

ARIADNE Webinar, 05. März 2025

Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045

SEKTORALE PERSPEKTIVE INDUSTRIE

Dr. Andrea Herbst, Dr. Matthias Rehfeldt, Dr. Tobias Fleiter, Marius Neuwirth

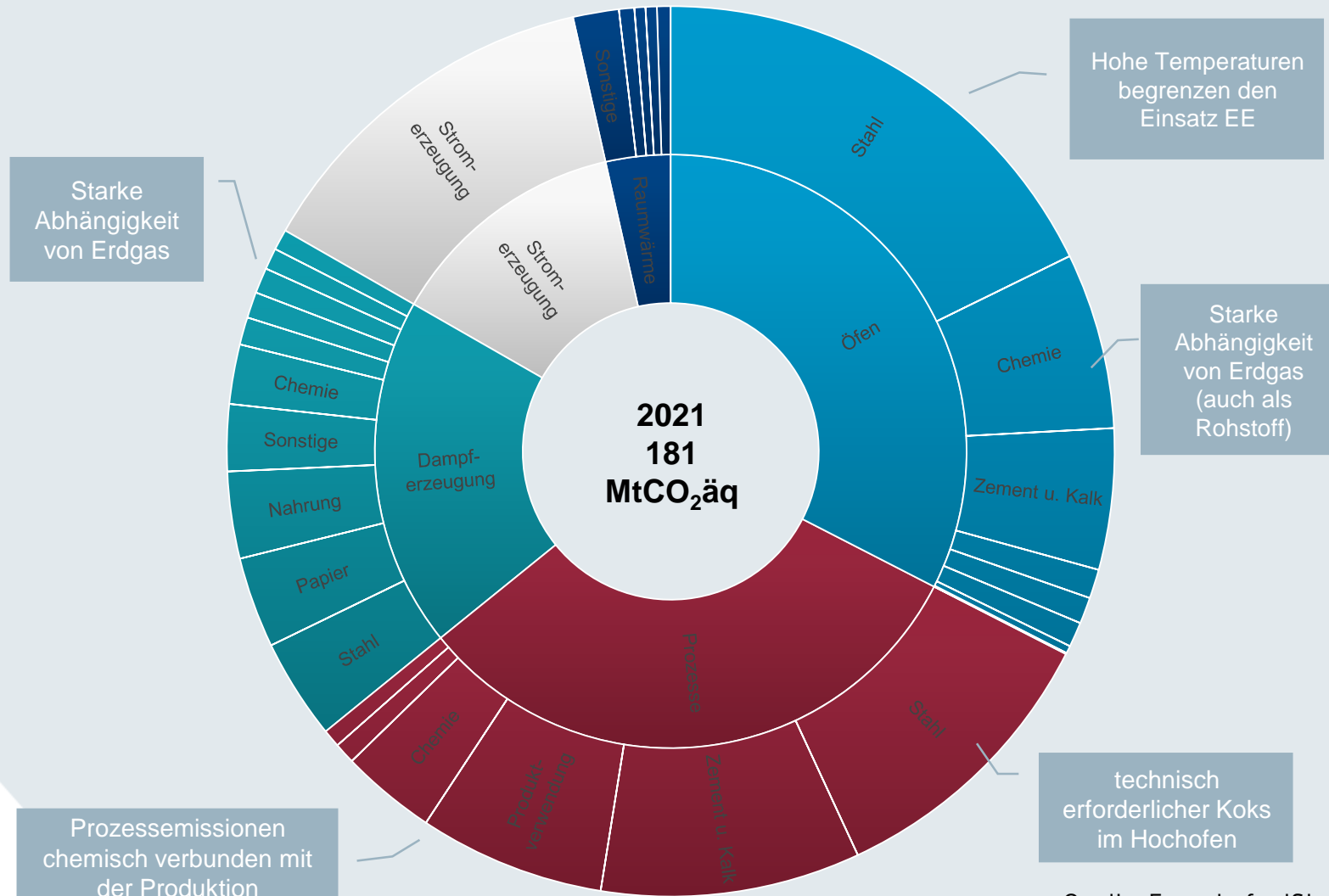


GEFÖRDERT VOM

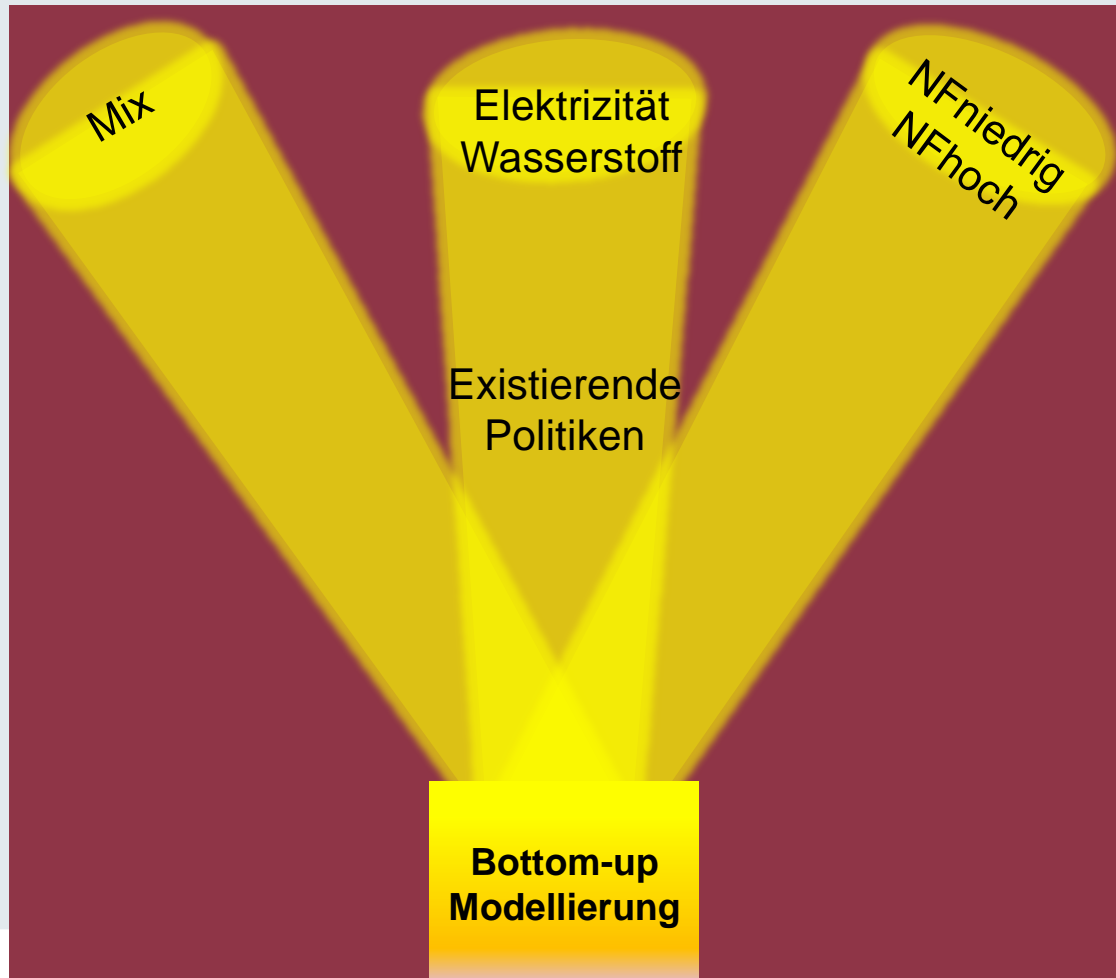
INDUSTRIE IST VERANTWORTLICH FÜR EIN VIERTEL DER THG-EMISSIONEN

Direkte industrielle Emissionen nach Anwendung und Branche

- › **Vielfältige Herausforderungen** über alle Anwendungsbereiche
- › **Neue CO₂-neutrale Produktionsverfahren** adressieren wichtige Emissionsquellen
- › Klimaneutrale Lösungen in vielen Branchen **technisch umsetzbar**, allerdings ohne Förderung **nicht wirtschaftlich**



ERKENNTNISGEWINN DURCH SZENARIOVERGLEICH



Zentrale Fragestellungen:

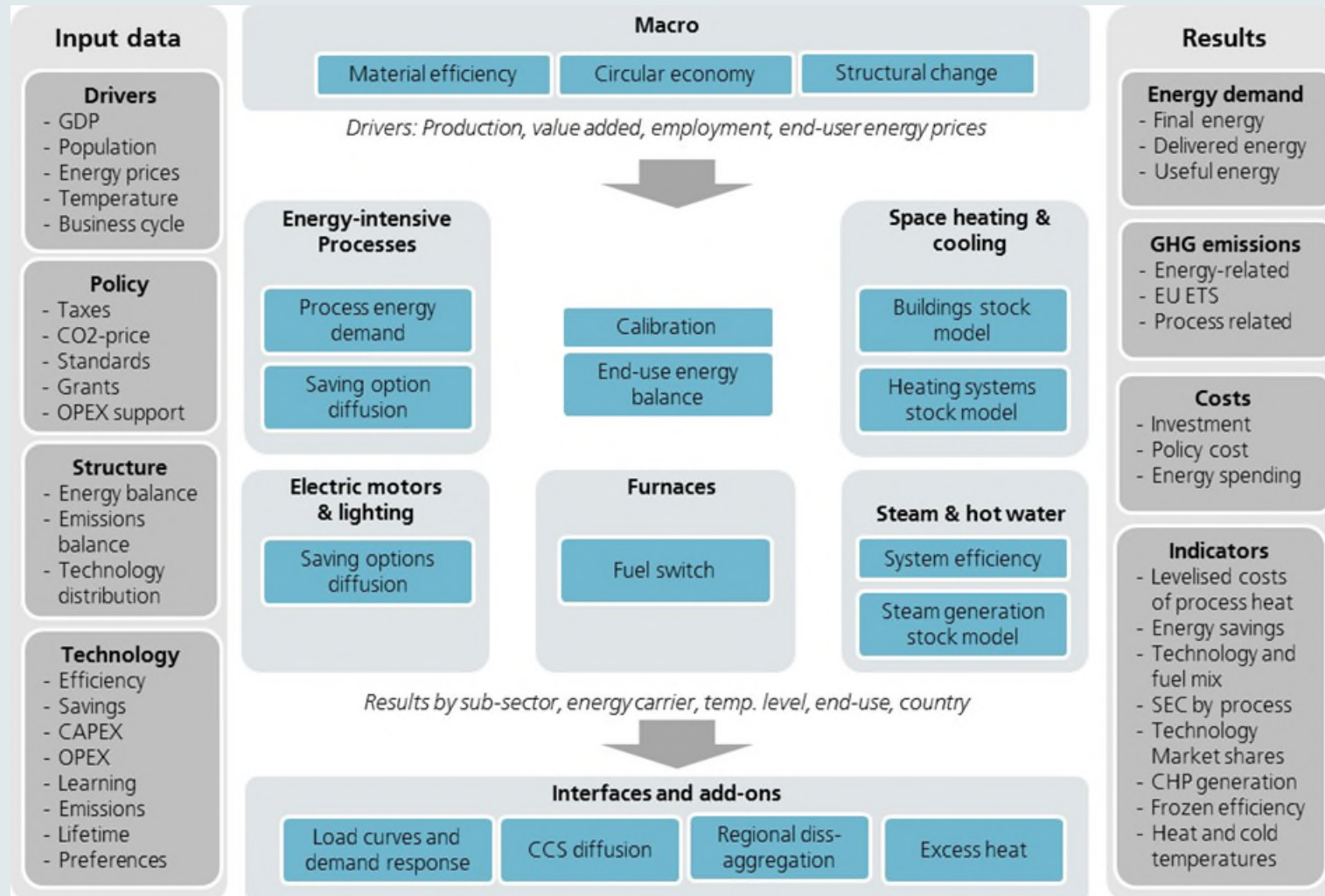
- › Wie könnten **verschiedene (Technologie-)Pfade** zu einer nahezu **klimaneutralen Industrie bis 2045** aussehen?
- › Wie hoch sind der **notwendige Investitionsbedarf** bzw. die **Betriebskosten** für die Transformation der Industrie?

Vorgehensweise:

- › Szenariovergleich durch **unterschiedliche Technologieansätze** inkl. Existierende Politiken Szenario
- › Modellierung der Transformationspfade bis 2045 mit einem detaillierten **Bottom-up-Modell**

BOTTOM-UP MODELLIERUNG DER ENERGIENACHFRAGE UND THG-EMISSIONEN

- › Hoher Grad an **technologischem Detail**
- › Berücksichtigung aller **wichtigen Vermeidungshebel**
- › **Energie- und Treibhausgasbilanz**
- › **Jährliche Ergebnisse bis 2045**

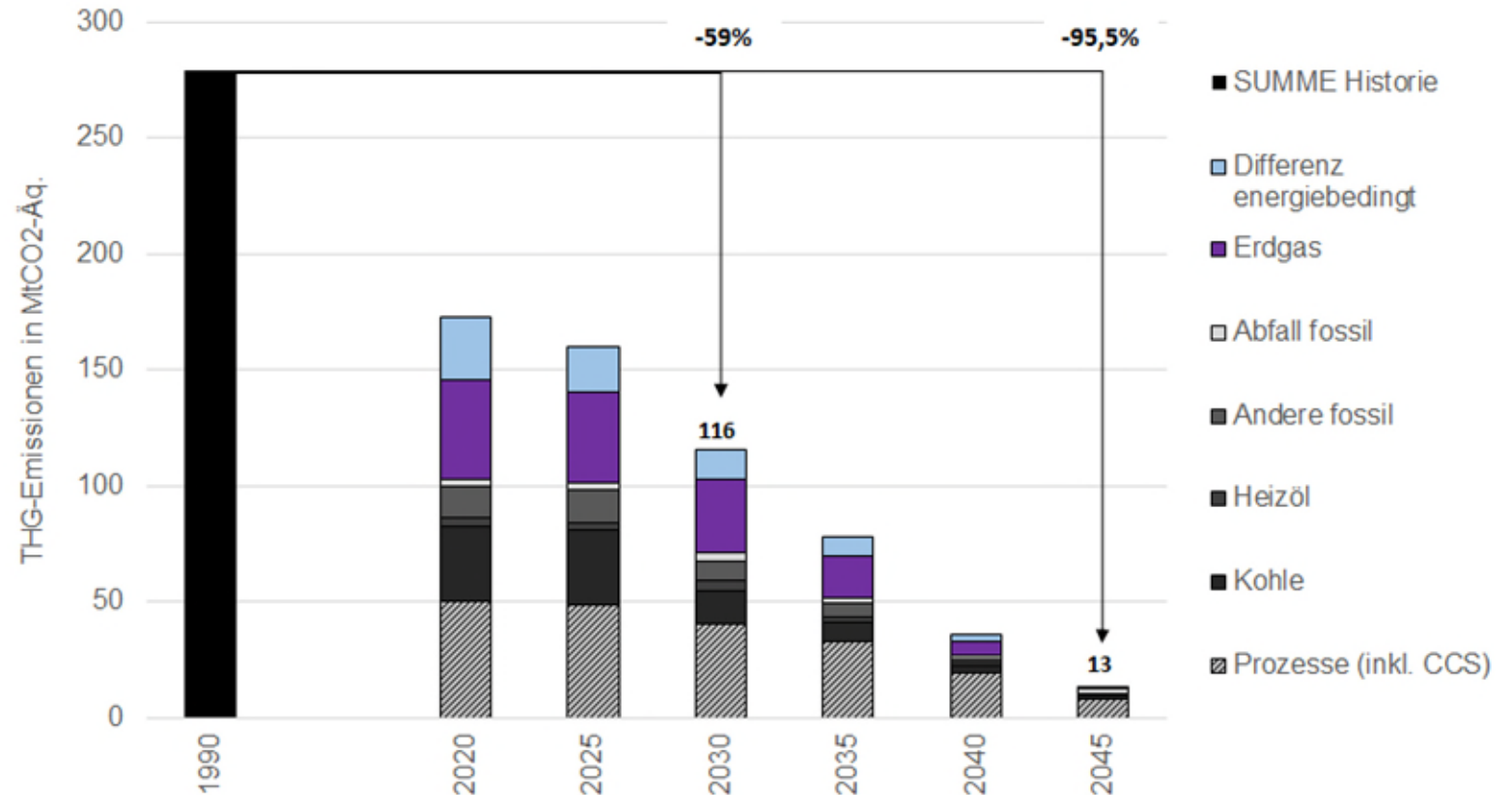


GEFÖRDERT VOM

NUR WENIGE SCHWER VERMEIDBARE EMISSIONEN VERBLEIBEN IN 2045

- › Leichte **Übererfüllung** in 2030
- › **Verbleibende Emissionen** in 2045:
 - › **Fossiler Abfall** (2 Mt)
 - › andere fossile (1,6 Mt)
 - › **Prozessemissionen** aus kleineren Quellen (8 Mt)
- › **~20 Mt abgeschiedene Emissionen** in der Zement- und Kalkindustrie

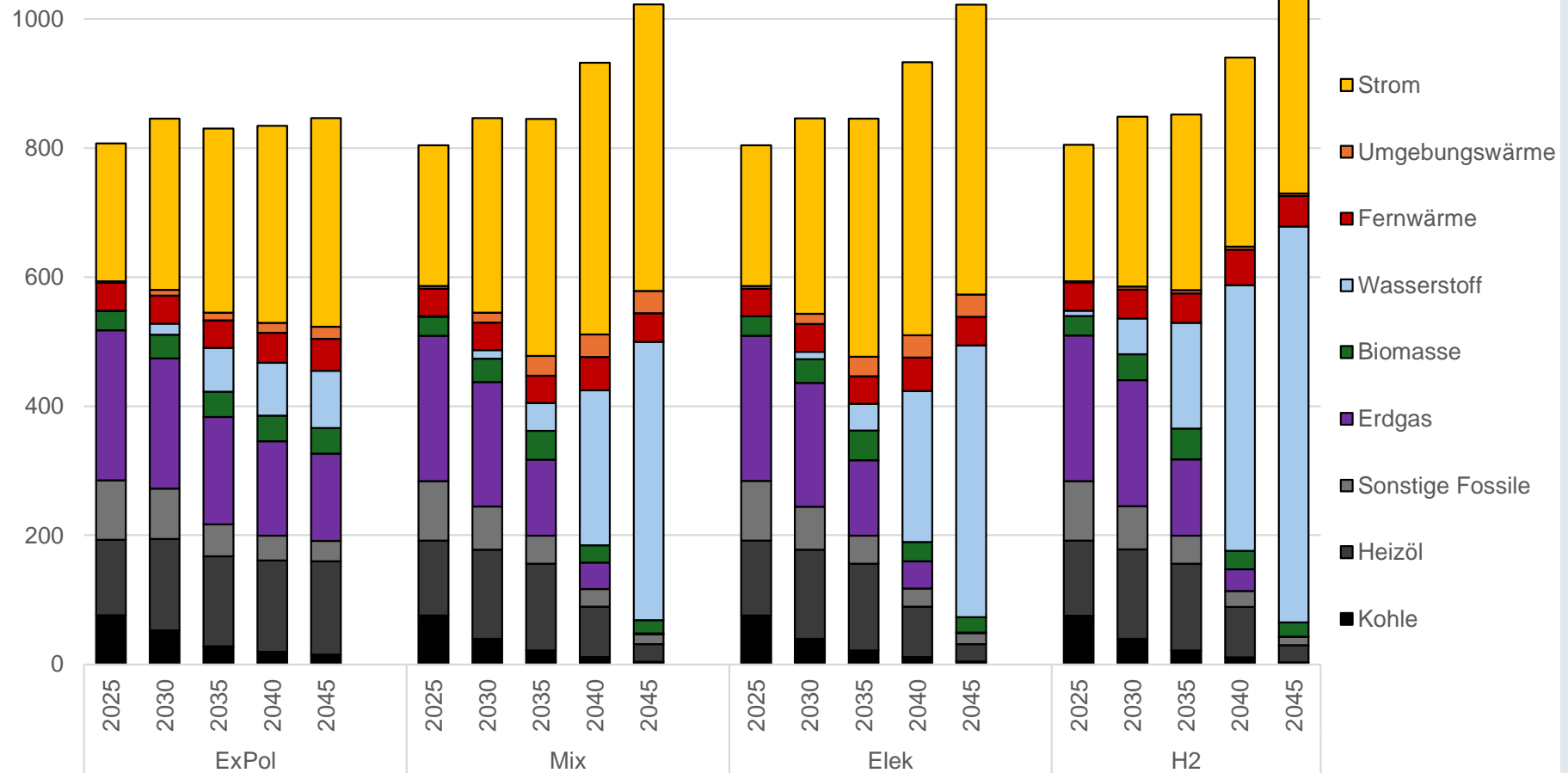
THG-Emissionen Industriesektor im Mix Szenario (1990-2045)
[MtCO₂äq]



GEFÖRDERT VOM

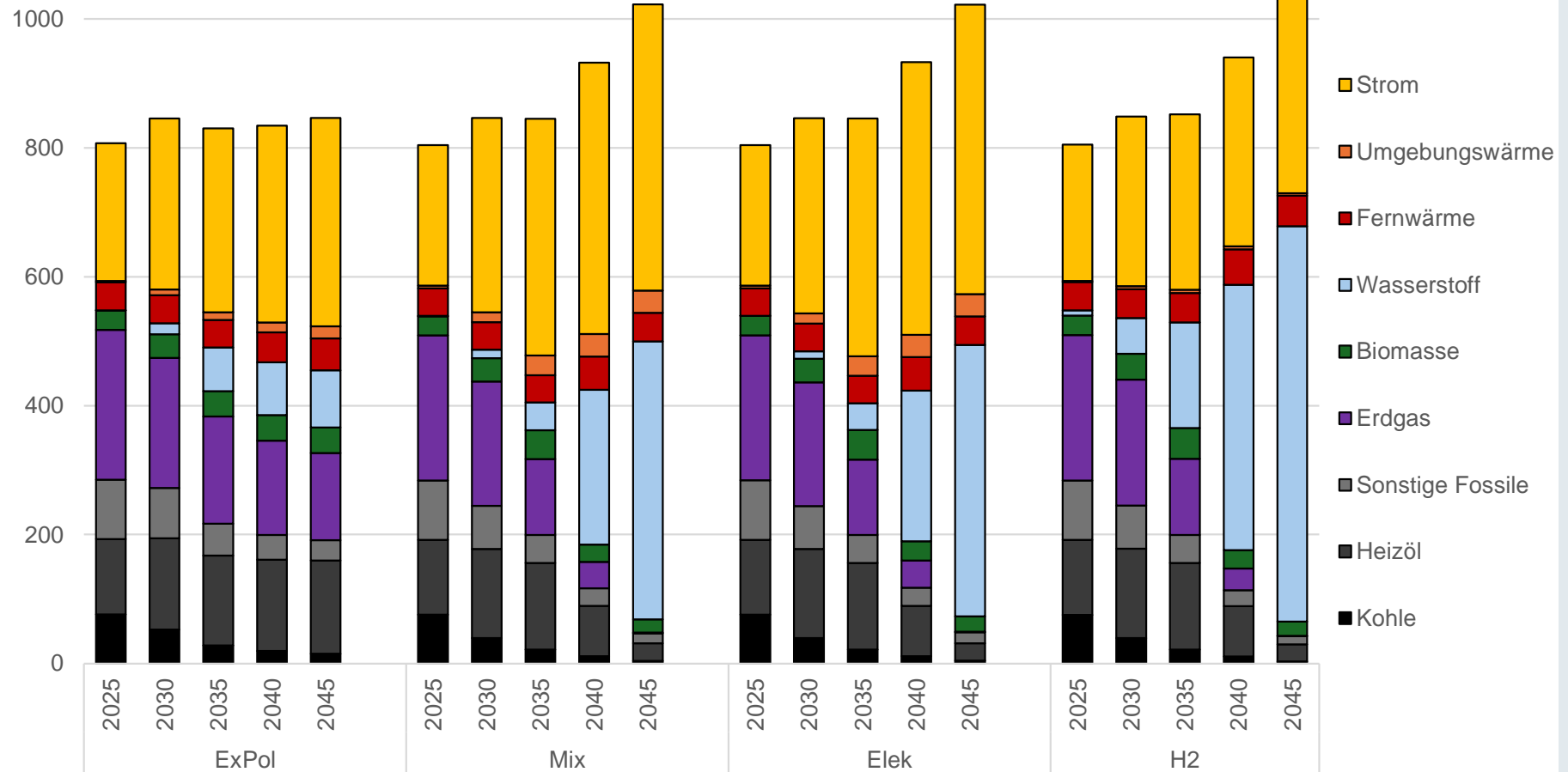
INDUSTRIEWENDE BENÖTIGT HOHE MENGEN AN CO2-NEUTRALEN ENERGIETRÄGERN

**Industrielle Energienachfrage: energetisch u. stofflich
(2025-2045) [TWh]**



INDUSTRIEWENDE BENÖTIGT HOHE MENGEN AN CO2-NEUTRALEN ENERGIETRÄGERN

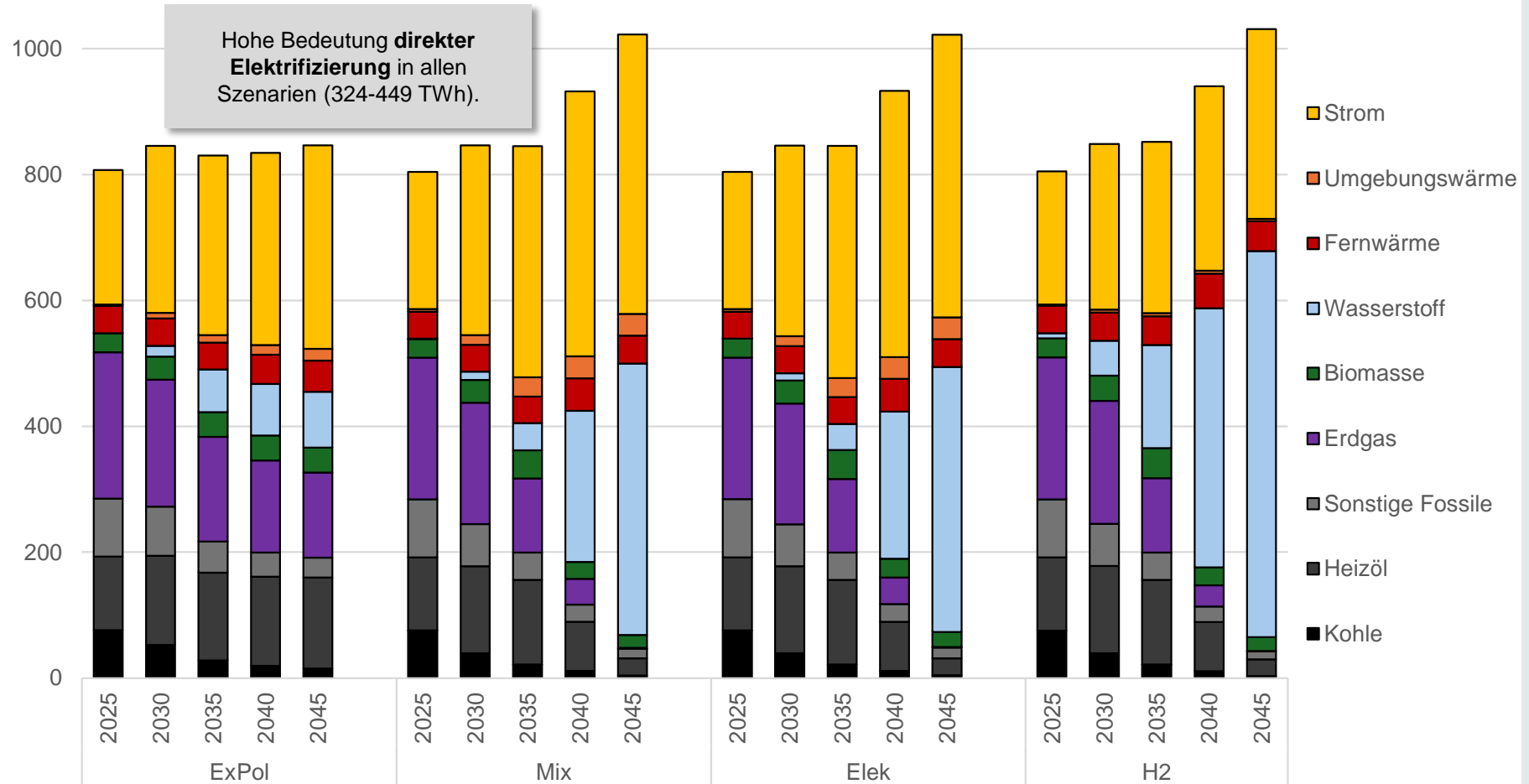
Industrieller Energienachfrage: energetisch u. stofflich
(2025-2045) [TWh]



Fossile sinken schnell. Es verbleibt die Nutzung fossilen Mülls in mit CO₂-Abscheidung ausgerüsteten Zementwerken (9-16 TWh).

INDUSTRIEWENDE BENÖTIGT HOHE MENGEN AN CO2-NEUTRALEN ENERGIETRÄGERN

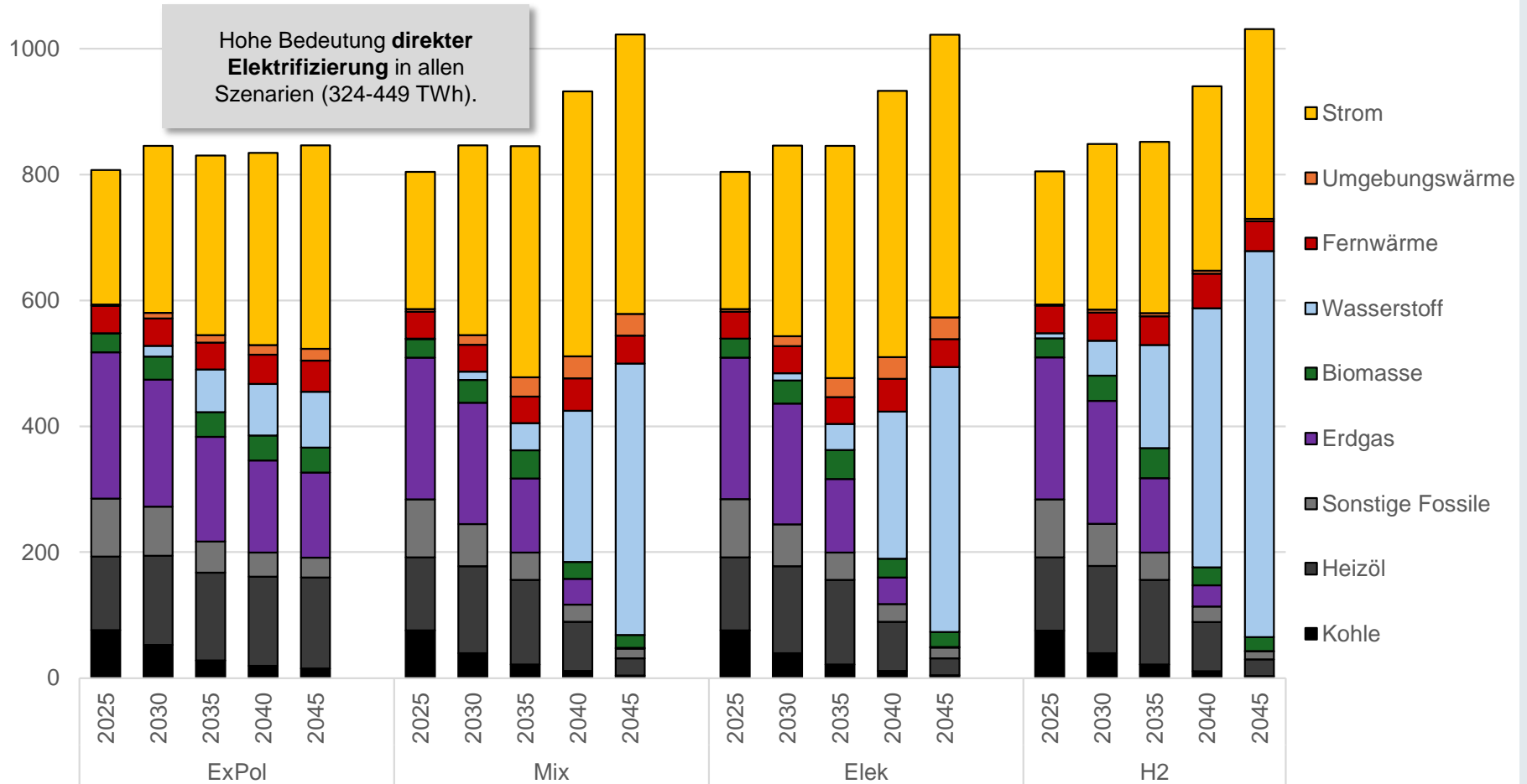
**Industrieller Energienachfrage: energetisch u. stofflich
(2025-2045) [TWh]**



Fossile sinken schnell. Es verbleibt die Nutzung fossilen Mülls in mit CO₂-Abscheidung ausgerüsteten Zementwerken (9-16 TWh).

INDUSTRIEWENDE BENÖTIGT HOHE MENGEN AN CO2-NEUTRALEN ENERGIETRÄGERN

Industrieller Energienachfrage: energetisch u. stofflich (2025-2045) [TWh]



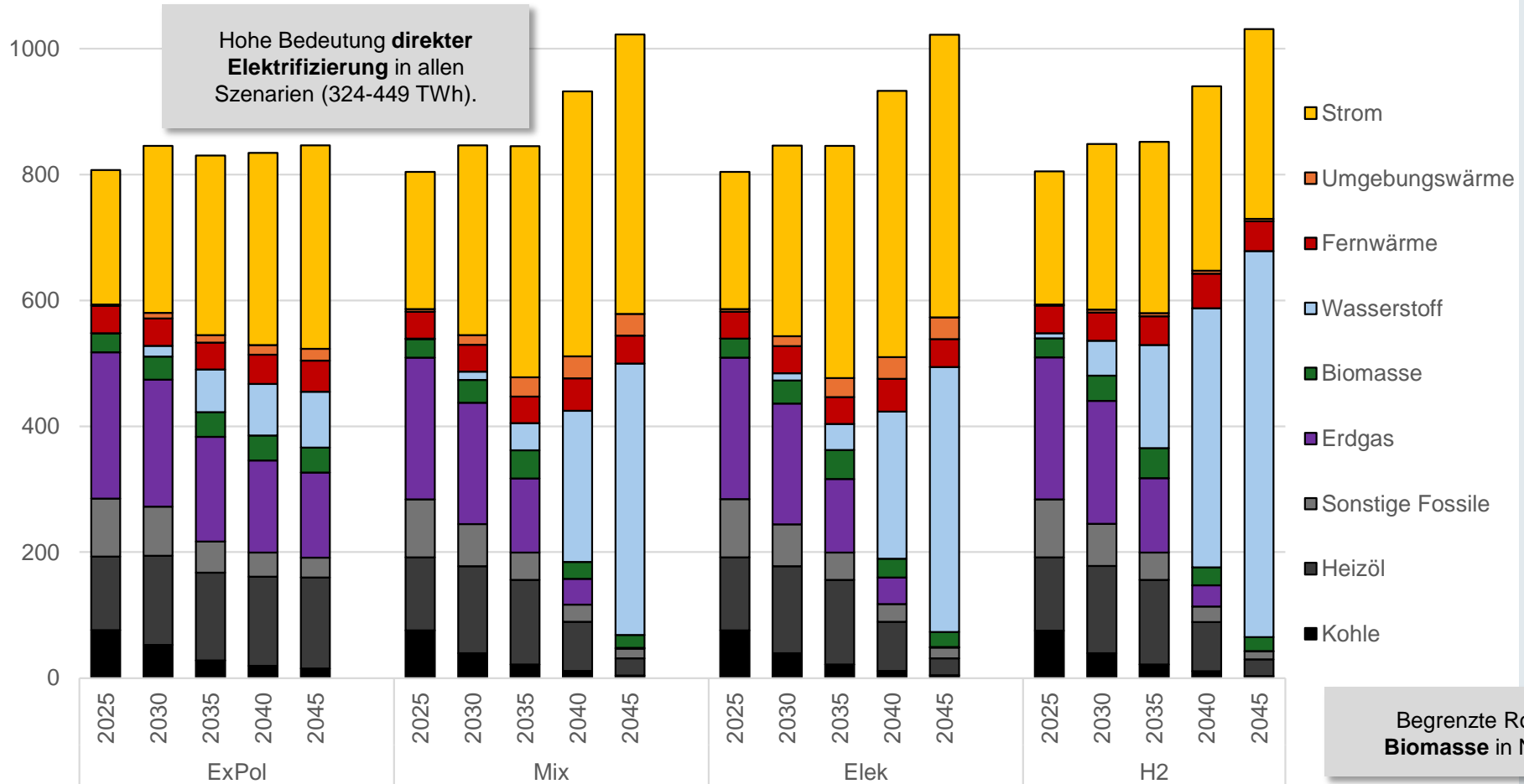
Robuster **energetischer Wasserstoffbedarf**, aber große Spannweite der möglichen Nutzung (74-271 TWh).

Stofflicher **Wasserstoffbedarf**, bei ganzheitlicher Nutzung sehr hoch (~340 TWh).

Fossile sinken schnell. Es verbleibt die Nutzung fossilen Mülls in mit CO₂-Abscheidung ausgerüsteten Zementwerken (9-16 TWh).

INDUSTRIEWENDE BENÖTIGT HOHE MENGEN AN CO₂-NEUTRALEN ENERGIETRÄGERN

**Industrieller Energienachfrage: energetisch u. stofflich
(2025-2045) [TWh]**



Robuster **energetischer Wasserstoffbedarf**, aber große Spannweite der möglichen Nutzung (74-271 TWh).

Stofflicher **Wasserstoffbedarf**, bei ganzheitlicher Nutzung sehr hoch (~340 TWh).

Begrenzte Rolle für **Biomasse** in Nischen

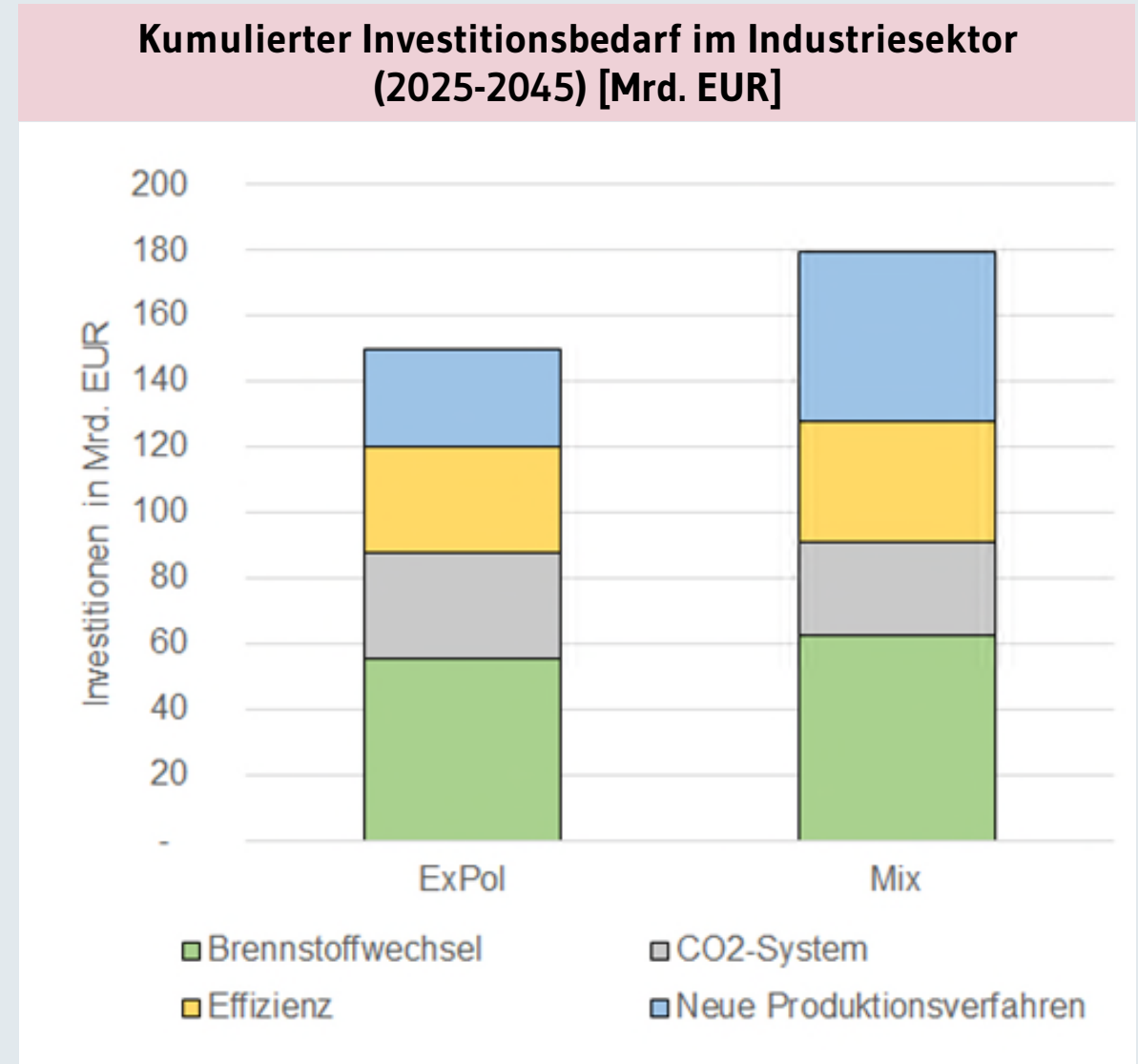
Fossile sinken schnell. Es verbleibt die Nutzung fossilen Mülls in mit CO₂-Abscheidung ausgerüsteten Zementwerken (9-16 TWh).

TRANSFORMATION VERLANGT EINE VIELZAHL AN INVESTITIONEN

Kategorie	Techniken	Voll- oder Differenzkosten
CO₂-System	CO ₂ -Abscheidung	Vollkosten
	CO ₂ -Transport	Vollkosten
	CO ₂ -Speicher	Vollkosten
Wärmeerzeuger/ Brennstoffwechsel	Dampf- und Warmwasser	Vollkosten
	Industrieöfen	Vollkosten
	Gebäudewärme	Vollkosten
Neue Prozesse	z.B. DRI-Stahl, El. Cracker, MtO, etc.	Vollkosten
Energieeffizienz	Querschnittstechniken: E-Motoren und Systeme, Dampfsysteme, Beleuchtung	Differenzkosten ggü. konventioneller Technik
	Prozesse	Differenzkosten
	Gebäudehülle	Differenzkosten
Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz	Nicht quantifiziert aufgrund unzureichender Datenlage	

TRANSFORMATION VERLANGT HOHE INVESTITIONEN VON UNTERNEHMEN

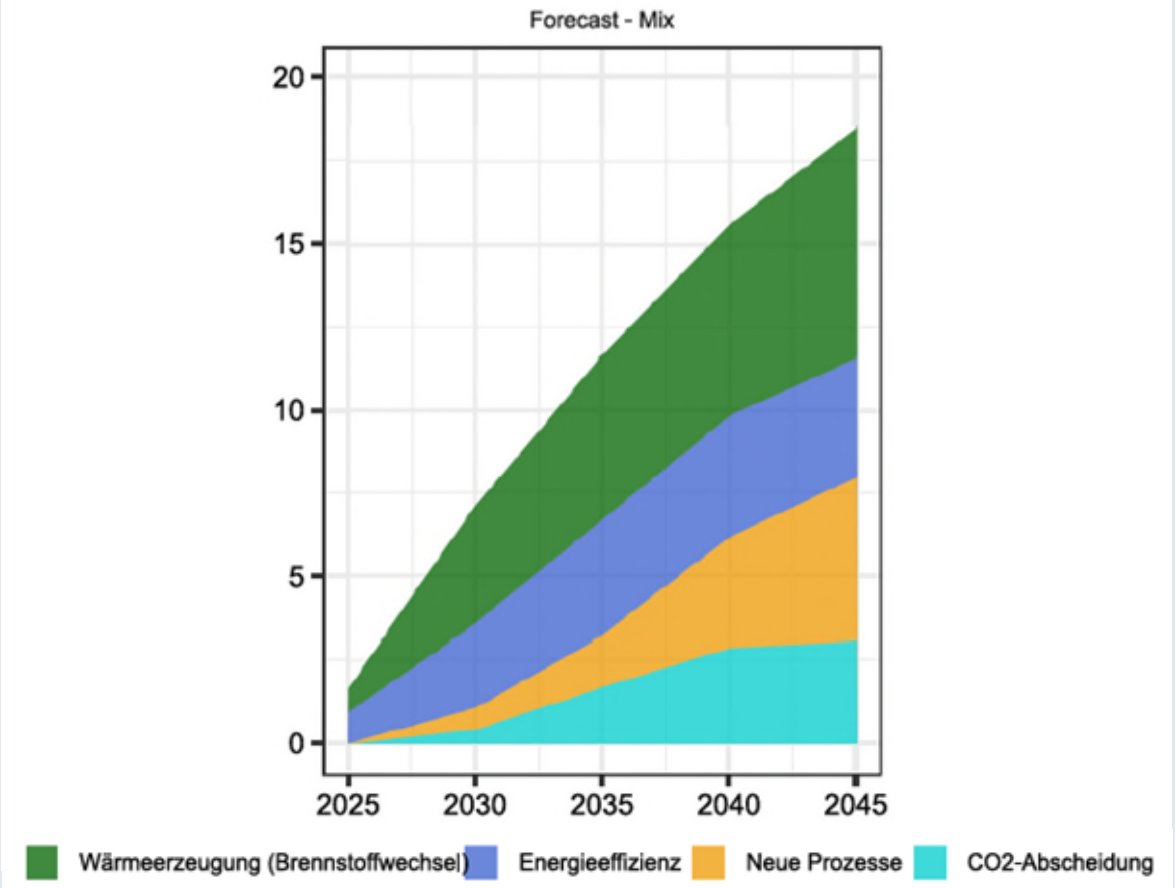
- › **180 Mrd. Euro kumulierte Investitionen in Technologiemix**
 - › +40 Mrd. ggü. ExPol
 - › ähnliche Größenordnung in Elek (183 Mrd. €)
 - › etwas niedrigerer Bedarf in H2 (168 Mrd. €)
- › **Brennstoffwechsel** (63 Mrd. €) und neue **Produktionsverfahren** (52 Mrd. €) dominieren Investitionsbedarf
- › **CO₂-System** 28 Mrd. € (v.a. Transportnetz)
- › Keine fossilen Re-Investitionen in den Szenarien



TENDENZIELL FRÜHERER INVESTITIONSBEDARF BEI ENERGIEEFFIZIENZ UND WÄRMEERZEUGERN

- › **Bis ~2035 dominieren:**
 - › Wärmeerzeuger in der **Prozesswärme**
 - › Verbesserung der **Energieeffizienz**
- › **2035 – 2045:**
 - › Aufbau der **CO₂-Infrastruktur inklusive Abscheidung**
 - › **Neue klimaneutrale Prozesse:**
Hohe Wasserstoffpreise drängen zu einer möglichst späten Investition in der Grundstoffchemie

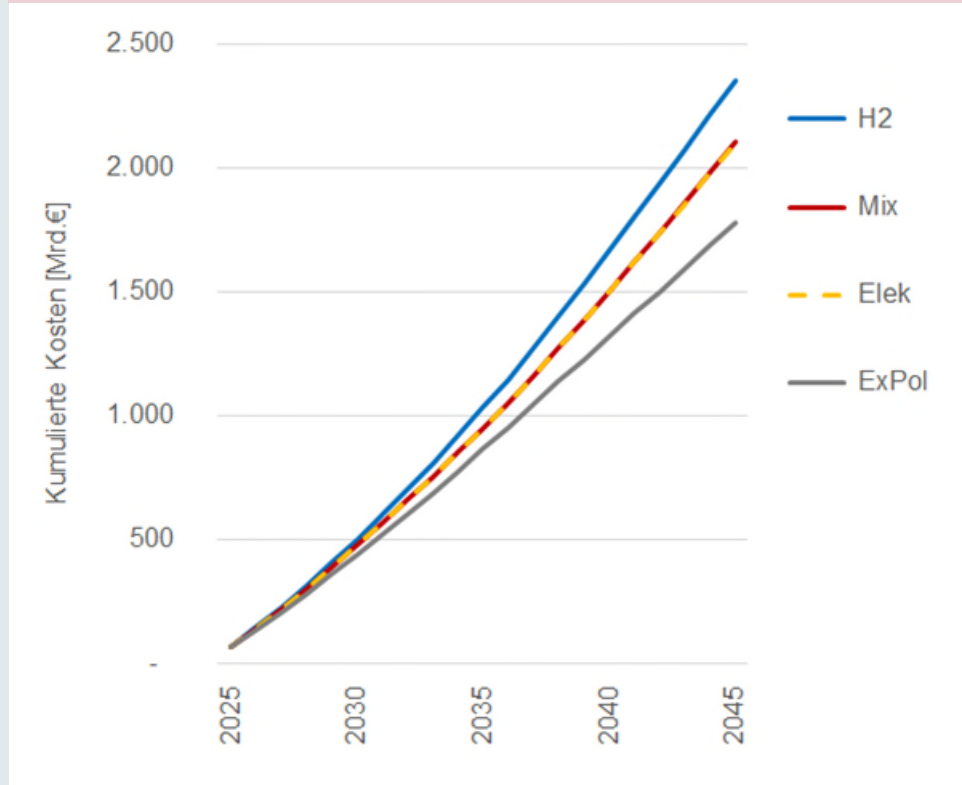
Kumulierter Investitionsbedarf im Industriesektor (2025-2045) [Mrd. EUR/a]



GEFÖRDERT VOM

KOSTEN DER TRANSFORMATION ZU EINER NAHEZU KLIMANEUTRALEN INDUSTRIE GEHEN ÜBER INVESTITIONEN HINAUS

Vergleich der kumulierten Kosten für Energie, CAPEX und CO₂ im Zeitverlauf [Mrd. EUR]



› Gesamte kumulierte Kosten:

- › ~ 2,1 bis 2,35 Bio. EUR in den Zielszenarien
- › 1,8 Bio. EUR in ExPol
- › enthalten aber auch den Strombedarf bereits elektrifizierter Anlagen

› Fokus Wasserstoff:

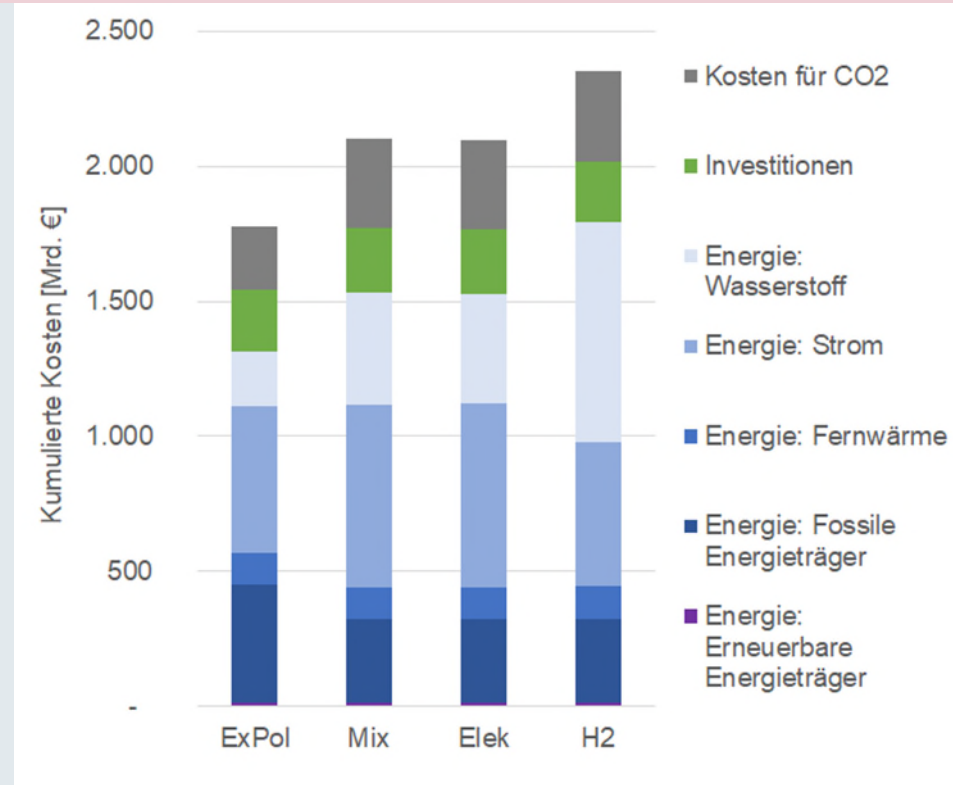
- › 250 Mrd. EUR über Mix und Elek
- › Annahme höhere Preise für Wasserstoff gegenüber Strom
- › Ggf. geringere Anlageinvestitionen können diese Mehrkosten nicht kompensieren

GEFÖRDERT VOM

ENERGIEKOSTEN ENTSCHEIDEND FÜR DIE WIRTSCHAFTLICHKEIT DER TRANSFORMATION ZUR KLIMANEUTRALEN INDUSTRIE

Vergleich der kumulierten Kosten für Energie, CAPEX und CO₂ nach Kategorie [Mrd. EUR]

- › **Gesamte kumulierte Kosten:**
 - › 73% - 76% sind Energiekosten
 - › 10 – 13% Investitionen
- › **Energiekosten steigen durch Wechsel auf „teure“ Energieträger**
 - › Preise von Strom und Wasserstoff ausschlaggebend
- › Weitere Kostenkomponenten wie Rohstoffbezug, Personal, etc. nicht berücksichtigt



GEFÖRDERT VOM

UNTERSCHIEDE DER KOSTENENTWICKLUNG ZWISCHEN EINZELNEN BRANCHEN SIND ERHEBLICH

**Vergleich der Änderung der spezifischen jährlichen Kosten bezogen auf die BWS der Branchen
(5-Jahresmittel für Technologiemix ggü. Kosten in 2025)**

	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2045
Grundstoffchemie	113%	116%	118%	119%
Metallerzeugung	100%	98%	96%	96%
Glas u. Keramik	80%	82%	81%	82%
Verarbeitung v. Steine u. Erden	85%	80%	77%	75%
NE-Metalle, -gießereien	39%	40%	39%	38%
Sonstige chemische Industrie	28%	25%	21%	12%
Metallbearbeitung	11%	10%	10%	9%
Papiergewerbe	8%	8%	7%	7%
Ernährung und Tabak	2%	1%	0%	-1%
Sonstige Wirtschaftszweige	0%	0%	-1%	-2%
Gummi- u. Kunststoffwaren	-4%	-5%	-6%	-7%
Fahrzeugbau	-5%	-6%	-6%	-7%
Maschinenbau	-6%	-6%	-7%	-8%

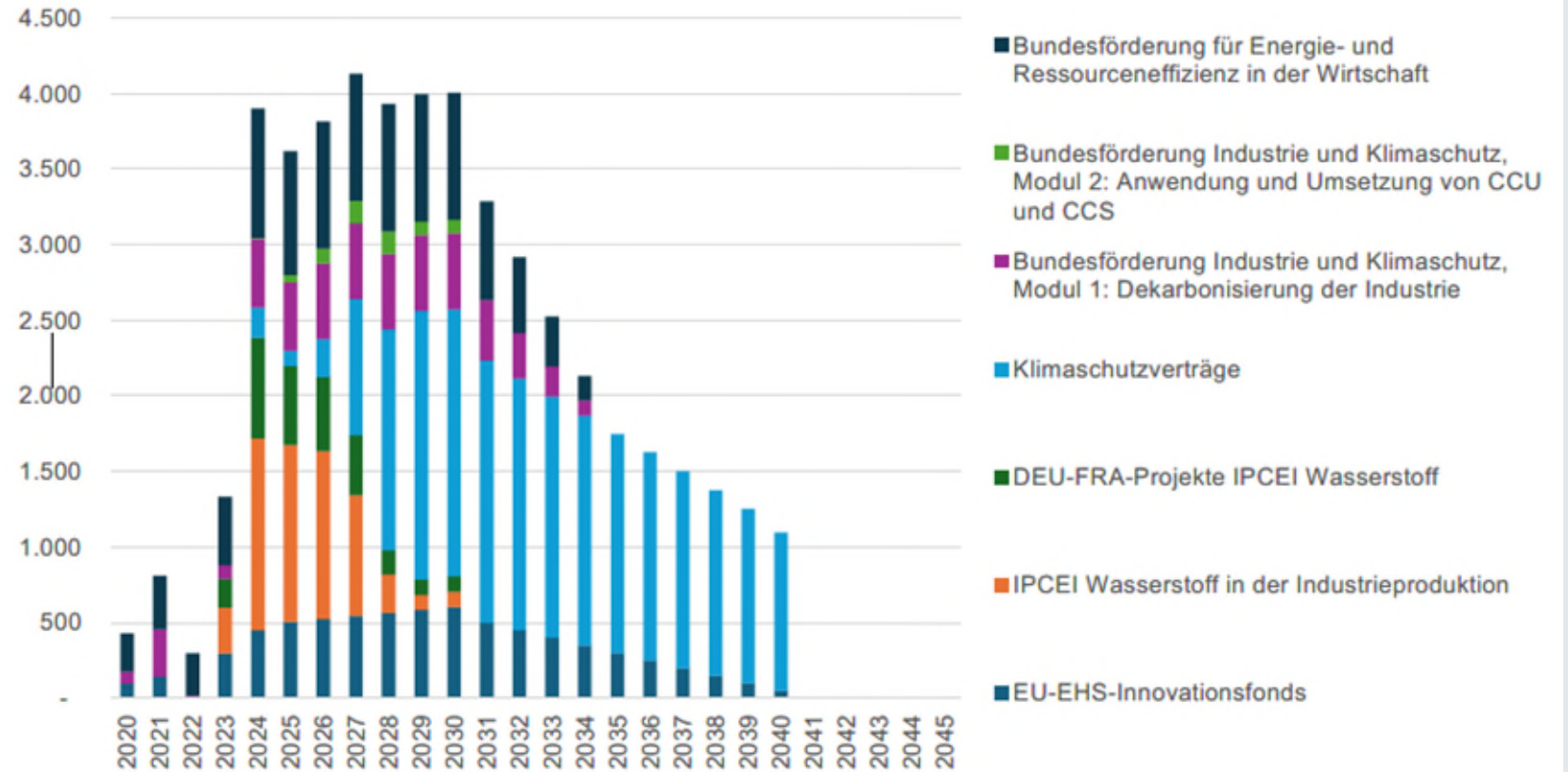
GEFÖRDERT VOM



VERFÜGBARE BUDGETS DER INSTRUMENTE

Jährliche Budgets der Förderprogramme zur Industriedekarbonisierung im Zeitverlauf [Mrd. EUR]

- › **Schätzung der Förderbudgets:**
 - › 30 Mrd. Euro kumulierte Förderung bis 2030
 - › Zusätzliche 20 Mrd. Euro bis 2040
- › **Mehrkosten** die über ExPol hinausgehen **nicht berücksichtigt**
- › Förderprogramme haben häufig **spezifische Anforderungen** an die Mittelvergabe



GEFÖRDERT VOM

KLIMANEUTRALITÄT IN 2045 IST MÖGLICH, ABER MIT UNSICHERHEITEN VERBUNDEN

- › **THG-Minderung von ~96% ggü. 1990** im Industriesektor erreicht, Restemissionen in einzelnen Prozessen
- › **Unterschiede zwischen den Technologieszenarien** zeigen Unsicherheiten :
 - › **Dampferzeugung:** Elektrifizierung und Wasserstoff beides technisch möglich, jedoch jeweils noch vor großen Herausforderungen (Energiepreise, Infrastruktur, Kosten)
 - › **Zukünftige Wertschöpfungsketten in der Grundstoffchemie:**
Bedeutung der Importe von Zwischenprodukten, Verfahrensrouten, Hochskalierung Sekundärproduktion
- › Robustere Pfade scheinen bei den **Branchen Stahl und Zement** erkennbar:
 - › **Abscheidung prozessbedingter Emissionen** verfestigt sich als wahrscheinlicher Pfad.
Alternative Ansätze über andere Nachhaltigkeitsstrategien.
 - › **Umbau zur H₂-basierten Stahlherstellung** bereits in weiten Teilen angestoßen

GEFÖRDERT VOM



KLIMANEUTRALITÄT IN 2045 IST MÖGLICH, ABER MIT HERAUSFORDERUNGEN VERBUNDEN

- › **Deutliche Steigerung der energiebedingten Kosten** in Zielszenarien, welche die Industrie stark unter Druck setzen werden.
- › Im Vergleich zur fossilen Produktion ist insbesondere der Einsatz von Wasserstoff mit hohen zusätzlichen Energiekosten belastet (202 Mrd. € in Fokus H₂)
- › Die Entwicklung der **Preise für Strom und Wasserstoff spielen** hier eine **zentrale Rolle** um Kosten zu reduzieren.
- › **Stärkere Elektrifizierung** zeigt deutlich niedrigere Kosten als ein hoher Wasserstoffeinsatz.
- › **Stärkung der Kreislaufwirtschaft** sowie **beschleunigte Effizienz** können die Kosten für „teure“ Energieträger deutlich senken.
- › **Besonders hohe Belastungen** werden für die Branchen Grundstoffchemie, Metallerzeugung, Glas- und Keramikherstellung, und die Zement- und Kalkindustrie.

VIELEN DANK!

Dr. Andrea Herbst

Leitung Geschäftsfeld Energieeffizienz
Abteilung Energietechnologien und Energiesysteme
Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI
Breslauer Straße 48 | 76139 Karlsruhe | Germany
Phone +49 721 6809-439 | Fax +49 721 6809-439
mailto: andrea.herbst@isi.fraunhofer.de
<https://www.isi.fraunhofer.de/de/themen/wasserstoff.html>
<http://www.forecast-model.eu>



GEFÖRDERT VOM

