Optimum. Unter diesem Gesichtspunkt zeigt *Abbildung 13* die Auswirkung der gewählten Prozessrouten für die Chemiebranche, und damit die zu importierenden Energieträger, auf das volkswirtschaftliche Ergebnis in Bezug auf das BIP. Wird im Szenario *Innovation Biomethan* statt erneuerbarem Naphtha für die Olefineproduktion eingesetzt, wie es auch für die Szenarien *Erneuerbare Gase* und *Kreislaufwirtschaft* angenommen wird, führt dies zu einem deutlichen Anstieg des BIP gegenüber dem ursprünglichen Ansatz (siehe „IN Methan“ in *Abbildung 13*). Dies erfolgt einerseits durch die reduzierten Importkosten, andererseits aber auch durch höhere Investitionen für die Prozessumstellung. Entsprechend treten die gegenteiligen Effekte bei Anwendung der Naphtha-Route auf des Szenario *Erneuerbare Gase* auf (siehe „EG Naphtha“ in *Abbildung 13*).

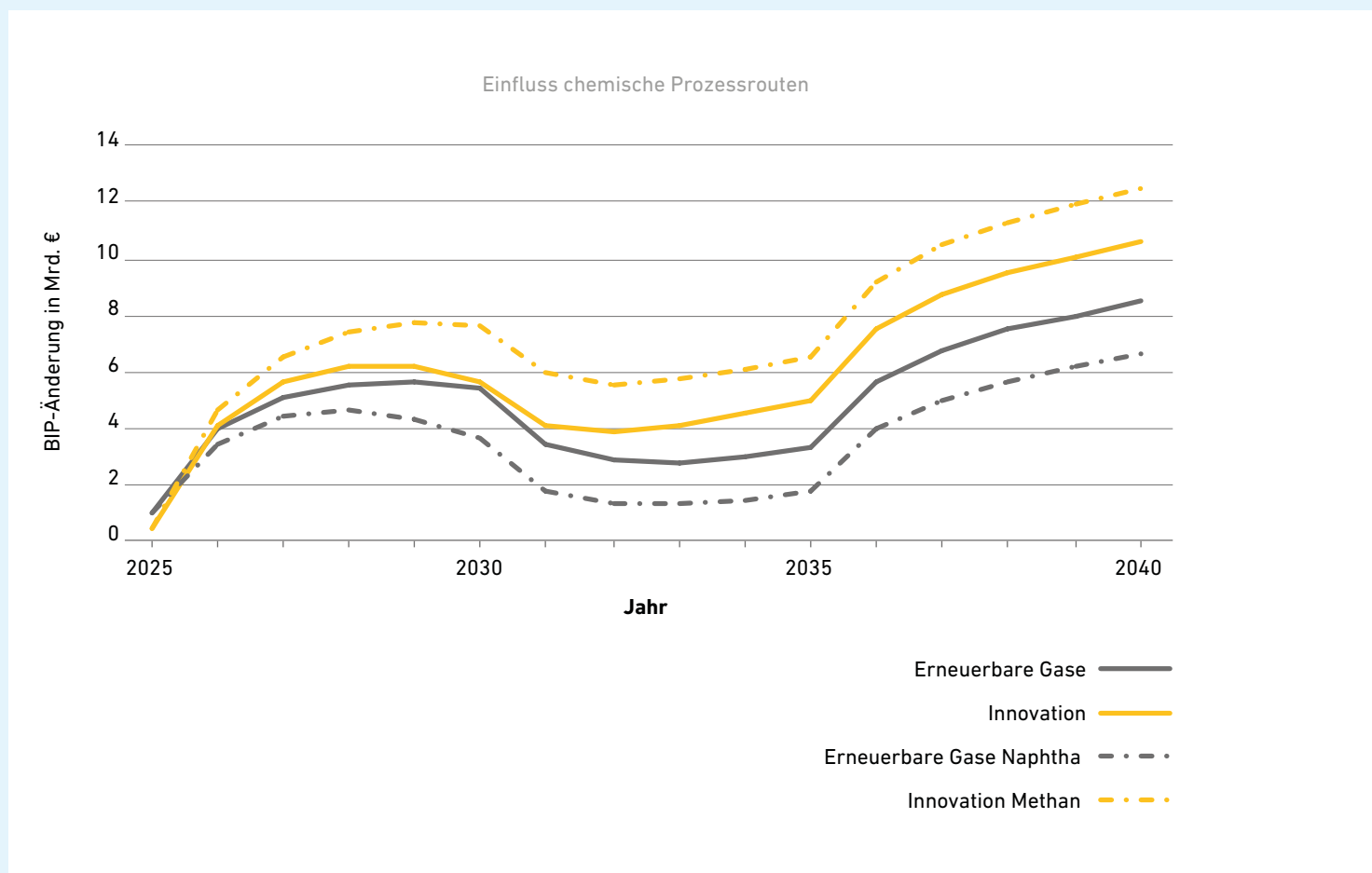


Abbildung 13

Auswirkung eines Austauschs der gewählten Prozessrouten in der Branche Chemie (strichpunktierte Linie) auf das volkswirtschaftliche Ergebnis gegenüber den Basisszenarien (durchgezogene Linien)

3.3.3.3 Sensitivitäten der volkswirtschaftlichen Effekte

Um die Auswirkungen der getroffenen Annahmen (insbesondere Energiepreise) bzw. deren Abweichungen vom angenommenen Wert einschätzen zu können, wurden entsprechende Sensitivitätsanalysen durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden erläutert und interpretiert werden. Diese wurden jeweils für die Szenarien *Innovation* und *Erneuerbare Gase* als repräsentative Szenarien durchgeführt.

Durch die in allen Szenarien voranschreitende Elektrifizierung (vgl. Abbildung 8) ist der Preis für erneuerbaren Strom von essenzieller Bedeutung für die wirtschaftliche Betrachtung. Allerdings zeigt eine Variation des angesetzten Strompreises (siehe Tabelle 4) um $\pm 25\%$, wie in Abbildung 14 dargestellt, dass sich daraus nur geringfügige Abweichungen im Ergebnis zeigen, die aber erwartungsgemäß im Szenario *Innovation* mit höherem

Anteil von Strom am Energieträgermix wesentlich stärker ausgeprägt sind als im von erneuerbaren Gasen dominierten Entwicklungspfad. Außerdem führt, durch den potenziell nicht vorhandenen Importbedarf an erneuerbarem Strom (durch die isolierte Betrachtung der Energieaufbringung für den Industriesektor),

eine Erhöhung des Strompreises zu einer Steigerung der inländischen Wertschöpfung (und umgekehrt). Dementsprechend ist auch hier eine möglichst hohe Deckung des zukünftigen Strombedarfs aus inländischer Produktion zu präferieren.

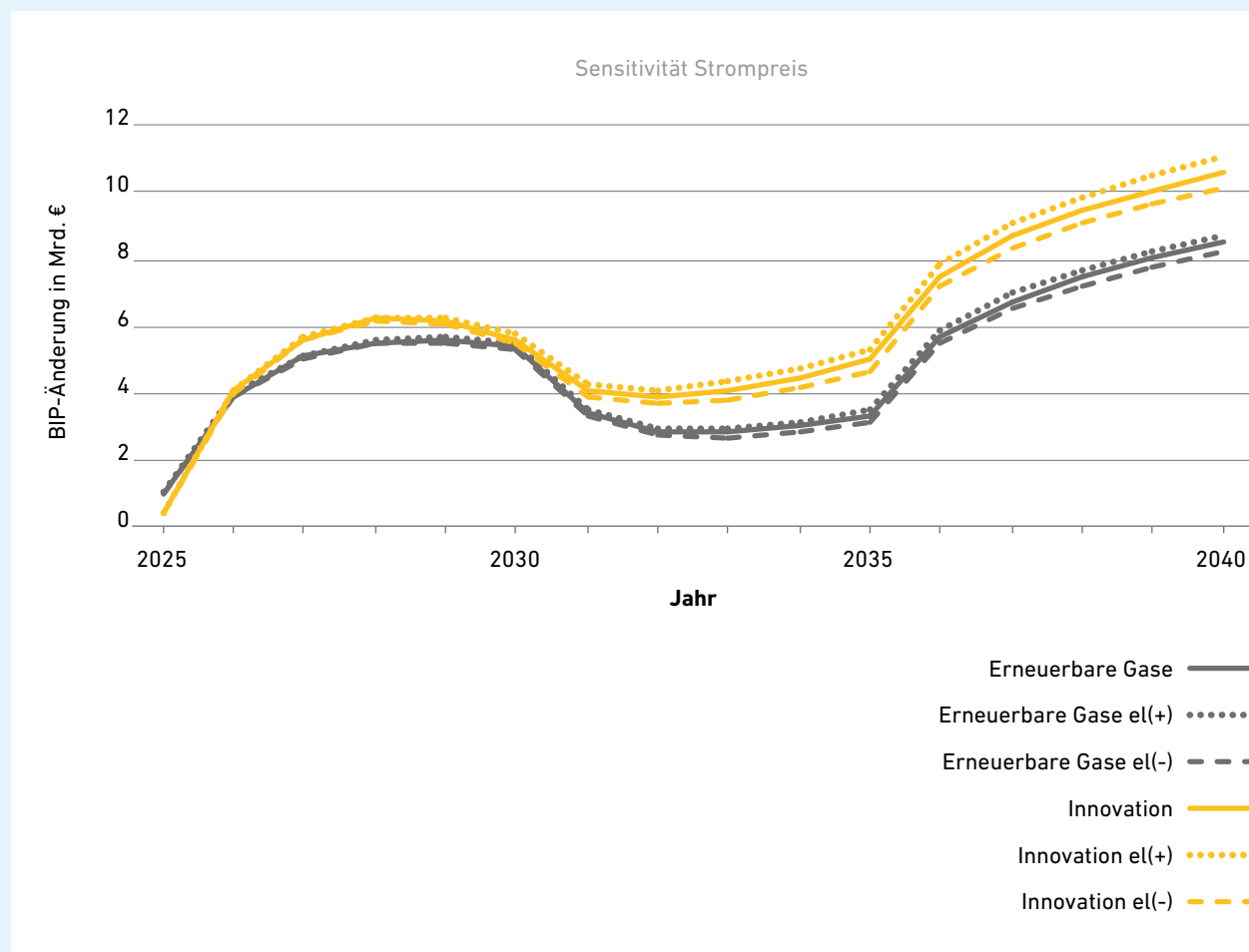


Abbildung 14

Sensitivität der Änderung des Bruttoinlandsprodukts bei Variation des Strompreises um +25% (punktierte Linien) bzw. -25% (strichlierte Linien) gegenüber dem Basiswert (durchgezogene Linien)

Entsprechend verhalten sich die Effekte bei einer Variation der in hohen Anteilen zu importierenden Energieträger (Wasserstoff, Methan, Naphtha) umgekehrt. Wie Abbildung 15 zeigt, führt eine Erhöhung des angesetzten Preises um +25% für diese Energieträger zu einer Reduktion der positiven BIP-Effekte durch eine weitere Reduzierung der Nettoexporte. Durch geringe Importpreise für diese

Energieträger, können die positiven Auswirkungen auf die österreichische Volkswirtschaft hingegen weiter erhöht werden. Dementsprechend ist es für die Transformation der Industrie essenziell, frühzeitig entsprechende Importrouten für diese Energieträger zu identifizieren und entsprechende Importbedarfe, die in allen Szenarien vorhanden sind, zu sichern.

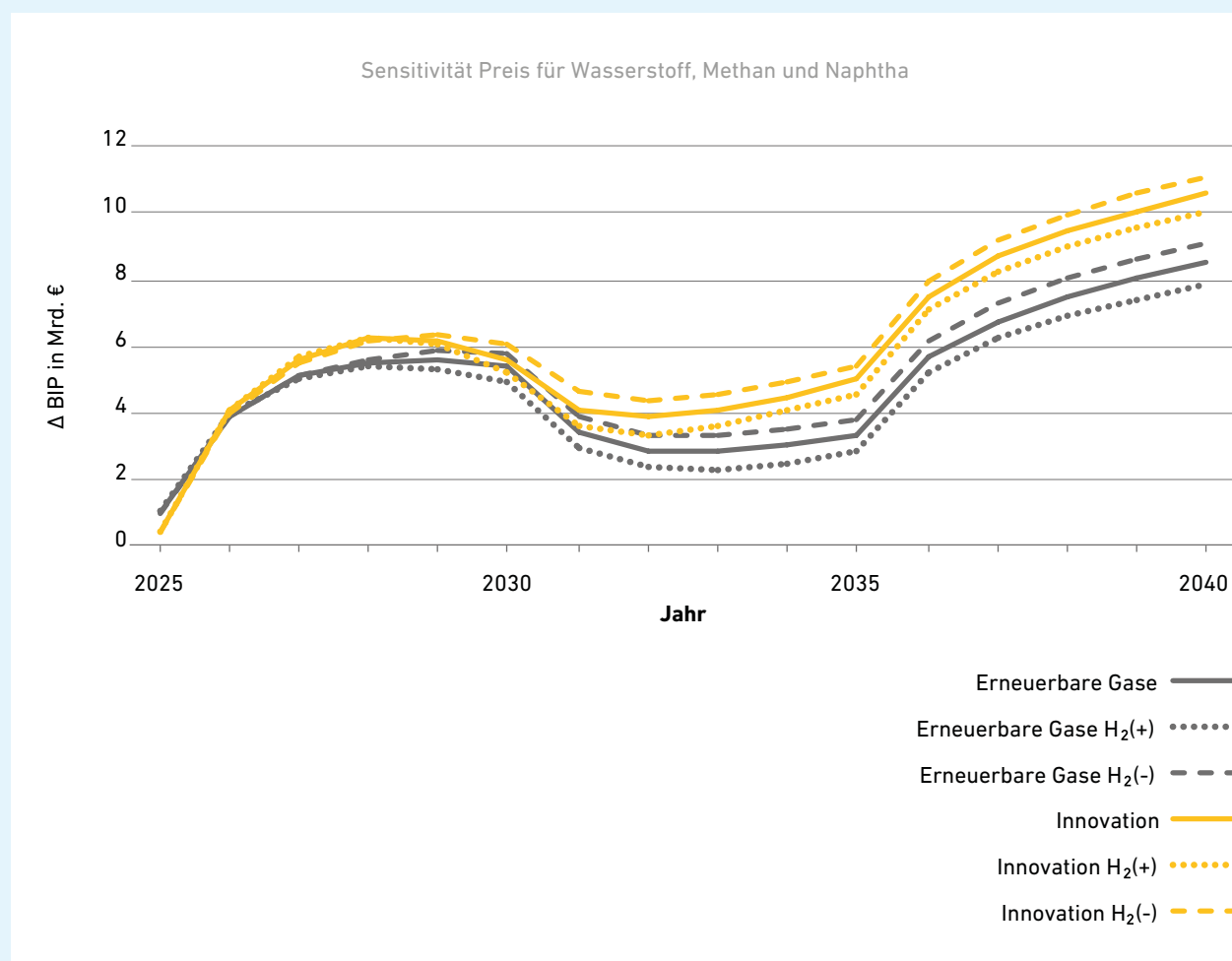


Abbildung 15
Sensitivität der Änderung des Bruttoinlandsprodukts bei Variation des Preises für Wasserstoff, Methan und Naphtha um +25% (punktierter Linien) bzw. -25% (strichlierte Linien) gegenüber dem Basiswert (durchgezogene Linien)

Deutliche Auswirkung auf das volkswirtschaftliche Ergebnis haben auch jene Einsparungen die aus den Kosten einer zukünftigen CO₂-Bepreisung gegenüber dem „business-as-usual“-Szenario resultieren. Während der angesetzte Referenzpfad mit einem Zielwert von 400 €/t emittiertes CO₂ einen sehr progressiven Kurs zur Erreichung der Klimaneutralität in der Industrie

verfolgt, zeigt Abbildung 16, dass auch ein konservativerer Pfad mit einem Zielwert von 200 €/t, wie er auch in den aktuellen Emissionsszenarien des Umweltbundesamtes (BMK, 2023b) verfolgt wird, zu einem positiven volkswirtschaftlichen Ergebnis führt. Auch beeinflusst ein veränderter Pfad für die CO₂-Bepreisung nichts an den Ergebnissen der Szenarien untereinander.

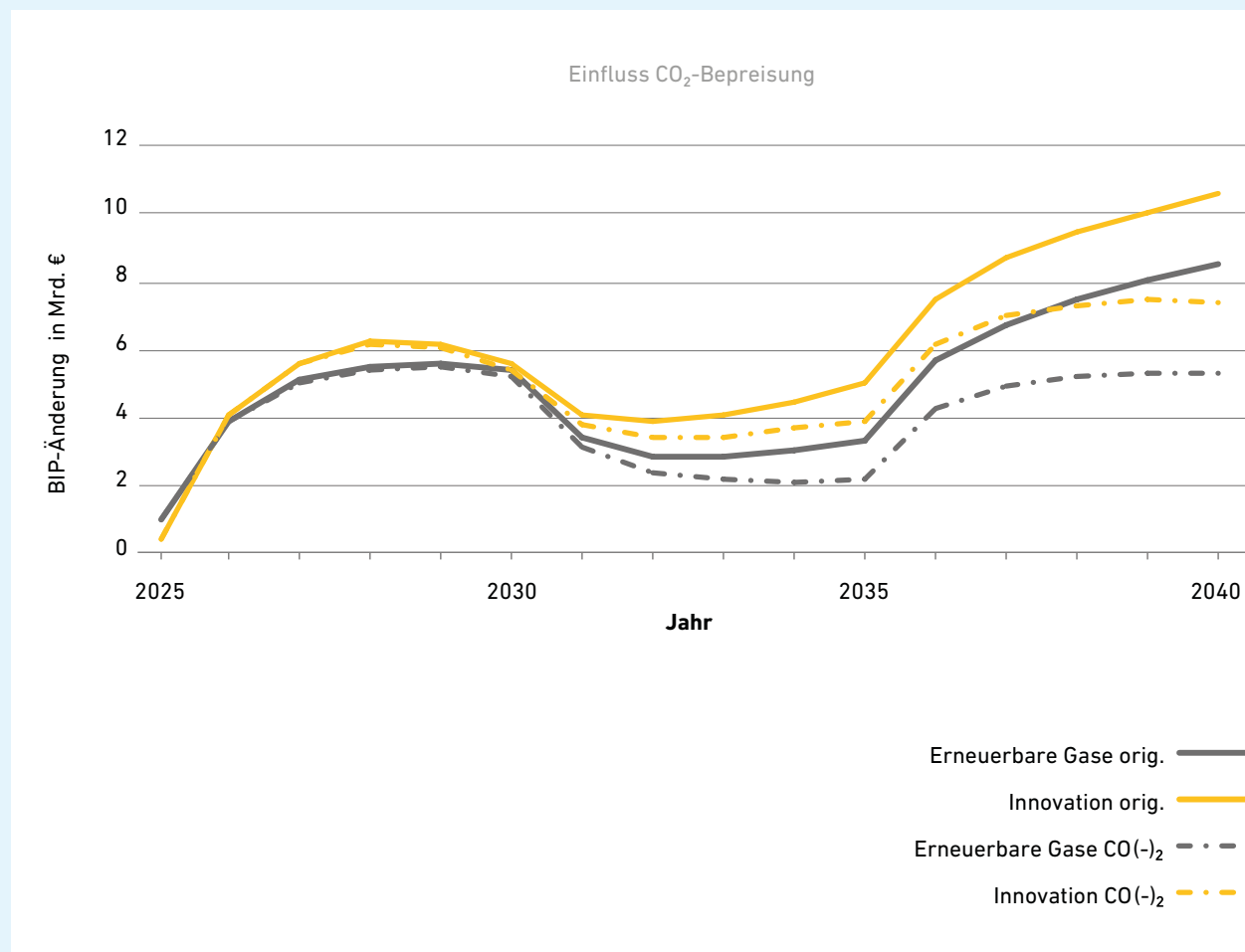


Abbildung 16

Auswirkung des CO₂-Preispfads auf die Änderung des Bruttoinlandsprodukts bei Reduktion des Zielwerts für 2040 auf 200 € pro Tonne CO₂

3.3.4 Zusammenfassung der wirtschaftlichen Effekte

Die Szenarien wurden bewusst so gewählt, dass sie „extreme“ Ausprägungen strukturellen Wandels zur Klimaneutralität der Industrie darstellen. **Das Ziel ist also explizit nicht das Auswählen des besten hier evaluierten Szenarios.** Das Ziel muss sein, die jeweils wichtigsten Erkenntnisse zusammenzuführen, um nun einen gesellschaftlich realisierbaren Dekarbonisierungspfad einschlagen zu können, welcher auf den jeweiligen Vorteilen der analysierten Szenarien aufbaut.

Zusammenfassend lassen sich aus den ökonomischen Analysen der Szenarien folgende Schlussfolgerungen für die Transformationspfade ableiten:

- Jedes Transformationsszenario geht mit signifikanten Investitionen einher und löst damit positive Effekte auf Beschäftigung und BIP aus. Höhere Investitionen in die Transformation der Industrie führen auch zu einem Mehr an positiven volkswirtschaftlichen Effekten.
- Eine Reduktion von Primärproduktion durch forcierte Kreislaufwirtschaft reduziert einerseits den notwendigen Investitionsbedarf der Industrie zur Transformation und erhöht andererseits die Bruttowertschöpfung durch einen reduzierten Importbedarf für hochpreisige Energieträger.
- Die Sensitivitätsanalyse in *Abbildung 13* zur Nutzung von Naphtha/Biomethan in der chemischen Industrie zeigt das volkswirtschaftliche Verhältnis zwischen den Szenarien *Erneuerbare Gase* und *Innovation* unter diesbezüglich gleichen Bedingungen auf. Das Szenario *Innovation* weist mit einem um die Hälfte erhöhten BIP-Effekt sodann deutliche Vorteile auf: ein gesellschaftliches Ziel muss die Vermeidung teurer Energieimporte (nach Menge und Preis) sein.
- Ein Festhalten an bestehenden Technologien mit entsprechender Abhängigkeit von bestimmten erneuerbaren Energieträgern, wie Methan oder Naphtha, führt zwar zu geringen Investitionsbedarfen für die Industrie, langfristig entsteht hieraus allerdings ein volkswirtschaftlicher Nachteil durch hohe Importbedarfe und den damit verbundenen Kosten und Abhängigkeiten.
- Dennoch wird die österreichische Industrie zukünftig auf den Import von erneuerbaren Gasen (Wasserstoff, Methan) und höherwertigen Kohlenwasserstoffen, wie erneuerbares Naphtha, angewiesen sein. Es ist daher essenziell, früh entsprechende Bedarfe und dazugehörige Importrouten zu identifizieren, um Abhängigkeiten und Preise bzw. Kosten zu minimieren.
- In den auf die Industrie fokussierten Simulationen zeigen die Nutzung von Abwärme und Umgebungswärme einen geringen volkswirtschaftlichen Effekt (*Szenario Sektorkopplung* im Vergleich mit *Szenario Innovation*), weil diese v. a. im Inland produzierte Energieträger vermeiden (Strom und Biomasse). Auf die hohe gesellschaftliche Relevanz der Reduktion des Primärenergiebedarfs und des Freiwerdens dieser Primärenergieträger für andere Sektoren ist jedoch klar hinzuweisen.

Kriterien	Erneuerbare Gase	Kreislaufwirtschaft	Innovation	Sektorkopplung
Energieverbrauch inkl. Abwärme und Umgebungswärme	144 TWh/a	132 TWh/a	133 TWh/a	133 TWh/a
Energieverbrauch exkl. Abwärme und Umgebungswärme	136 TWh/a	124 TWh/a	126 TWh/a	107 TWh/a
Kosten bis 2040 (CAPEX+OPEX)	21,3 Mrd. Euro	17,4 Mrd. Euro	24,4 Mrd. Euro	24,2 Mrd. Euro
Direkte und indirekte Beschäftigungseffekte, im Durchschnitt der Jahre 2025–2040	Ca. 176.000	Ca. 163.000	Ca. 193.000	Ca. 183.000

Tabelle 6

Quantitative Ergebnisse der vier Szenarien

4.0 FTI-Fahrplan und Handlungsempfehlungen

Im Folgenden werden Handlungsempfehlungen für die Erreichung der klimapolitischen Ziele in der Industrie bis 2040 formuliert. Dabei werden zunächst die zentralen Zukunftstechnologien zusammenfassend dargestellt. Die Liste der Zukunftstechnologien zeigt den technologischen Entwicklungsbedarf und deckt gleichsam die Dimension der Technologie des FTI-Fahrplans – bei europäischen Forschungsprogrammen auch häufig als strategische Forschungs- und Innovationsagenda (*Strategic Research and Innovation Agenda – SRIA*) bezeichnet – ab.

Die Handlungsempfehlungen basieren auf einer Analyse und Diskussion der Szenarien und Transformationspfade mit VertreterInnen von Industrie, Interessensverbänden und Politik im Rahmen von zwei im April und November 2023 organisierten Workshops. Des Weiteren wurden aktuelle FTI-politische Initiativen auf nationaler und europäischer Ebene berücksichtigt.

Die Dekarbonisierung der Industrie ist ein tiefgreifender Wandel für Wirtschaft und Gesellschaft. Er umfasst die Bereitstellung von erneuerbaren Energien, neue Formen der Zusammenarbeit zwischen Industrie und Energiewirtschaft, Anreize für Investitionen (sowohl in der Industrie als auch in der Energieinfrastruktur), rasche Bewilligungsverfahren für neue Anlagen, aber beispielsweise auch Maßnahmen im Bereich der Aus- und Weiterbildung von Fachkräften. Neben Forschung und technologischer Entwicklung ist daher eine Reihe von weiteren Anstrengungen notwendig, um die Klimaneutralität der Industrie bis 2040 zu realisieren. Entsprechend werden Empfehlungen für unterschiedliche Handlungsfelder beschrieben, die über die FTI-Politik hinausgehen. Die Unterstützung der industriellen Transformation und Erreichung klimapolitischer Ziele kann als eine wichtige Mission verstanden werden, die eine verstärkte Abstimmung unterschiedlicher Politikfelder und insbesondere der FTI-, Industrie-, Regional/Standort- und Energiepolitik erfordert.

Die Handlungsempfehlungen richten sich vor allem an die Politik aber auch an Interessensverbände. Darüber hinaus bieten sie auch Industrieunternehmen Anhaltspunkte für die Planung und Umsetzung von Maßnahmen. Der tatsächlich gewählte Policy-Mix, um konkrete Transformationspfade einzuschlagen, kann auf die hier vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen zurückgreifen. Die Handlungsempfehlungen sind jedoch weder als vollständig zu verstehen noch wurden sie zwangsläufig von allen eingebunden AkteurInnen konsensual bewertet.

Die Darstellung der Technologien und Handlungsfelder fokussiert hier auf diejenigen Bereiche, die unabhängig von den spezifischen Szenarien von essenzieller Bedeutung sind.

Die vier im Rahmen der Studie berechneten Extremszenarien legen Schwerpunkte auf unterschiedliche Technologien, Lösungen und Ansätze. Durch die Breite der Variation der zugrunde gelegten Szenarien lassen sich robuste Handlungsempfehlungen formulieren. Darüber hinaus wurden im Rahmen dieser Studie auch branchenspezifische Handlungsempfehlungen formuliert. Diese sind in den jeweiligen Aktionsplänen im Anhang zu finden.

Das Ziel einer **strategischen Forschungs- und Innovationsagenda** ist es, Orientierung zu schaffen und damit Unsicherheiten zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund verstehen sich die Empfehlungen als Fahrplan für die Definition und Umsetzung von Maßnahmen für alle in Österreich am Prozess der Transformation der Industrie beteiligten AkteurInnen.

Der Umbau der Industrie erfordert große Anstrengungen und Investitionen, ermöglicht aber zugleich die nachhaltige Sicherung des Industriestandorts Österreichs, schafft neue Möglichkeiten für die Produktion von klimaneutralen Produkten, die zukünftig auch von Seiten der Kunden und Märkte nachgefragt werden. Entsprechend ist die industrielle Transformation als Chance zu betrachten. In diesem Zusammenhang kann auch auf die Erfahrungen von Schweden verwiesen werden, das als Vorreiter auf dem Weg zur Realisierung einer klimaneutralen Industrie gilt. Die Erfahrungen im Rahmen der Entwicklung von industriellen Strategien und Technologie-Roadmaps in Schweden zeigen, dass eine positiv konnotierte Narration des Gelingens der industriellen Transformation einen wesentlichen Erfolgsfaktor darstellt.⁸

4.1 Zukunftstechnologien

Die nachfolgende Tabelle 7 fasst die technologischen Anforderungen an die Klimaneutralität der österreichischen Industrie, technologische Reifegrade, Barrieren, sowie die Relevanz der Technologien zur CO₂-Reduktion und die Investitionskosten zusammen.

⁸ Vgl. Leitner (2023).

Technologie	TRL	Größte Barriere	Beitrag zur CO ₂ -Reduktion (Abatement Volume)	Gesamtinvestitionen für die Implementierung der Technologie
Wärmepumpe mit Umgebungswärme	9	Forschung, Regulierung, Infrastruktur etc.	Hoch	bis zu 2.560 Mio. Euro
Biomassekessel für Niedertemperaturwärme	9	Ausreichende Energieträger-Verfügbarkeit, Preisvolatilität	Niedrig	bis zu 155 Mio. Euro
Fernwärme	9	Verfügbarkeit, Divergierender Planungshorizont	Niedrig	bis zu 120 Mio. Euro
Wärmepumpe mit Abwärme	9	Information im Markt	Hoch	bis zu 5.610 Mio. Euro
Direkte Abwärmenutzung	9	Organisatorische Hürden zw. Betrieben, zeitliche Inkohärenz Quelle & Senke	Hoch	bis zu 640 Mio. Euro
Biomassekessel für Hochtemperaturwärme	9	Ausreichende Energieträger-Verfügbarkeit, Preisvolatilität	Mittel	bis zu 430 Mio. Euro
Gaskessel (erneuerbares Gas)	9	Ausreichende Energieträger-Verfügbarkeit	Hoch	Keine Technologische Änderung.
Direktreduktion mit Methan bzw. H ₂ (Primärstahlerzeugung)	7-9	Erfordert ausreichend erneuerbare Gase (Bio-CH ₄ und H ₂)	Hoch	7.370-8.090 Mio. Euro
Elektrolichtbogenofen (Sekundärstahlerzeugung)	9	Verfügbarkeit von ausreichend elektrischer Energie mit geringem CO ₂ -Fußabdruck und von hochwertigem Schrott	Hoch	6.490 Mio. Euro
Carbon Capture mit Aminwäsche (Zementherstellung)	7	Bereitstellung der erforderlichen Infrastruktur für den Transport des abgeschiedenen CO ₂ zur Speicherung oder Nutzung. Umfassende Rauchgasreinigung vor der Abscheidung	Hoch	bis zu 3.790 Mio. Euro
Carbon Capture mit Oxyfuel-Verfahren (Zementherstellung)	6	Bereitstellung der erforderlichen Infrastruktur für den Transport des abgeschiedenen CO ₂ zur Speicherung oder Nutzung. Komplexe Integration in bestehende Anlagen	Hoch	bis zu 1.910 Mio. Euro
Ammoniak- und Methanolherstellung aus Wasserstoff (chemische Industrie)	7	Erfordert ausreichend erneuerbare Gase (Bio-CH ₄ und H ₂). Zusätzlich auch emissionsfreie Kohlenstoffquellen als Rohstoff benötigt (für Harnstoff, etc.)	Hoch	bis zu 75 Mio. Euro
Olefinherstellung mittels Methanol-to-Olefines Route (chemische Industrie)	8-9	Verfügbarkeit von ausreichend emissionsarmem Methanol	Hoch	bis zu 3.710 Mio. Euro
Olefinproduktion aus erneuerbarem Naphtha (chemische Industrie)	9	Verfügbarkeit ausreichender erneuerbarer Quellen zur Herstellung von erneuerbarem Naphtha ist wichtig für die Dekarbonisierung	Hoch	Keine Technologische Änderung

Tabelle 7

Haupt-Zukunftstechnologien und -Gruppen aus den Szenarien

4.2 Handlungsfelder

Die Nutzung der industriellen Dekarbonisierung zur Schaffung von Mehrwert und Aufbau neuer Geschäftsfelder erfordert nicht nur die Lösung technologischer Herausforderungen und damit FTI-Politik, sondern umfasst insbesondere auch Maßnahmen im Bereich der Industrie-, Energie-, Infrastruktur-, Standort-, und Bildungspolitik.

Die Empfehlungen beziehen sich daher nicht nur auf F&E-Förderungen sondern auf insgesamt neun Handlungsfelder.⁹ Diese werden zunächst in Tabelle 8 kurz charakterisiert.

1. Förderung von F&E	Dies umfasst die Förderung von Forschung und Entwicklung entlang der gesamten Innovationskette bzw. aller Technologiereifegrade (Technology Readiness Levels) und umfasst auch Forschungsinfrastrukturen, Pilot- und Demonstrationsvorhaben sowie die Integration von Technologien in den laufenden Betrieb. Neben nationalen Förderungen stehen auch Förderungen von Seiten der Europäischen Union zur Verfügung. Die Nutzbarmachung von Möglichkeiten auf europäischer Ebene ist ebenfalls Bestandteil dieses Handlungsfelds und insbesondere geht es darum, nationale Interessen auf europäischer Ebene einzubringen und mögliche Kooperationen mit anderen Ländern einzugehen.
2. Anreize und Förderungen von Investitionen	Die industrielle Transformation erfordert sehr hohe Investitionssummen und es gibt unterschiedlichste Möglichkeiten, wie die Politik die Investitionen fördern kann. Dies umfasst direkte Investitionsförderungen, Garantien, steuerliche Vergünstigungen und Maßnahmen zur Reduktion von Informationsasymmetrien auf Kapitalmärkten. Auch hier ist ähnlich wie bei der F&E-Förderung die Nutzbarmachung und Abstimmung auf europäischer Ebene von wesentlicher Bedeutung.
3. Energieinfrastrukturen und Energiebereitstellung	Die Bereitstellung von erneuerbaren Energien ist ein wesentlicher Schlüsselfaktor für die industrielle Transformation. Elektrizität, Wasserstoff und biogene Energieträger sind in großer Menge bereitzustellen, wobei Produktion und Transport durch unterschiedliche Akteure erfolgen kann und in einem bestimmten Umfang Importe unumgänglich sind.
4. Bereitstellung von Material und Rohstoffen	Die Dekarbonisierung industrieller Prozesse ist häufig mit dem Einsatz von neuen Rohstoffen und Materialien verbunden. Angeführt werden kann etwa Eisenschrott, der ähnlich wie Energie produziert, transportiert, importiert und in entsprechender Qualität bereitgestellt werden muss. Aber auch in der chemischen Industrie sind neue Rohstoffe (z. B. Biomasse) von Bedeutung.
5. Auf- und Ausbau von Infrastrukturen	Neben der Energieinfrastruktur sind weitere Infrastrukturen für die Dekarbonisierung notwendig, wie z. B. der Auf- und Ausbau von Carbon Capture Infrastrukturen und ähnlichen Technologien. Auf europäischer Ebene werden in diesem Zusammenhang etwa aktuelle „Hubs for Circularity“ gefördert, die auf regionaler Ebene als eine Infrastruktur für die Erprobung von neuen Kreislaufwirtschaftskonzepten betrachtet werden können.
6. Kooperation und Vernetzung	Der Umbau der Industrie erfordert neuartige Kooperationen quer über unterschiedliche Industriebranchen oder entlang der Wertschöpfungskette, vor allem aber auch zwischen dem Industrie- und Energiesektor. Sämtliche Maßnahmen, die helfen, Kooperationsbarrieren abzubauen, werden in diesem Handlungsfeld beschrieben. Auch Clustermanagement, oder die Entwicklung von Smart Specialisation Strategien kann in diesem Kontext verortet werden.

⁹ Auch auf europäischer Ebene wird bei vielen Empfehlungen zur industriellen Dekarbonisierung auf ein breites Set an Maßnahmen eingegangen, die über die klassische F&E-Förderung hinausgehen. In diesem Zusammenhang kann etwa auf die im Jahr 2022 publizierte ERA Industrial Technology Roadmap for low-carbon technologies in energy-efficient industries verwiesen werden oder den Net Zero Industry Act.

7. Gesetzliche Rahmenbedingungen, Standards und Normen	Dieses Handlungsfeld umfasst alle rechtlichen Rahmenbedingungen und adressiert Themen wie Betriebsgenehmigungen, Zulassungsverfahren, die Gewerbeordnung und regulatorische Sonderzonen. Standardisierung und Normung fallen ebenfalls in diese Kategorie, die in der Regel durch die Politik oder/und in Kooperation mit Interessensverbänden definiert und umgesetzt werden.
8. Öffentliche Beschaffung und Nachfrage	Die öffentliche Hand kann im Rahmen von eigenen Anschaffungen als Vorreiter fungieren, grüne Leitmärkte schaffen und weitere nachfrageseitige Anreize für die Dekarbonisierung der Industrie setzen.
9. Aus- und Weiterbildung sowie gesellschaftlicher Wandel	Die industrielle Transformation erfordert die Aneignung von neuen Kompetenzen und ausreichend qualifizierte Fachkräfte. Entsprechende Maßnahmen sind zu setzen und umfassen Ausbildungsprogramme, Umschulungsmaßnahmen, veränderte Curricula und die Attraktivierung von Arbeitsplätzen in vielen Berufen. Nicht nur die Sozialpartner und Interessenvertretungen für Industrie, Gewerbe und ArbeitnehmerInnen, sondern KundInnen, BürgerInnen und AnrainerInnen sind in den Prozess der industriellen Transformation einzubinden.

Tabelle 8

Beschreibung der Handlungsfelder für die Empfehlungen

4.2.1 Förderung von F&E

In Bezug auf die Entwicklung von technologischen Lösungen sind entsprechende gezielte Förderungsmaßnahmen notwendig. Wie Tabelle 7 zeigt, sind die relevanten Technologien im Allgemeinen schon relativ ausgereift und vielfach schon am Markt erhältlich. Der Aufwand für die betriebliche Integration ist jedoch in derartigen späteren Phasen (TRL > 6/7) nach wie vor groß, so sind Technologien an die jeweilige Branche und den jeweiligen Standort anzupassen, und entsprechend sind Förderungen wichtig.

Allgemeine Schwerpunkte für F&E- und Demonstrationsvorhaben (TRL 6–7) sind (für weitere branchenspezifische Themen siehe die Branchen-Aktionspläne):

- Erhöhung der Effektivität und Effizienz in der Elektrifizierung von Prozessen, insbesondere Plasmaöfen
- Entwicklung standardisierter Integrationskonzepte von Wärmepumpen für die Erzeugung von Prozesswärme und Wärmerückgewinnung (inkl. Pilot- und Demoanlagen für große Leistungen)

- Entwicklungen zur Förderung von Datentransparenz und Datensicherheit mit klaren Schnittstellen und Sicherheitsstandards sind Voraussetzung für den notwendigen Datenaustausch im Zuge vieler grüner Innovationen, insbesondere bei Smart Metern zum Demand Side Management
- Integrationskonzepte der Digitalisierung und adaptiven Steuerung (z. B. Predictive Maintenance, AR Video Support Smart Control) können zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz beitragen
- Integration und Weiterentwicklung innovativer Produktionstechnologien und Upscaling in Industriemaßstab bzw. die Serienfertigung (Bspw. Direktreduktion in der Stahlindustrie) ist Voraussetzung für eine Dekarbonisierung der Schwerindustrie
- Weiterentwicklung und Entwicklung von neuen Systemen, die die Trennung und Verwertung von Abfällen und Rohstoffen ermöglichen
- Elektrifizierung der fossil betriebenen Fahrzeuge mit einer Priorität auf der Entwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen oder dem Einsatz von erneuerbaren Gasen bei fehlenden Möglichkeiten zur Elektrifizierung

Einige Technologien befinden sich bereits in reifen Entwicklungsphasen, konkret TRL 6–8, und erfordern in diesem Kontext vor allem den Betrieb von Pilotanlagen in großem Maßstab zur Integration in die Wertschöpfungsketten.

Der Transfer von potenziellen Lösungen und Ergebnissen in unterschiedlichen Anwendungskontexten, Standorten und Branchen erfolgt bislang zu wenig. Die Förderung des brancheninternen und -übergreifenden Wissenstransfers (wie z. B. die LEEN Netzwerke, oder Branchen-Energieeffizienz- und Wärmeaustauschprojekte) ist unbedingt notwendig, um Synergieeffekte für gemeinsame Herausforderungen zu erzielen und den Emissionsreduktionsprozess zu beschleunigen. Es braucht Follow-up-Projekte nach Abschluss von erfolgreichen F&E-Projekten für den branchenübergreifenden Wissenstransfer. Die Vorzeigeregion NEFI – New Energy for Industry, gefördert vom KLIEN, führt hier seit 2018 entsprechende Vorhaben durch. Das Programm läuft noch bis 2026, ein entsprechendes Nachfolgeprogramm ist zweckmäßig.

Weiters kann angeführt werden, dass auch im nicht-technologischen Bereich innovative und technologie-komplementäre Entwicklungen und Initiativen notwendig sind. Hier kann etwa auf organisatorische Innovationen, soziale Innovationen aber auch Geschäftsmodellinnovationen verwiesen werden. Derartige Projekte sollten ebenfalls gefördert werden. Beispiele sind Systemlösungen, wie beispielsweise integrierte Energiemanagementsysteme und kollaborative Geschäftsmodelle für die Nutzung von Energiespeichern und Abwärmenutzung, die sowohl Akteure in der Industrie als auch im etablierten Energiesystem (Energieversorger, Netzbetreiber und Verbraucher) betreffen können. Derartige Herausforderungen in der Transformation etablierter Strukturen, dem Aufbau

neuer Akteursnetzwerke, aber auch Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz und der Aus- und Weiterbildung (siehe auch unten) sind mit F&E-Aufwand verbunden, der von Ingenieurwissenschaften gemeinsam mit Geistes-, Sozial- und Kulturwissenschaften geleistet werden muss.

Weiters sind auch auf europäischer Ebene Maßnahmen notwendig:

- Kaskadische F&E Förderung: Synergien mit EU-Projekten suchen und nationale Weiterführung/ F&E Förderung erfolgsversprechender Ergebnisse aus diesen EU-Projekten
- Engere Kooperation, Abstimmung und aktive Einbringung im Horizon Europe F&E-Programm sowie in die relevanten Partnerschaften, vor allem der Processes4Planet Partnership.
- Neben dem aktuellen Horizon Europe Programme kann auf IPCEI und Möglichkeiten der Förderung von Demonstrationsvorhaben verwiesen werden.

Zunehmend ergeben sich auch Möglichkeiten der Kooperation im außereuropäischen Raum für kollaborative F&E, wie jüngst Maßnahmen im Kontext der Mission Innovation Net-Zero Industries Mission zeigen.

Die Regelung der geistigen Eigentumsrechte ist bei der Durchführung von F&E-Projekten in Abhängigkeit von der Phase (TRL) von großer Bedeutung und auszugestalten. Für groß angelegte Implementierungsprojekte (First-of-a-kind – FOAK) gelten andere Regeln der Geheimhaltung als für Projekte in früheren Phasen. Bei spezialisierten, anwendungsnahen Technologien mit hohem TRL ist Agilität wichtiger als Schutz. Lange Genehmigungsverfahren stellen daher die größte Hürde dar.

Wenngleich viele technologische Lösungen für die Dekarbonisierung bereits bekannt sind und sich in reifen TRL befinden, ist das Feld weltweit nach wie vor sehr dynamisch und es können relativ rasch neuartige Technologien emergieren mit großem, mitunter sogar disruptivem Potential. Entsprechend hat die FTI-Politik rasch und flexibel auf neuartige Entwicklungen zu reagieren und sollte dazu auch ein regelmäßiges Technologie-monitoring durchführen.

4.2.2 Anreize und Förderungen von Investitionen

Unsichere Rahmenbedingungen sind ein großer Hemmschuh für Innovation und Veränderung. Die erforderlichen hohen Investitionen sind weniger Herausforderung, wenn klar ist, dass die Investitionen sich bezahlt machen bzw. das Risiko von Stranded Assets gering ist. Verlässliche langfristige Signale der öffentlichen Hand zur Unterstützung der notwendigen Investitionssicherheit sind vor diesem Hintergrund absolut notwendig.

In vielen Branchen ist nicht so sehr die Höhe der Investitionen, sondern die im Vergleich zum Kerngeschäft geringere Rendite ein Hindernis um standortsichernde Transformationsvorhaben (z. B. Integration von Fernwärme oder Wärmepumpen zur Raumwärmebereitstellung, Modernisierung bestehender Öfen, v. a. in Richtung verbesserter Wärmerückgewinnung) zu realisieren (inkl. ETS-Betriebe). CAPEX Zuschüsse (für TRL 8–9 beispielsweise für FOAK-Anlagen) sind von Bedeutung und sollten durch die öffentliche Hand zur Verfügung gestellt werden. Dabei ist von den „Förderfähigen Mehrkosten“ abzurücken, weil diese neben Opportunitätskosten und Risikoaspekten nur einen Teil ausmachen. Kompetitive Fördermittelvergaben nach spezifischem Preis des Umweltnutzens ermöglichen unbürokratische Vergabe und reduzierte Unsicherheit der letztlich erzielbaren Förderhöhe.

Folgende wichtige Investitionen für Querschnittstechnologien und Vorhaben können hier exemplarisch angeführt werden (für weitere branchenspezifische Investitionen siehe auch die Branchen-Aktionspläne):

- Investitionsförderung für den Einsatz von Wärmepumpen und direkter Abwärme für die Erzeugung von Prozesswärme
- Ersatz von fossil betriebenen Standmotoren, Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWKs) und Fahrzeugen
- Anschaffung von Anlagen (z. B. PV) für die Erzeugung von Erneuerbaren direkt im Betrieb
- Direktelektrifizierung, integrierte, Produkteigenschaft-abhängige in-line Steuerung und Regelung von Öfen

Nationale Investitionsförderungen reichen (alleine) nicht aus, um Großanlagen der energieintensiven Industrien mitzufinanzieren. Das erforderliche Volumen ist zu groß, das verfügbare öffentliche nationale Budget zu klein, Ergänzung mit EU-Mitteln sind daher unbedingt erforderlich. Aktuell erschließen sich auf europäischer Ebene zahlreiche Möglichkeiten der Unterstützung von Investitionen. Angeführt werden hier: EU Innovation Fund, den Recovery Plan (REPowerEU), EFRE I3, EIB, Just Transition Fund, und InvestEU Fund. Auch auf das EIT KICs wie InnoEnergy, die Circular Innovation Hubs und die Hydrogen Valleys, die einen hohen regionalen Impact erzeugen können, kann verwiesen werden. Entsprechend ist eine wichtige Aufgabe der nationalen Politik derartige Möglichkeiten frühzeitig aufzuzeigen und die Interessen und Strategien der nationalen Akteure in den Abstimmungsprozessen auf europäischer Ebene einzubringen.

In diesem Zusammenhang kann auch darauf verwiesen werden, dass große Demonstrationsprojekte mitunter auch an regionalen oder lokalen Genehmigungsprozessen scheitern (siehe unten). Vorgaben und Empfehlungen des Staates und der EU an regionale Behörden in Zusammenhang mit solchen Dekarbonisierungsprojekten der energieintensiven Industrien wären daher zweckmäßig. Themen wie beschleunigte Verfahren, Amtshilfe, eine Service Stelle für regionale Behörden und die Kooperation bei Fragen zu Multi-Level-Governance stehen hier ganz oben auf der Agenda.

Zunehmend gibt es auch Möglichkeiten, Kooperationen mit Ländern und Unternehmen außerhalb Europas einzugehen, um Unterstützung für Investitionen zu ermöglichen.

Zusätzlich zu den Investitionen sind in der Grundstoffindustrie Zuschüsse auf Betriebskosten für erneuerbare Energieträger notwendig. Derartige OPEX-Zuschüsse, können in Form von Power Purchasing Agreements (PPA) bzw. Carbon Contracts for Difference (CCfD) oder Strompreiszuschüssen beanreicht werden, wenn es gelingt, diese unbürokratisch auszugestalten.

4.2.3 Energieinfrastrukturen und Energiebereitstellung

Die Bereitstellung von ausreichend erneuerbaren Energien ist ein wesentlicher Schlüsselfaktor für die industrielle Transformation und unabhängig vom Szenario bzw. Transformationspfad eine zentrale Aufgabe, welche die Politik weiter forcieren muss.

Folgende konkrete Maßnahmen sind prioritär in Angriff zu nehmen:

- Die Bereitstellung von erneuerbarer Energie ist durch Erzeugungs- und Netzausbau zu sichern, wobei die öffentliche Hand – als für die Daseinsvorsorge verantwortlich – hier durch Regulierung, die Rolle als (Mit-)Eigentümer, durch Gestaltung von Marktdesign sowie anderen Allokationsmechanismen und durch Förderungen Anreize und Unterstützung bieten soll;
- Erhöhung der Verfügbarkeit von erneuerbarem Gas (Wasserstoff-Produktion am Standort, Leitungen, externe Produktion), vor allem durch internationale Abkommen zum Import, welcher in großem Maßstab unumgänglich ist;
- Neben der Infrastruktur für erneuerbare Gase bzw. Wasserstoff ist auch die (Ab)wärme- und Kälte-Infrastruktur essenziell und sollte Teil der Energieraumplanung sein;
- Ausbau der Speicherinfrastruktur (Wärme, Strom, H₂) und Sektorkopplung (insbesondere Abwärmenutzung);
- Für den Auf- und Ausbau der Energieinfrastruktur sind entsprechende Investitionsprogramme notwendig (siehe voriger Punkt);
- Für erneuerbare Energieträger sind Standards zu setzen (erneuerbare Gas bzw. Wasserstoff) auch in Hinblick auf die erforderlichen Qualitäten (siehe auch unten);
- Analog zu Entwicklungen zur Förderung von Innovationssystemen, von Clustern und der Schaffung von regionalen Netzwerken, könnte die Entwicklung von Innovationsökosysteme und intersektorale Energie-Industrie Clustern in Betracht gezogen werden.

4.2.4 Bereitstellung von Material und Rohstoffe

Die Bereitstellung industriepolitisch wichtiger Rohstoffe bildet ein relevantes Handlungsfeld, in dem Innovationen notwendig sind. Der Einsatz erneuerbarer Energien erfordert häufig umfangreiche Umstellungen in Produktionsprozessen. Exemplarisch kann hier die materielle Nutzung von biogenen Rohstoffen in Produktionsprozessen angeführt werden. Die Rohstoffgewinnung und Wertschöpfende Nutzung in Österreich und Europa muss stärker ins Blickfeld rücken, womit globale Risiken reduziert und Wohlstand ausgebaut werden können.

Folgende wichtige Maßnahmen können aufgelistet werden:

- Sicherung der Versorgung mit und der Zugang zu wichtigen Rohstoffen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der sozialen und ökologischen Aspekte des Abbaus der Rohstoffe, wie auch im nationalen Masterplan Rohstoffe 2030 (der Rohstoffstrategie des dafür zuständigen Bundesministeriums für Finanzen) beschrieben.
- Hervorheben der Rolle des Recyclings und Upcyclings von Batterien und Elektronik, um sicherzustellen, dass die EU bereits im Wirtschaftssystem befindliche Rohstoffe behält
- Einrichtung zirkulärer Versorgungsketten für den Zugang zu erneuerbarem Kohlenstoff und den Ersatz fossiler Rohstoffe (Abfallbewirtschaftung, Biomasseverarbeitung, Übergang von der Verbrennung zum Recycling)
- Verkürzung der Zeit für die Erteilung von Genehmigungen von neuen Anlagen und Einführung unterstützender Vorschriften, um den Übergang zu neuen Rohstoffen zu beschleunigen (z. B. Abfall als Rohstoff)

4.2.5 Auf- und Ausbau von Infrastrukturen

Zusätzlich zur Energieinfrastruktur sind noch weitere Infrastrukturen von Bedeutung, deren Errichtung und Ausbau essenziell ist. Dabei können angeführt werden:

- CO₂ Pipelines und Endlagerstätten sind für gewisse Industrien unumgänglich und gemeinsam mit Qualitätsstandards rasch zu schaffen, wobei hier teilweise auch noch Forschungsbedarf besteht;
- Wichtig ist hier die Frage, wie CO₂ Abscheidung oder Nutzung bilanziert werden kann (z. B. CO₂-Minderungsmaßnahmen und Standards für die Anrechnungen bei standortübergreifendem Nutzen); In der Hochlaufphase wird hier ein anderes Markt-design erforderlich sein als in späteren reiferen Phasen;
- Auch in diesem Kontext kann auf die Notwendigkeit der Beschleunigung von Genehmigungsverfahren (z. B. UVPs) verwiesen werden;
- Weiteres Forcieren des Auf- und Ausbaus der Kreislaufwirtschaft (z. B. Sammel- und Sortiersysteme).

4.2.6 Kooperation und Vernetzung

In Bezug auf Kooperation und Vernetzung sind folgende Aufgaben wichtig:

- Gemeinsame Entwicklung von spezifischen Transformationsstrategien zur Integration aller zentralen Stakeholder in der Wertschöpfungskette
- Vernetzung: zwischen Firmen an einem Standort, um Potenziale zur Nutzung von z. B. Abwärme zu identifizieren (auch mit Netzbetreibern)
- Initiativen zur Selbstverpflichtung der Erreichung spezifischer Ziele und Erfüllung von Standards sind ein wirkungsvolles Instrument
- Raumplanung und Standortpolitik werden immer wichtiger, um integrierte Lösungen über Wertschöpfungsketten hinweg umsetzen zu können

- Mangelnde Datenschnittstellen und fehlende Datenstandards erschweren das Etablieren von Strategien zur Optimierung der Logistik und der Abfallentsorgung sowie der Realisierung von Konzepten der Kreislaufwirtschaft
- Engere Kooperation, Abstimmung und aktives Einbringen in EU-Aktivitäten und F&E Projekte sowie in die beiden EU-Partnerschaften Clean Steel und Processes4Planet. Mitarbeit an Initiativen zur Abstimmung von EU-Rahmenprogramm und EU-Innovationsfonds, Regionalfonds und ESF+ (skills and jobs) und andere sozialpartnerschaftliche Kooperationen.

Aber auch internationale Aktivitäten wie der EU Circular Cooperation Hub können hier angeführt werden.

4.2.7 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Folgende Maßnahmen sind prioritär zu setzen:

- Die Vereinfachung und Beschleunigung von Genehmigungs- und Verwaltungsverfahren zur Errichtung nationaler oder transnationaler Infrastrukturen (Erzeugung, Speicherung, Transport, Verteilung) ist im Sinne der Erneuerbaren-Richtlinie RED II 2018/2001/EU und RED III („effizienter und transparenter“, „gestrafft und beschleunigt“) zu forcieren;
- Einbringung der österreichischen Interessen bei europäischen Initiativen wie der Hydrogen Bank;
- Verwaltung allgemein: Verbesserung der Schnittstellen und anderer Hürden zur Beschleunigung, Ermöglichung von Bewilligungen, Förderungen und Finanzierungen;
- Gewerbeordnung, Anlagenrecht anpassen: z. B. Lagerung und Transport von Wasserstoff;

- Regulatorische „Sandboxes“ sind Experimentierräume, in denen für beschränkte Zeit und einen eingeschränkten Umkreis Ausnahmeregelungen z. B. von der Strom- oder Gasnetzregulierung bzw. von Energiesteuern für die Forschung gelten können. Sandboxes als Innovationsräume sind ein Beispiel für die praxisorientierte Forschung, aus der einerseits zukunftsorientierte Lösungen entstehen können und deren Lernerfahrungen in der Folge auch zu Empfehlungen für den legislativen Rahmen abgeleitet werden können;
- Wärmepumpen: der legislative Rahmen muss Planungssicherheit für Anwender und Technologieentwickler garantieren. Mehrkosten durch Umweltauflagen müssen im Verhältnis zum Umweltnutzen der Technologie abgewogen werden; im Zusammenhang mit Wärmepumpen ist auch die Regulierung zur Kältemittelbereitstellung relevant.

Des Weiteren kann das Thema CBAM („Carbon Border Adjustment Mechanism“) angeführt werden. Auf EU-Ebene ist neben einer CO₂-Bepreisung für die Jahre 2030 bis 2050 der CBAM vorgesehen, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

4.2.8 Öffentliche Beschaffung und Nachfrage

Die öffentliche Hand kann im Rahmen von eigenen Anschaffungen als Vorreiter fungieren, grüne Leitmärkte schaffen und weitere nachfrageseitige Anreize für die Dekarbonisierung der Industrie setzen. Insbesondere können Maßnahmen im Beschaffungswesen innovationsfördernder gestaltet werden¹⁰. Öffentliche Ausschreibungen in Anwendung der Ausschreibung von Funktions- und Leistungsanforderungen sind ein geeignetes Mittel, um im öffentlichen Auftragswesen Innovationen zu fördern, und sollten möglichst breite Verwendung finden.¹¹

¹⁰ Siehe dazu insbesondere das Leitkonzept für eine innovationsfördernde öffentliche Beschaffung (IOB) in Österreich.

¹¹ Directive 2014/24/EU of The European Parliament and the Council of 26 February 2014 on public procurement and repealing Directive 2004/18/EC, (74).

In Österreich wurden in der Vergangenheit die entsprechenden gesetzlichen Rahmenbedingungen geschaffen (Innovationsfördernde öffentliche Beschaffung – IÖB).

Die öffentliche Hand kann bei der Beschaffung durch spezifische Ausschreibungen und Anforderungen, insbesondere Anreize für den Einsatz von Erneuerbaren, etwa auf die Verwendung batteriebetriebener Fahrzeuge setzen. Exemplarisch kann etwa bei Bauausschreibung der Betrieb CO₂-freier Baustellen eingefordert werden.

Aber auch auf internationaler Ebene können Aktivitäten angeführt werden. Ein Engagement bei der UNIDO/CEM IDDI Initiativen zum Green Public Procurement Pledge ist zweckmäßig, bei dem sich die teilnehmenden Länder dazu verpflichten, Standards für grüne Produkte wie Zement oder Stahl einzuführen und in der öffentlichen Beschaffung einzuhalten.

4.2.9 Aus- und Weiterbildung sowie gesellschaftlicher Wandel

Der aktuelle und prognostizierte Fachkräftemangel muss durch entsprechende Aus- und Weiterbildungsprogramme (u. a. stärkere Verankerung von Digitalisierung in den Curricula) sowie durch Attraktivierung industrieller Arbeitsplätze adressiert werden. In Bezug auf Aus- und Weiterbildung kann eine Reihe von Maßnahmen angeführt werden.

In vielen Bereichen besteht ein Mangel an Personal für die Entwicklung und Montage von neuen Anlagen (z. B. industrielle Wärmepumpen in der Industrie) und entsprechende Maßnahmen (neue Aus- und Weiterbildungsprogramme, Anpassung der Curricula)

sind notwendig. Dabei sind Ziele und Zusammenhänge in Hinblick auf Dekarbonisierung in Aus- und Weiterbildung zu integrieren, um Gesamtverständnis zu schärfen, dies umfasst also:

- Zukunftsgerichtete Bildungsplanung
- Berücksichtigung potenzieller Verschiebung zukünftiger Industrieller Schwerpunkte
- Adaption der Lehrberufe und Lehrpläne
- Etablierung und Förderung hochspezifischer Ausbildungen
- Anreize für technische Berufe
- Stärkere Verschränkung zwischen Forschung und Ausbildung
- Rahmenbedingungen (rechtlich) für Aus- und Weiterbildung verbessern (Recht auf Weiterbildung)
- Entwicklung von Anforderungskatalogen in Bezug auf erforderliche Fertigkeiten und Tätigkeitsprofile der Gegenwart und Zukunft („skill requirements“)

Aber auch neue digitale Methoden müssen genutzt werden:

- Entwicklung digitaler Lern- und Lehrumgebung, die eine dynamische und erlebnisorientierte Lern- und Lehrplattform mit Lernumgebungen für einen skalierbaren Grad der Immersion bereitstellt
- Virtual und Augmented Reality eignen sich sehr gut, um die Arbeitsumgebung so zu visualisieren, so dass Lernende die präsentierten Lerninhalte in einer der realen Arbeitsumgebung ähnlichen Umgebung übertragen können. Dies ermöglicht es dem Lernenden, unabhängig von der realen Arbeitsumgebung Erfahrungen zu machen, indem er mit Objekten interagiert, Feedback erhält und soziale Interaktion durchführt

Betriebliche Maßnahmen beinhalten:

- Personalentwicklung und Qualifikation
- Nutzung und gemeinsame Förderung überbetrieblicher Lehre (insb. für KMU)

Ferner besteht Handlungsbedarf in Bereichen, die in enger Abstimmung zwischen ArbeitgeberInnen und ArbeitnehmerInnenvertretungen auszuhandeln sind

- Aktiver Einbezug der Belegschaft (insbesondere am „Shop Floor“) in die grüne Transformation und in die damit in Zusammenhang stehenden Veränderungen und Innovationen in der Produktion („Co-Creation“)
- Attraktive Arbeitsbedingungen
- Flexibilisierung der Arbeitsweise (Schichtmodelle, Homeoffice, ...)
- Entlastung des Faktors Arbeit
- Fonds für die Qualifikation der ArbeitnehmerInnen

Auch auf europäischer Ebene ergibt sich Handlungsbedarf:

- Identifizierung und Beschreibung der Qualifikationsanforderungen in kooperativen EU-Projekten (Horizon Europe & RFCS)
- Nutzung des ESF+ als weiteres Instrument der EU-Förderung im Anschluss an relevante F&E-Projekte
- Mitwirkung an EU „Industrial Skills Alliances“

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die grüne industrielle Transformation große Potentiale und positive Beschäftigungseffekte schafft.

Die Dekarbonisierung der Industrie hat weitreichende Folgen für die gesamte Gesellschaft. Folglich sind vielfältige Maßnahmen zu entwickeln und zu implementieren, um negative Folgen abzufedern und den Wandel im Sinne der BürgerInnen und KundInnen zu gestalten:

- Ein gesellschaftliches Umdenken ist erforderlich, um die Nachfrage nach klimaneutralen Produkten zu normalisieren und die Akzeptanz für erforderliche Veränderungen im Umgang mit dem Klimawandel sowie zur Anpassung an seine Auswirkungen zu erreichen. Ein breiter gesellschaftlicher Konsens ist erforderlich, in dem auch die Industrie einen bedeutenden Beitrag zu einer klimaneutralen Zukunft leisten kann;
- Regionalentwicklung im Strukturwandel begleiten (koordiniert, abgestimmt, vorausschauend).

Literaturverzeichnis

Alton, V. et al. (2022) *NEFI PATHWAY TO INDUSTRIAL DECARBONISATION SCENARIOS FOR THE DEVELOPMENT OF THE INDUSTRIAL SECTOR IN AUSTRIA*.

Baumann, M. et al. (2021) *Erneuerbares Gas in Österreich 2040*. Wien.

Biomasse-Verband, Ö. (2021) *Basisdaten Bioenergie 2021*. Wien.

BMF (2023) *Österreichisches Montan-Handbuch 2022*. Wien.

BMK (2022) *Wasserstoffstrategie für Österreich*. Wien.

BMK (2023a) *Begutachtungsentwurf Erneuerbares-Gas-Gesetz*.

BMK (2023b) *Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich*. Wien. Available at: www.bmk.gv.at/dam/jcr:34c13640-4532-4930-a873-4eccc4d3001/NEKP_Aktualisierung_2023_2024_zur_Konsultation_20230703.pdf.

Bundesrecht (2023) *Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz*.

Energie, Ö. (2022) *Österreichs Weg in eine klimaneutrale Energiezukunft*. Wien.

IEA (2022) *ETP Clean Energy Technology Guide*. Paris. Available at: www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide.

Sejkora, C. et al. (2022) 'Exergy as criteria for efficient energy systems – Maximising energy efficiency from resource to energy service, an Austrian case study', *Energy*, 239, p. 122173. Available at: doi.org/10.1016/j.energy.2021.122173.

Statistik Austria, *Energiegesamtrechnung* (2020) *Statistik Austria, Nutzenergieanalyse 2020*. Available at: www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/energiegesamtrechnung.

Statistik Austria, *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung* (2020) *Statistik Austria, Produktionsindex 2020*. Available at: www.statistik.at/statistiken/volkswirtschaft-und-oeffentliche-finanzen/volkswirtschaftliche-gesamtrechnungen.

Tichler, R. et al. (2014) *MOVE2 – Modell zur Simulation der (ober-)österreichischen Volkswirtschaft mit einem speziellen Schwerpunkt auf Energie. Update des Modells MOVE*.

Umweltbundesamt (2020) *Szenario WAM – NEKP Evaluierung*.

Abkürzungsverzeichnis

BIO-CH₄	Methan aus biogenen Ressourcen
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionskosten)
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCfD	Carbon Contracts for Difference
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
EG	Szenario Erneuerbare Gase
EIB	European Investment Bank
ESF	European Social Fund
ETS	Emissions Trading System
FTI	Forschung, Technologie und Innovation
FOAK	First-of-a-kind
H₂	Wasserstoff
IN	Szenario Innovation
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KW	Szenario Kreislaufwirtschaft
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LEEN	Lernende Energieeffizienz-Netzwerke
OPEX	Operational Expenditures (Betriebskosten)
PPA	Power Purchase Agreement
RFCS	Research Fund for Coal and Steel
SK	Szenario Sektorkopplung
SNG	Synthetic Natural Gas
TRL	Technology Readiness Level
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung

Kontakt Daten

Projektleitung

Christian Schützenhofer

Center for Energy

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Giefinggasse 6, 1210 Vienna

christian.schuetzenhofer@ait.ac.at

Andreas Indinger

Head of Center Research and Innovation

Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency

Mariahilfer Straße 136, 1150 Vienna

andreas.indinger@energyagency.at

Hans Böhm

Senior Researcher – Energietechnik

Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz

Altenberger Straße 69, 4040 Linz

boehm@energieinstitut-linz.at

Thomas Kienberger

Lehrstuhl für Energieverbundtechnik/Montanuniversität Leoben

Franz Josef-Straße 18, 8700 Leoben

+43 3842 / 402 5400

thomas.kienberger@unileoben.ac.at

Herausgeber

Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung
Leopold-Ungar-Platz 2/Stiege 1/Top 142, 1190 Wien
Tel: (+43 1) 585 03 90
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

AutorInnen

Christian Schützenhofer, Verena Alton, Bernhard Gahleitner, Sophie Knöttner,
Klaus Kubeczko, Karl-Heinz Leitner, Wolfram Rhomberg
AIT Austrian Institute Of Technology

Martin Baumann, Christoph Dolna-Gruber, Bernhard Felber, Andreas Indinger
Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency (AEA)

Thomas Kienberger, Maedeh Rahnama Mobarakeh, Peter Nagovnak
Lehrstuhl für Energieverbundtechnik/Montanuniversität Leoben (EVT)

Hans Böhm, Sebastian Goers, Simon Moser, Mario Reisinger
Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz (EI-JKU)

Mitwirkende

AEE – Institut für Nachhaltige Technologien
Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien

Für den Inhalt verantwortlich

Die AutorInnen tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Studie.
Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.
Weder der Klima- und Energiefonds noch das Bundesministerium für Klimaschutz,
Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) sind für die
Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung

www.angieneering.net

Titelfoto

Rob Lambert


Herstellungsort: Wien

Wir haben diese Broschüre mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt und die Daten überprüft.
Rundungs-, Satz- oder Druckfehler können wir dennoch nicht ausschließen.

www.klimafonds.gv.at





 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie