LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND

Treibhausgasneutrale Szenarien 2045 - Industriesektor

Webinar Industrie, 16.11.2022

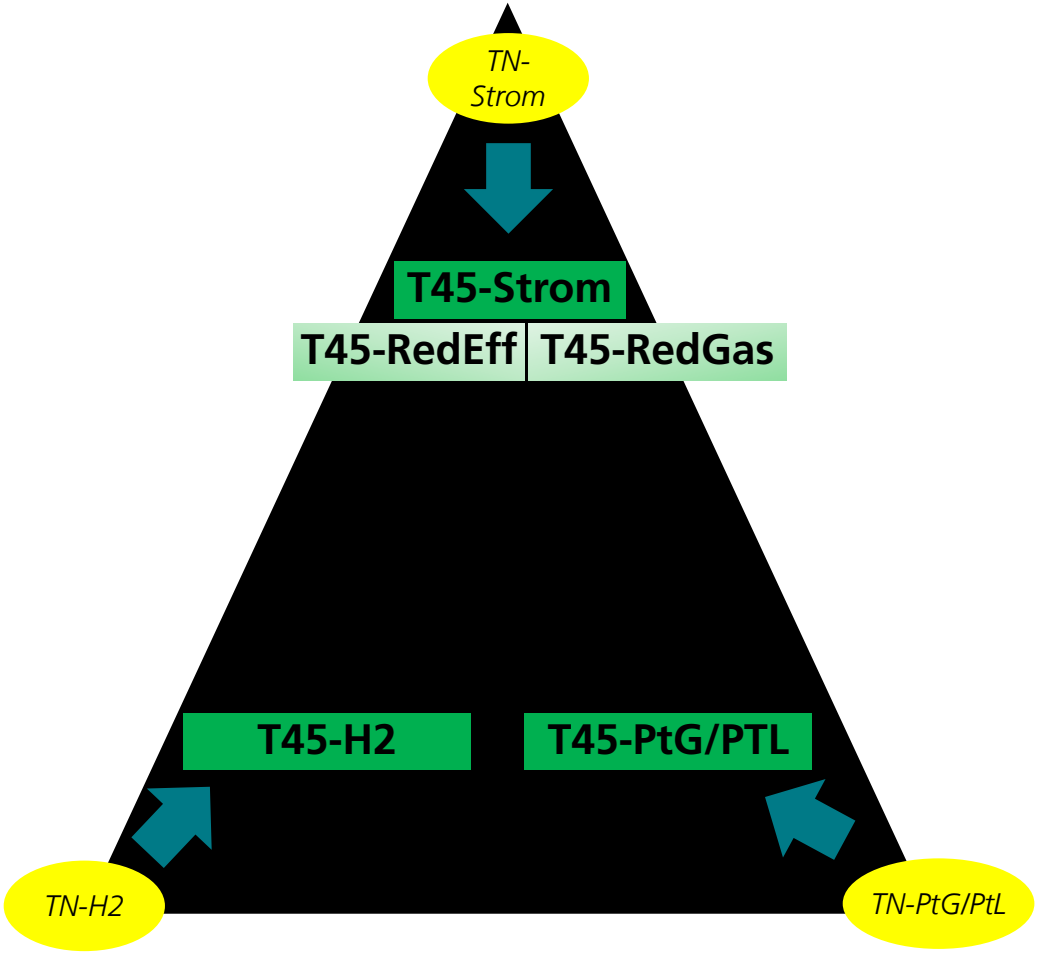
Foto Ant Rozetsky auf Unsplash

Bearbeitet von

- Tobias Fleiter: Sektorkoordination
- Matthias Rehfeldt: Modellintegration
- Pia Manz: Regionalisierung
- Marius Neuwirth: Wasserstoff
- Andrea Herbst: Circular Economy
- Thurid Lotz: Circular Economy

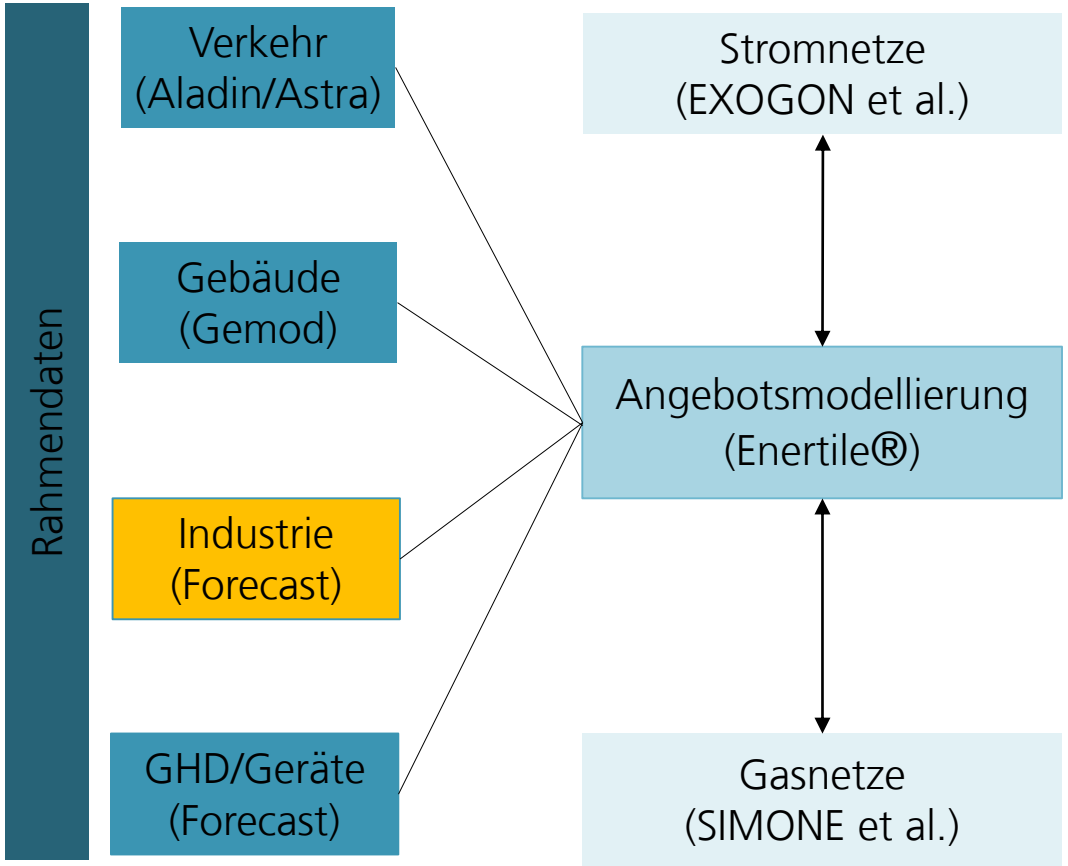
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Methodik & Szenariodesign
Erkenntnisgewinn durch Vergleich und Lernen



- **Zentrale Fragestellung:**
  - Welche techno-ökonomischen Wirkungen haben bestimmte Pfade zur Dekarbonisierung des Energiesystems?
- **Vorgehensweise:**
  - Vergleich der Dekarbonisierung des Energiesystems durch
    - starken Einsatz von Strom (*Szenario T45-Strom*)
    - starken Einsatz von Wasserstoff (*Szenario T45-H_2*)
    - starken Einsatz von synthetischen Kohlenwasserstoffen (*T45-PtG/PtL*)
    - weniger Energieeffizienz (*Szenario T45-RedEff*)
    - weniger Gasverbrauch in der Transformation *(Szenario T45-RedGas)*
  - Modellierung des Transformationspfades bis 2045 mit detaillierten bottom-up Modellen
- **Mission der Langfristszenarien:**
  - Methodisch und inhaltlich lernender Prozess, um den Lösungsraum für ein treibhausgasneutrales Energiesystem immer besser „auszuleuchten“

Modellsystem
Gekoppelte Modelle erlauben hoch aufgelöste Analysen

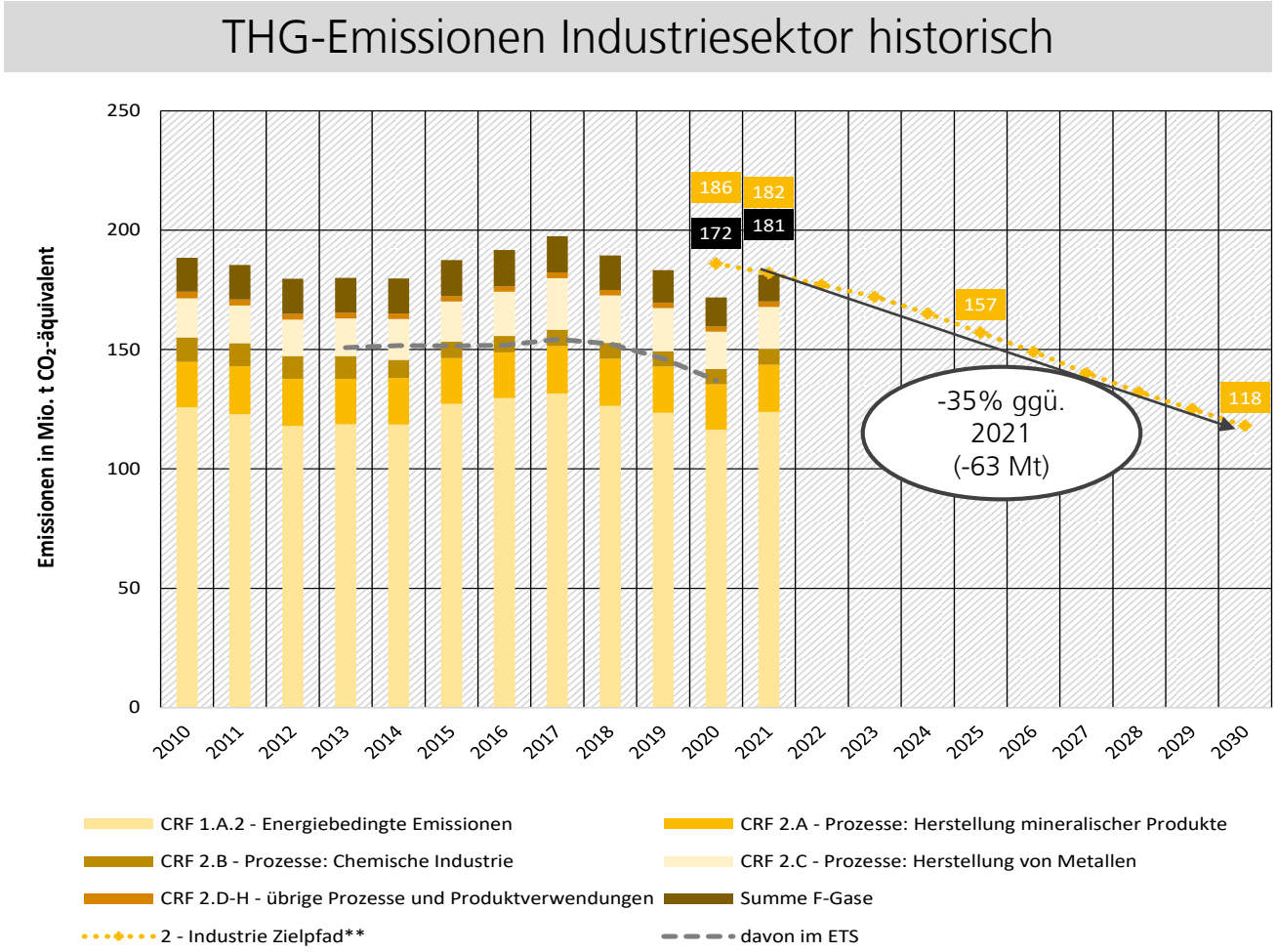


- **Vorgehensweise**
  - Detaillierte Modelle berechnen Energienachfrage
  - Energienachfrage wird **regionalisiert**
  - Potentiale Erneuerbarer Energien werden in hoher räumlicher und **zeitlicher** (stundenscharf) Auflösung berechnet
  - Bereitstellung der Energie wird optimiert und mit Netzmodellen iteriert
  - Auslegung der **Netze** wird berechnet
- **Einordnung**
  - Sehr hohe Auflösung des Energiesystems
    - Beispiel Enertile (Optimierung Angebot)
      - > 188 Millionen Erzeugungsvariablen
      - Größe des Gleichungssystems > 6,8 Mio. Schreibmaschinenseiten
  - Modellkette sehr rechenintensiv und aufwändig

Agenda Industrie

1. Szenariodefinition, Methodik und Annahmen
2. Ergebnisse
    1. Zielerreichung THG-Emissionen
    2. Überblick Energiebedarf
    3. Feedstocks und CCUS
    4. Strom, Wasserstoff, PtG/PtL
    5. Sensitivitäten: T45-RedEff und T45-RedGas
3. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Status-Quo: THG-Emissionen im Industriesektor stagnieren

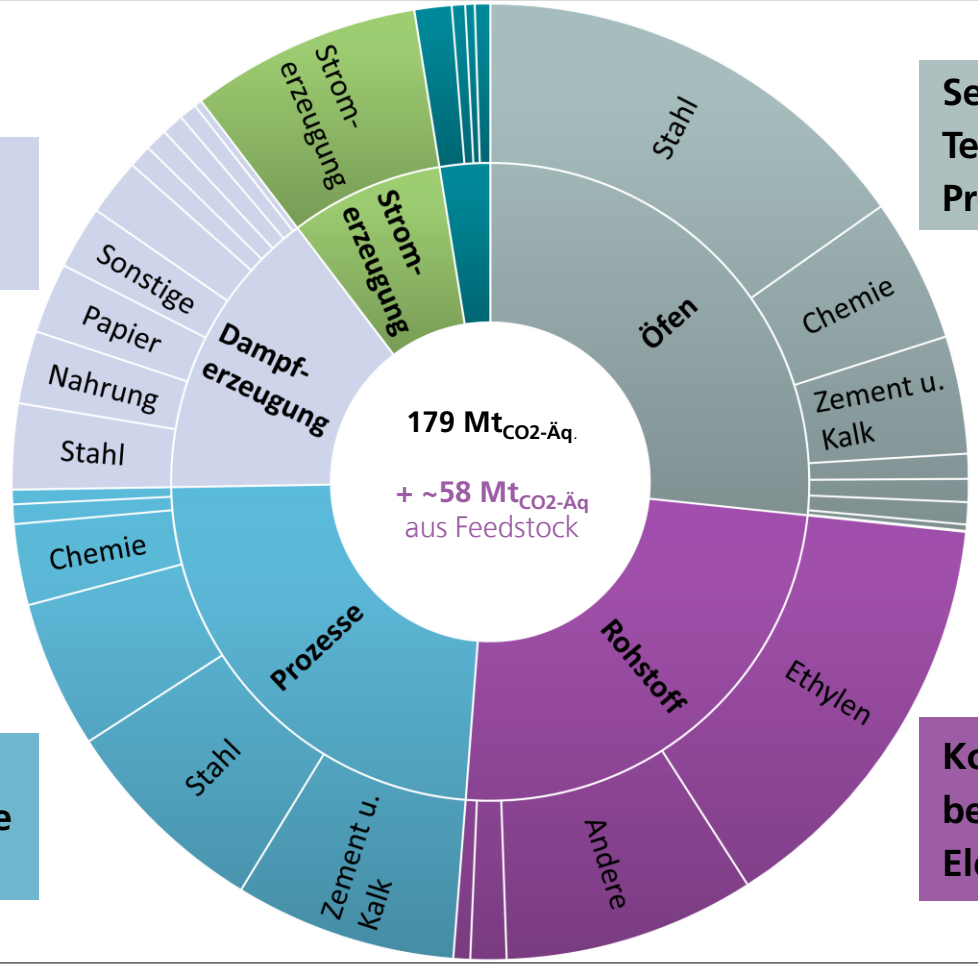


- **Jahresemissionsmenge 2030 laut KSG**
  - 118 $Mt_{CO2-Äq.}$ in 2030
  - Entspricht Minderung um 35% bzw. 63 Mt CO_{2eq} gegenüber 2021
  - Und 58% gegenüber 1990
- **Inklusive Emissionen aus**
  - Feuerungen
  - Prozessen
  - KWK
  - F-Gase
  - Produktverwendung

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Vielfältige Herausforderungen

THG-Emissionen Industrie in 2019 nach Anwendungen



Stark von Erdgas abhängig

Sehr hohe Energiedichte und Temperaturen, Öfen in Produktionsprozess integriert

Vermeidung (meist) nicht möglich ohne grundsätzliche Prozessumstellung

Kohlenstoff als Rohstoff benötigt – direkte Elektrifizierung nicht möglich

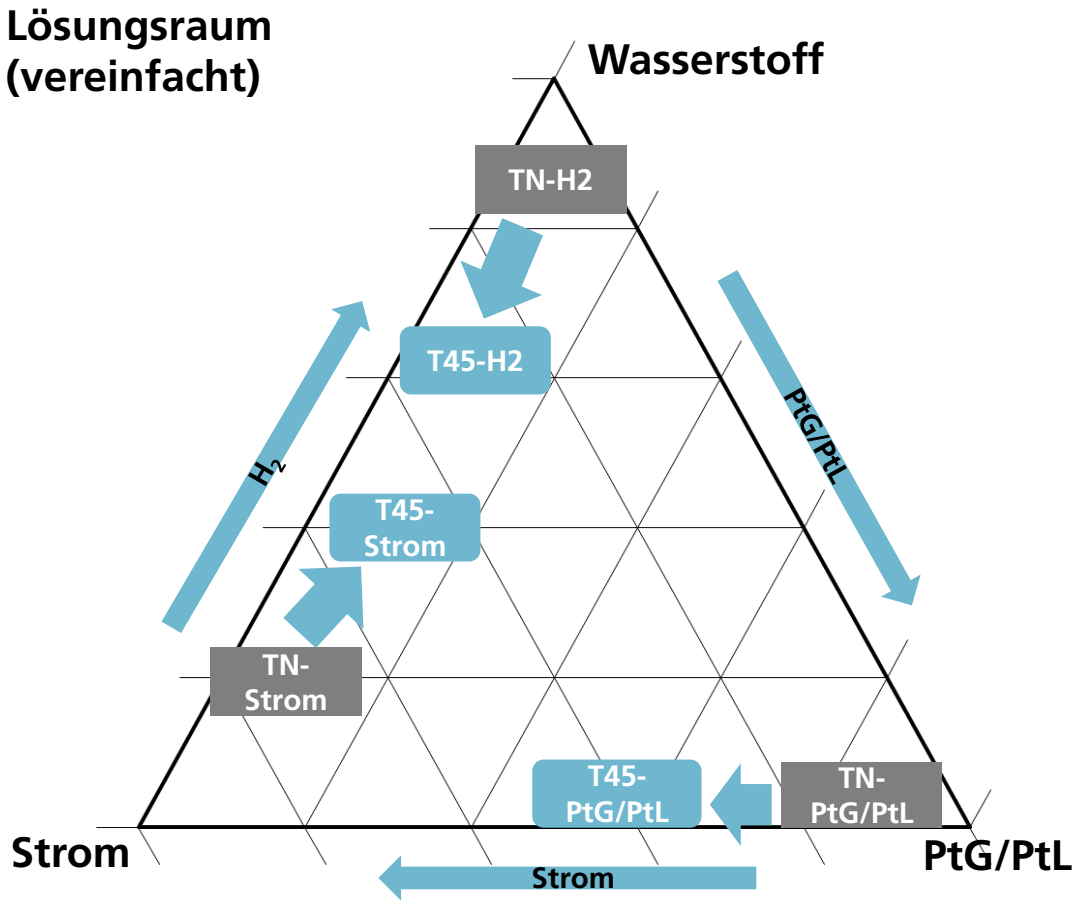
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Szenarionarrative

T45-Szenarien engen den Lösungsraum der TN-Szenarien weiter ein

- TN-Szenarien (2021)
  - Sehr starke Ausprägung der jeweiligen Technologiepfade
  - Breiter Lösungsraum

- T45-Szenarien (2022)
  - Annäherung H_2 und Strom
  - Anteile PtL zur rohstofflichen Nutzung in T45-Strom und T45-H2
  - PtG/PtL mit mehr direkter Elektrifizierung



Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Wichtige Neuerungen in den T45 Szenarien (vergleichen mit den TN-Szenarien)

Entwicklungen im Umfeld

- **„Neue“ Ziele des Klimaschutzgesetzes von 2021**
  - Schnellere Markteinführung bei klimafreundlichen Prozessen nötig
  - Deutlich höherer Strom- und H_2-Verbrauch bis 2030
- **Koalitionsvertrag**
  - Starke Richtungsentscheidung für H_2
  - Ausbauziele Erneuerbarer erlauben schnelle Elektrifizierung der Prozesswärme
- **Coronakrise**
  - Update von Produktionsmengen und Wertschöpfung bis 2020/2021
  - Mittelfristig (bis 2025-30) Annahme, dass eine nahezu vollständige Erholung stattfindet
- **Gaskrise, Ukraine-Krieg, RePowerEU**
  - Starker kurzfristiger Anstieg beim Gaspreis hinterlegt
  - Weitere Untersuchung in T45-RedGas

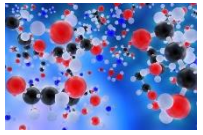
Wichtige neue Annahmen

- **Überarbeitung Technologieannahmen**
  - Zement: Weniger neue Bindemittel, mehr biogene Brennstoffe
  - Stahl: Schnellere Diffusion von DRI und Einsatz von Erdgas im Übergang und langsamerer Fortschritt bei Sekundärstahl
  - Chemie: Aufnahme von elektrischen Steamcrackern mit importiertem grünem Naphtha
- **Aufnahme von Batteriefabriken**
  - Produktion sehr energieintensiv und viele Anlagen angekündigt
- **Überarbeitung stofflicher Bedarf der Chemie**
  - Neue Methodik führt zu höherem Energiebedarf für stoffliche Nutzung
  - Weiterhin große Unsicherheiten und wenig Informationen
- **Weitere Verbesserungen**
  - Überarbeitung einzelner Kostenannahmen (CO_2-Netz, DRI-Stahl)
  - Etwas moderatere Annahmen zum Fortschritt bei Materialeffizienz und Circular Economy

THG-neutrale Szenarien differenzieren Energieversorgung

Wichtige Annahmen für alle T45-Szenarien

	T45-Strom	T45-PtG/PtL	T45-H2
Ziel THG Minderung 2045	Mindestens 95 % gegenüber 1990 für den Industriesektor (dabei THG-Neutralität Gesamtsystem in 2045 nach Klimaschutzgesetz vom August 2021)		
Ziel THG Minderung 2030	Mindestens 58 % Minderung bzw. 118 Mio. t CO_{2eq} (Nach Klimaschutzgesetz vom August 2021		
Wirtschaftswachstum	Kontinuierlich, ~1 % pro Jahr		
Biomasse	Energetischen Einsatz minimieren		
Energie-, Materialeffizienz und Circular Economy	Ambitionierter Anstieg		
CCS und CCU	Einsatz, wo Alternativen schwierig sind -> Fokus Zement- und Kalkwerke		
Prozess-, Brennstoff- und Rohstoffwechsel	Priorität direktelektrisch	Priorität PtG	Priorität Wasserstoff



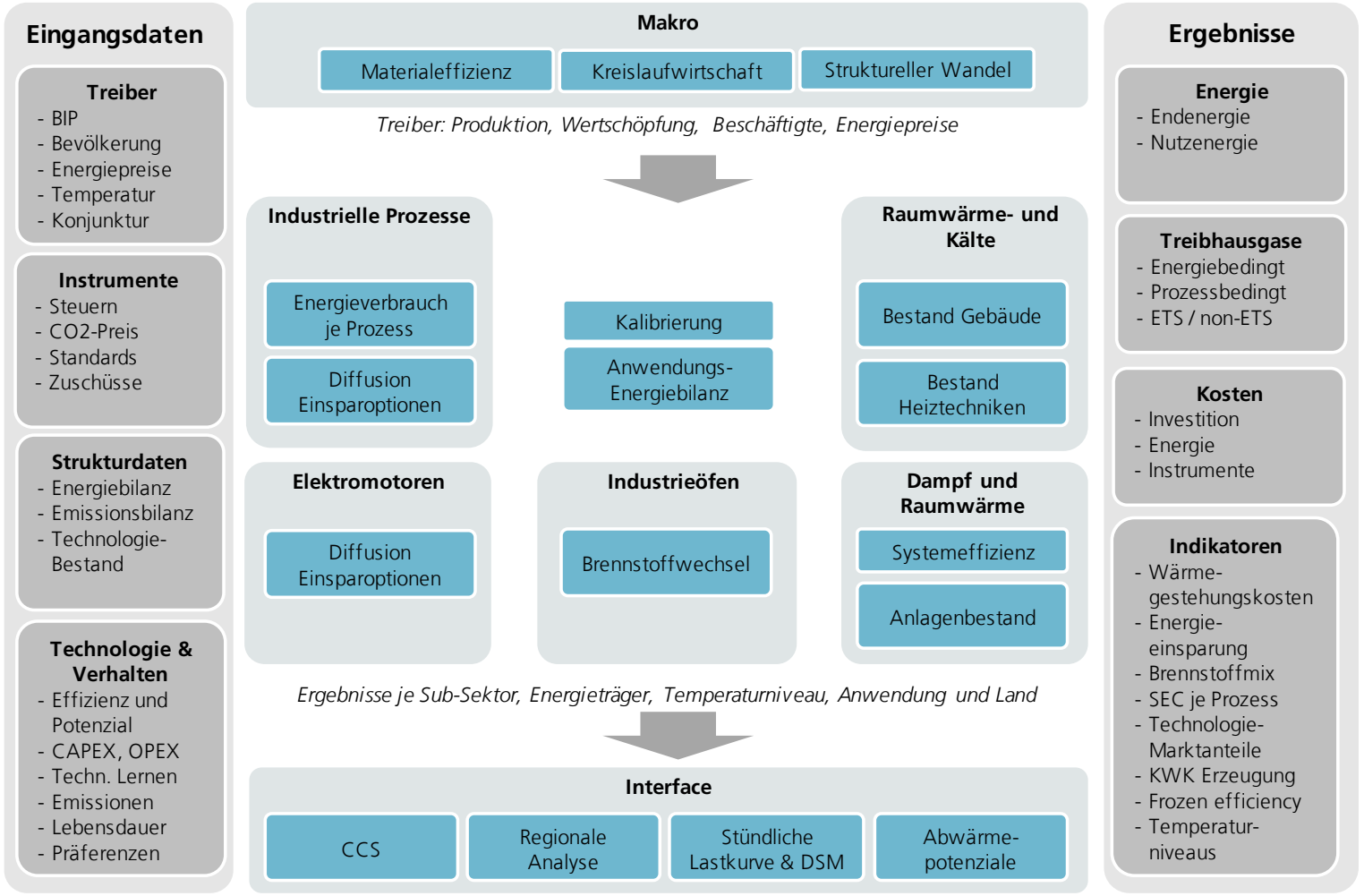
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Methodik

Methodik: Simulationsmodell FORECAST

Bottom-up Simulation

- Hohe Technologie-Auflösung
- Wichtige Vermeidungshebel
- Preissensitivität
- Vollständige Energie- und THG-Bilanz
- Nachgelagerte Regionalisierung



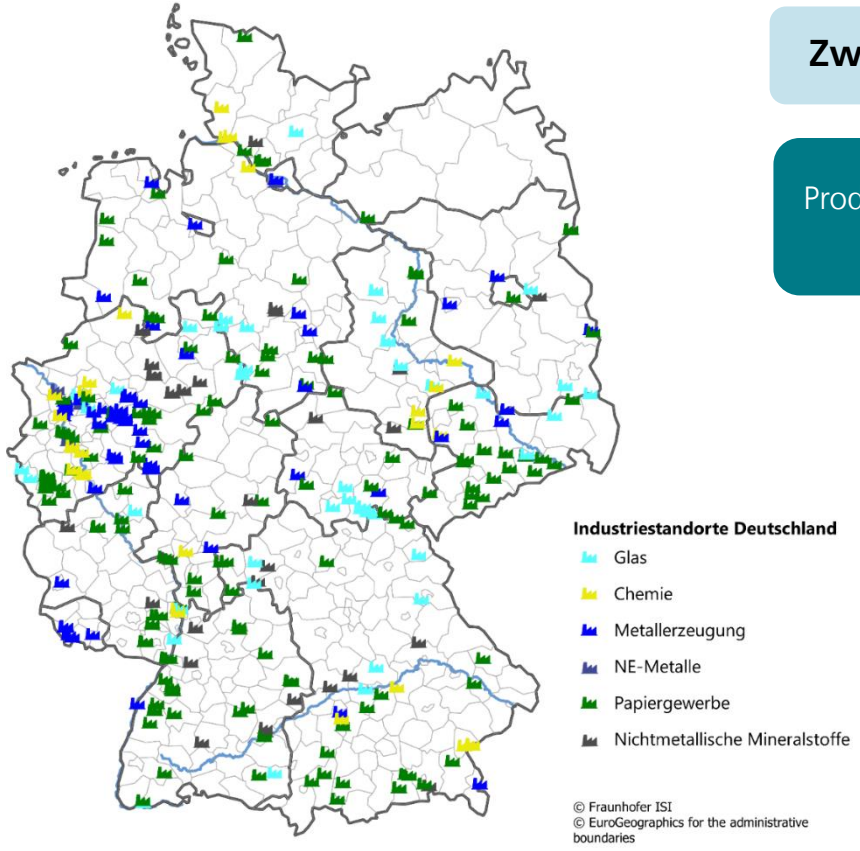
https://www.forecast-model.eu

FORECAST
FORecasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Nachgelagerte Regionalisierung basiert auf zwei Datengrundlagen

Energieintensive Industrie

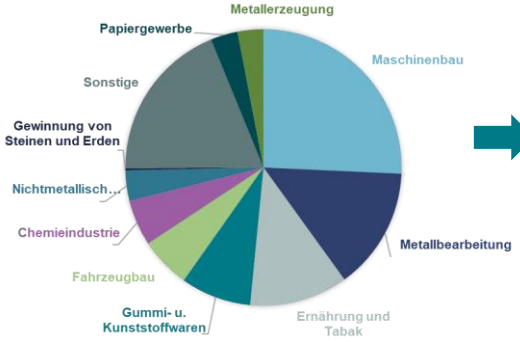


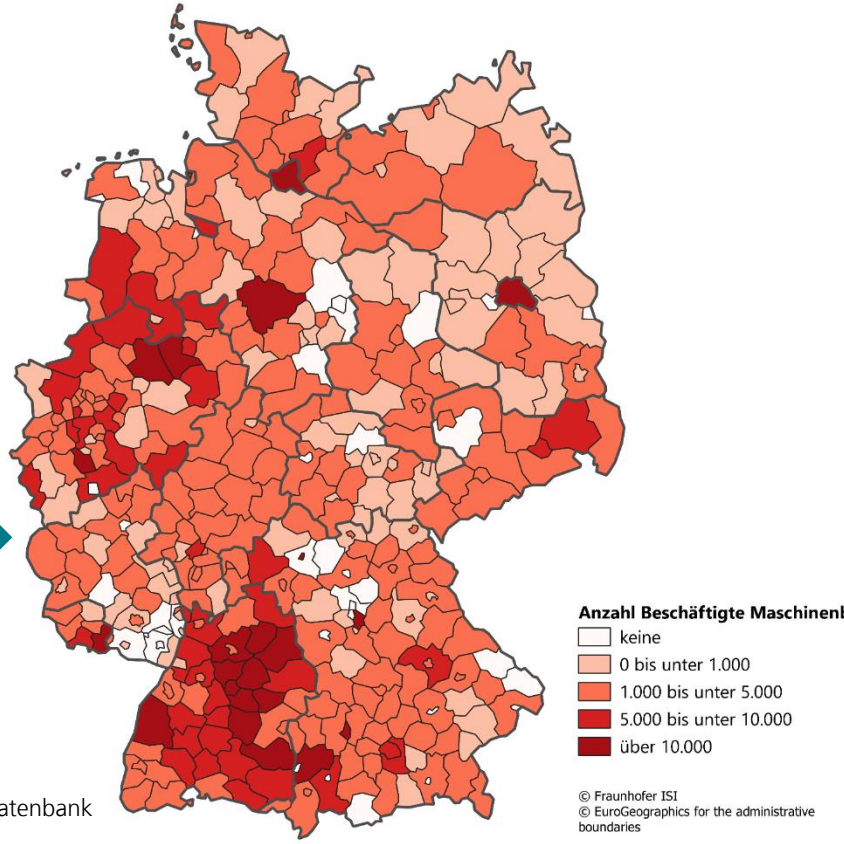
Nicht-energieintensive Industrie

Zwei unterschiedliche Verteilschlüssel

Produktions-menge je Standort

Beschäftigte pro NUTS 3 Region

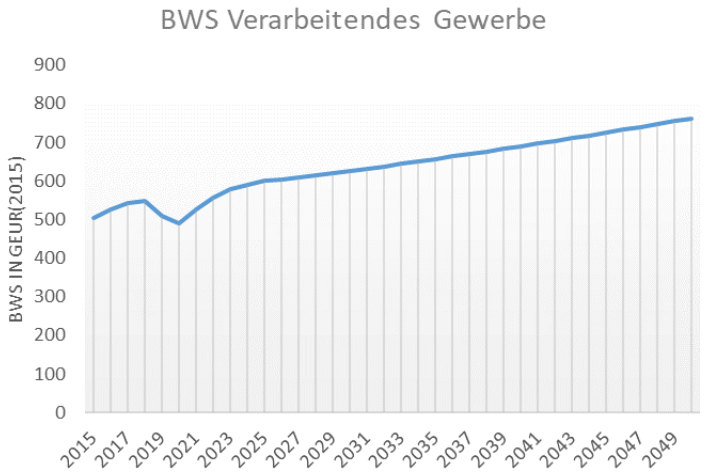


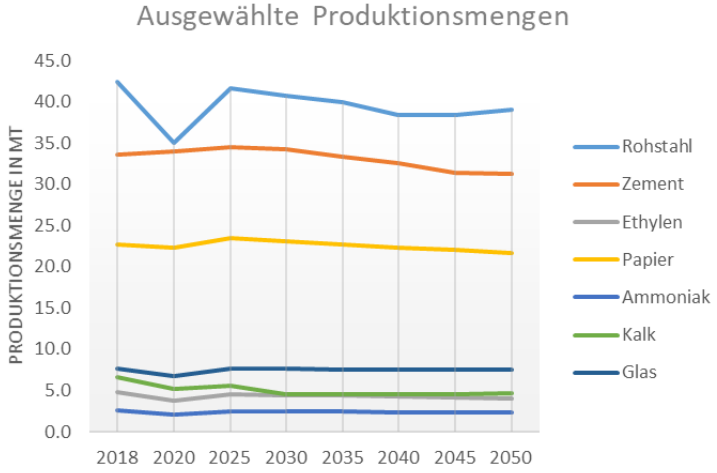


Quelle: Regionaldatenbank Deutschland

Annahmen

Es wurde eine vollständige Erholung aus der Corona-Rezession angenommen





Bruttowertschöpfung (BWS):

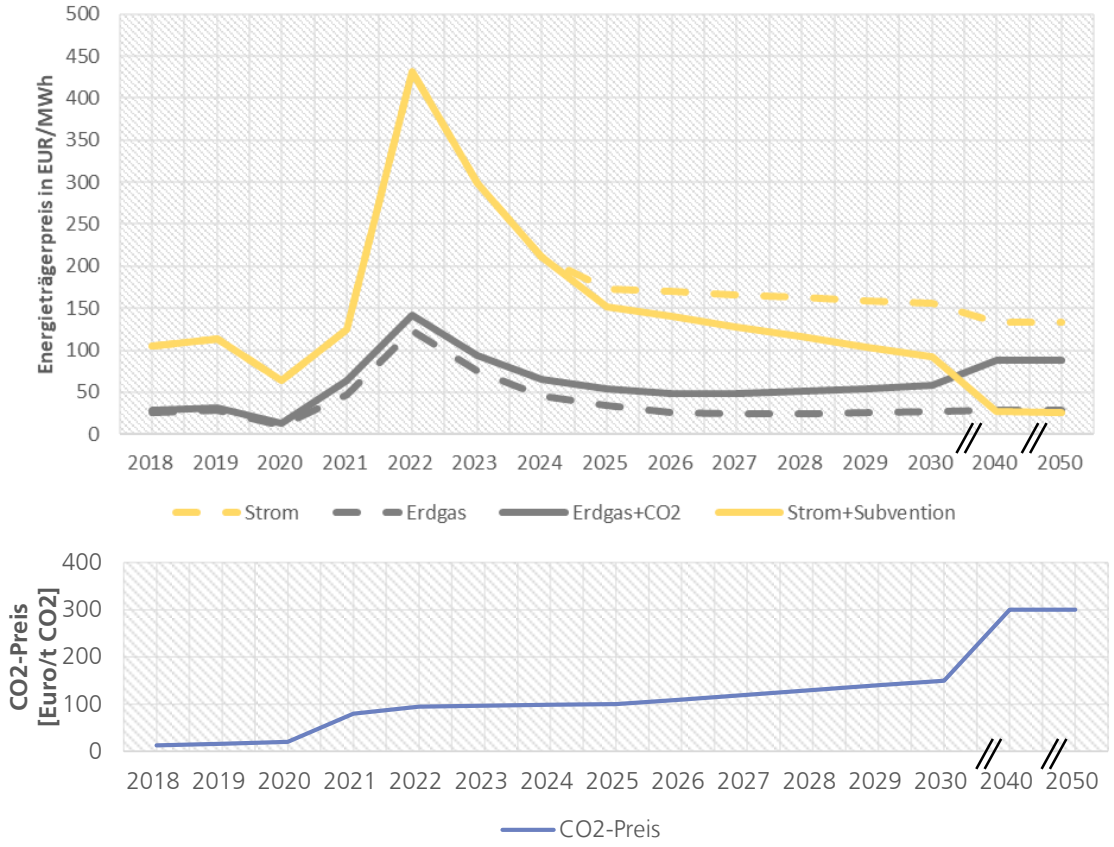
- ~1% Wachstum der BWS im Mittel
- Statistische Daten bis 2020
- Coronakrise: BIP-Einbruch im Jahr 2020 ~5%, Verarbeitendes Gewerbe ~10%
  - ABER: Bauwirtschaft in 2020 auf Vorjahresniveau
  - Annahme: Andere Sektoren gleichmäßig (-10%); sind 2025 zurück auf Wachstumspfad
- Mögliche Auswirkungen Energiekrise auf BWS nicht aufgenommen

Produktion

- Statistische Daten bis 2018/2019 (Stahl: 2020)
- Einbruch 2020 bei den meisten wichtigen Produkten, aber langfristig Erholung (auch bei Stahl); Zement kurzfristig nicht beeinträchtigt
- Langfristig kontinuierliche Entwicklung
- Keine Abwanderung bzw. Carbon Leakage als exogene Setzung

Energieträgerpreise berücksichtigen eine Hochphase 2022-2025

Mittlere Energieträgerpreise für Industriekunden

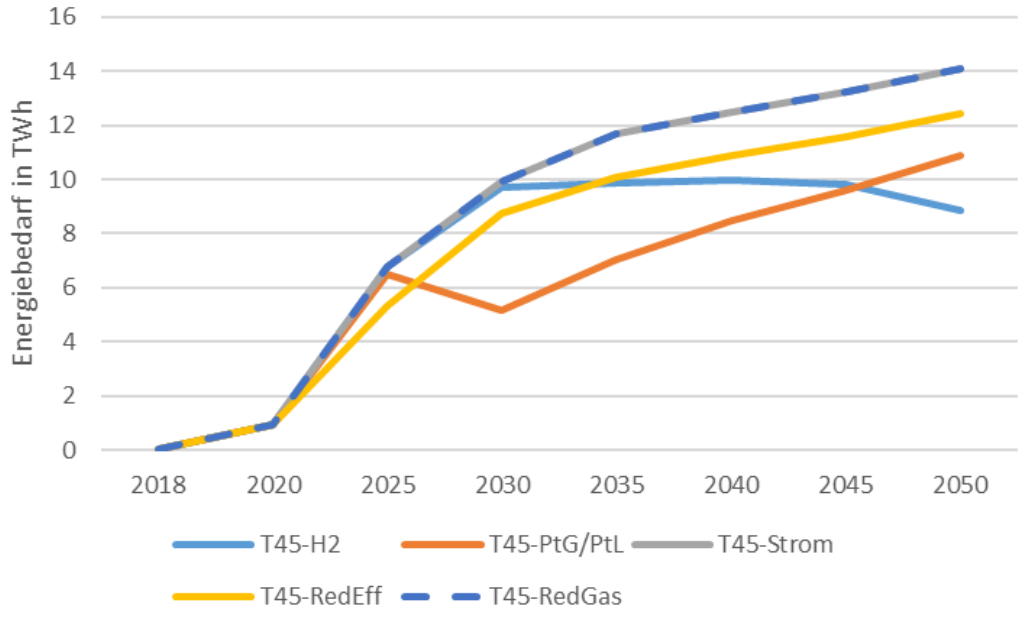


- Alle T45-Szenarien: Kurzfristiger Preisanstieg
  - Ausgangswerte mittlere Industriekunden (2018, Eurostat)
    - Erdgas: 20 €/MWh
    - Strom: 105 €/MWh
  - Gas- und Strompreisanstieg um Faktor 4-7
  - Abschwächung bis 2025, aber langfristig höheres Niveau

- T45-Strom: Wettbewerbsfähigkeit elektrischer Prozesswärme erreicht über:
  - CO_2-Preis-Aufschlag auf Erdgas
  - Absenken des Industriestrompreises

Energiebedarf von Batteriefabriken steigt deutlich

Energiebedarf der Batteriefabriken in DE nach Szenario



- Batterieherstellung benötigt etwa 48 kWh Energie pro kWh Kapazität[1]
  - Davon etwa 50% Strom, 50% Wärme
- Bis 2030 wird eine Produktionsmenge in Deutschland von bis zu 213 GWh erwartet[2]
- Entwicklung danach hängt stark an
  - Diffusion BEV
  - Annahmen zur Export-/Importbilanz von BEV
  - Annahmen zum Versorgungsgrad der BEV-Produktion
  - Effizienzfortschritten der Produktion (neue Batteriegenerationen)
- Produktionsmenge und Energiebedarf sind dadurch sehr unsicher
  - Pro Millionen jährliche BEV-PkW Neuzulassung (65 GWh Kapazität) etwa 3 TWh Energiebedarf
  - Zusätzlich LkW

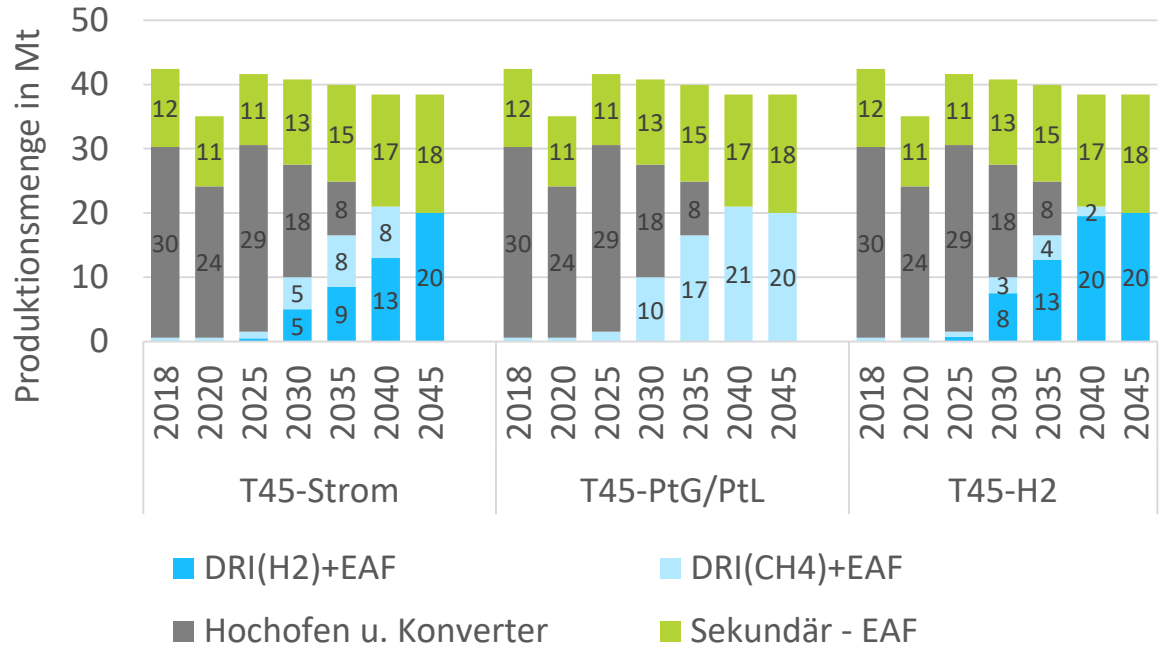
1: Degen, Schütte (2022), https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129798
2: Agora Verkehrswende (2021): *Batteriestandort auf Klimakurs. Perspektiven einer klimaneutralen Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland.*

Stahl: Annahmen

Szenariodesign Stahlindustrie

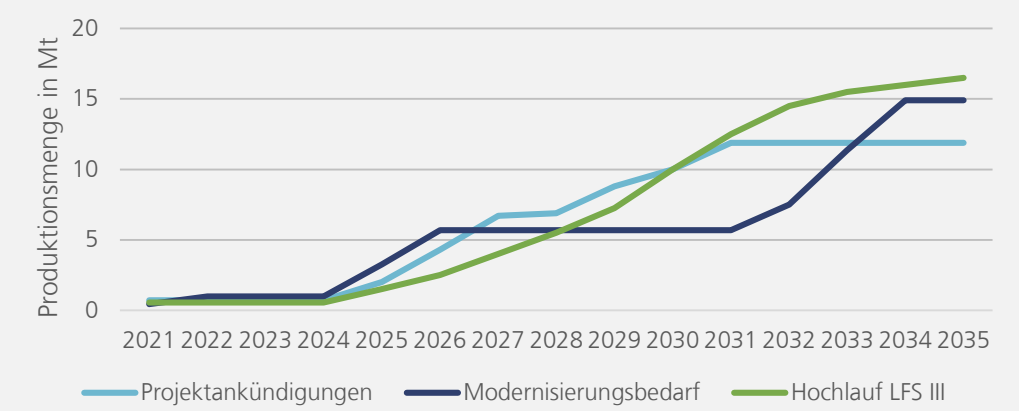
	T45-*Strom*	T45-*PtG/PtL*	T45-*H2*
Materialeffizienz	Reduktion Nachfrage nach Rohstahl und Walzstahl: 10% ggü. Ref		
Kreislauf	Anteil Sekundärstahl steigt von 30% (2015) auf 50% in 2045		
Prozesswechsel	H_2-DRI (Übergang CH_4-DRI) 2030:10 Mt DRI	2030:10 Mt CH_4-DRI	H_2-DRI (Übergang CH_4-DRI) 2030:10 Mt DRI

Produktion Rohstahl nach Route



Stahl: Annahmen zum DRI Ausbau konsistent mit Projektankündigungen und Modernisierungsbedarf

Diffusion Produktionskapazität Direktreduktion



Annahmen zur Neuzustellung der Hochöfen:

- Mittlere Lebensdauer Hochofen: 22 Jahre
- Kleinere lebenserhaltende Maßnahmen ermöglichen Aufschub des Modernisierungsbedarfs um 3-5 Jahre
- Parallelbetrieb und etwas Flexibilität in Übergangsphase möglich

Projektankündigungen der Industrie (Stand September 2022)

- Insgesamt Investitionen von über 15 Mrd.€ in 11,3 Mt DRI-Kapazität:
  - Duisburg: ThyssenKrupp: 0,4 Mt (2025); 3 Mt (2030)
  - Bremen: ArcelorMittal: 2,4 Mt (2027); 3,5 Mt (2030)
  - Salzgitter: Salzgitter: 1,9 Mt (2027); 3,8 Mt (2030)
  - Hamburg: ArcelorMittal: 0,1 Mt (2025); 1 Mt (2030)

Grünes Licht für grünen Stahl

13.07.2022 | Pressemeldung der Salzgitter AG

08.09.2022 16:15

thyssenkrupp beschleunigt grüne Transformation: Bau der größten deutschen Direktreduktionsanlage für CO2-armen Stahl entschieden

15.06.2022 | ArcelorMittal Deutschland

ArcelorMittal veröffentlicht Konzept für kohlenstoffarmen Stahlstandard

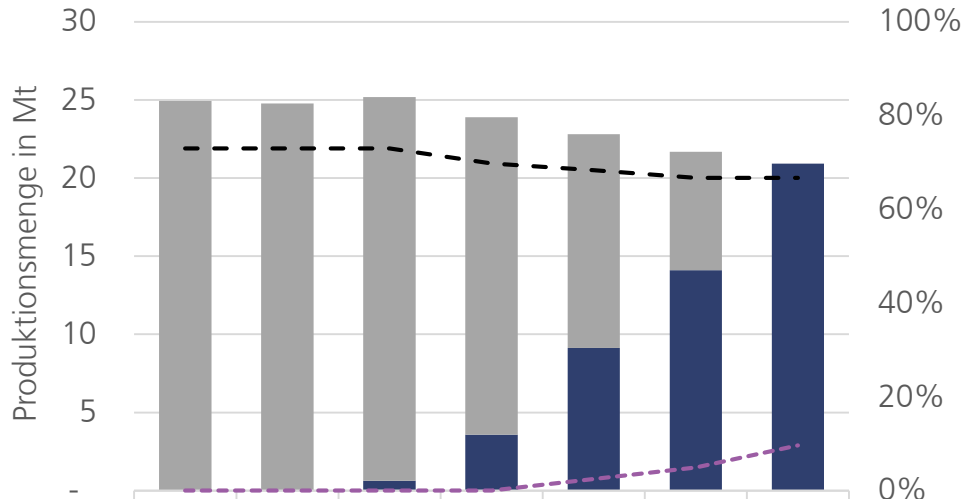
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Zement u. Kalk: Annahmen

Szenariodesign Zement u. Kalk

	T45-*Strom*	T45-*PtG/PtL*	T-*H2*
Material-effizienz	Produktion Zement: -7% ggü. 2018 (bis 2045) Produktion konventioneller Klinker: -24% ggü. 2018 (bis 2045) Produktion Kalk: -30% ggü. 2018 (bereits bis 2030)		
Kreislauf	-		
Material-einsatz / neue Produkte	Geringe Anteile neue Bindemittel (~10%) Klinkerfaktor von 73% in 2015 auf 67% in 2045		
Brennstoff-wechsel	**Teil-elektrifizierung,** Ersatzbrennstoffe, Biomasse	**EE-Methan,** Ersatzbrennstoffe, Biomasse	**Wasserstoff,** Ersatzbrennstoffe, Biomasse
CCS /CCU	CO_2-Abscheidung bis 2045 an allen Werken		

Produktion Klinker nach Verfahren (alle T45 Szenarien)



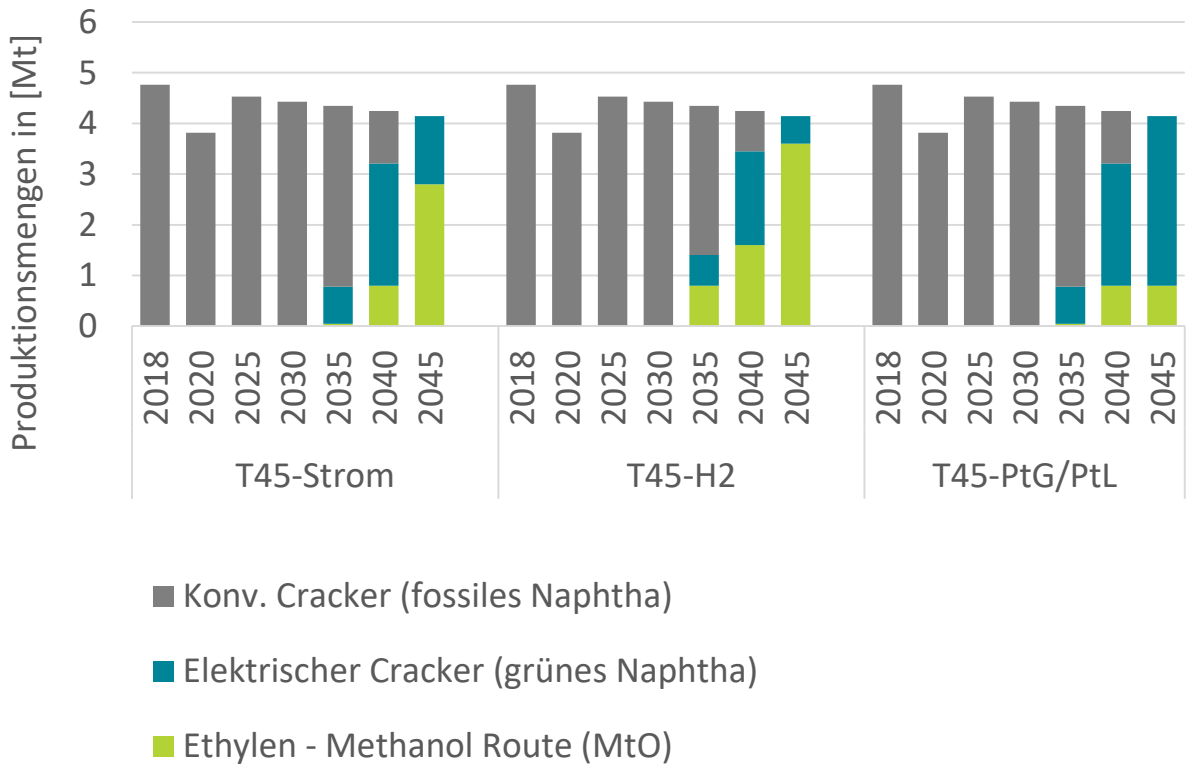
	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Klinker ohne CO2-Abscheidung	25	25	25	20	14	8	0
Klinker mit CO2-Abscheidung	-	-	1	4	9	14	21
Klinkerfaktor	73%	73%	73%	70%	68%	67%	67%
Neue Bindemittel	0%	0%	0%	0%	2%	5%	10%

Grundstoffchemie: Annahmen

Szenariodesign Grundstoffchemie

	Ggfs. Sektor	T45-*Strom*	T45-*PtG/PtL*	T45-*H2*
Material-effizienz		Reduktion und Ersatz Kunststoffverbrauch: -13% (Ethylen), Reduktion Düngerbedarf: -10% (Ammoniak)		
Kreislauf		Kunststoffrecycling: + 15%-Punkte		
Prozess-wechsel	**High Value Chemicals (Olefine + Aromaten)**	H_2-HVCs (70%) El. Steamcracker + PtL (30%)	Methan-HVCs (20%) El. Steamcracker + PtL (80%)	H_2-HVCs (90%) El. Steamcracker + PtL (10%)
	Ammoniak	EE-H_2	PtG	EE-H_2
Brennstoff-wechsel	**Dampf**	Prio Strom	Prio PtG	Prio H_2

Produktionsmenge Ethylen nach Route



Fortschritte bei Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz in allen Szenarien hinterlegt

Annahmen zur **Kreislaufwirtschaft**

Produkt	Recyclingquoten bis 2050
Stahl	Elektrostahl von 30% auf 50%
Kunststoffe/ Ethylen	Kunststoffrecycling: +15%-Punkte
Glas	Steigerung Flachglasrecycling
Papier	Altpapierrecycling von 76% auf 77%
Aluminium	Steigerung Sekundäraluminium von 54% auf 73%

Annahmen zur **Materialeffizienz**

Produkt	Rückgang Produktion in 2045 ggü. Ref	Hintergrund
Rohstahl	10%	Nachfragereduktion: Effizientere Produktverwendung und Materialsubstitution, z.B. in der Automobilindustrie
Aluminium	<5%	Nachfragereduktion; ausgenommen Kupfer (steigender Bedarf elektrische Leiter für z.B. Motoren kompensiert Effizienzfortschritt)
Papier	10%	Nachfragereduktion: Trend zu papierlosen Anwendungen
Behälterglas	15%	Nachfragereduktion durch Materialeffizienz in der Produktgestaltung
Zement	7%	Nachfragereduktion durch Materialeffizienz in der Bauwirtschaft
Klinker	16%	Rückgang Klinkeranteil in der Zementproduktion von 0,73 in 2015 auf 0,67 in 2045
Kalk	30%	Rückgang maßgeblich durch Kohleausstieg, zum Teil durch Stahltransformation
Ammoniak	10%	Nachfragereduktion Mineraldünger (Präzisionslandbau, verbesserte Stickstoffaufnahme)
Kunststoffe, Ethylen	13%	Nachfragereduktion Massenkunststoffe (z.B. Verpackungen)
Fleisch/ Molkerei	30%	Rückgang aufgrund geänderter Ernährungsgewohnheiten

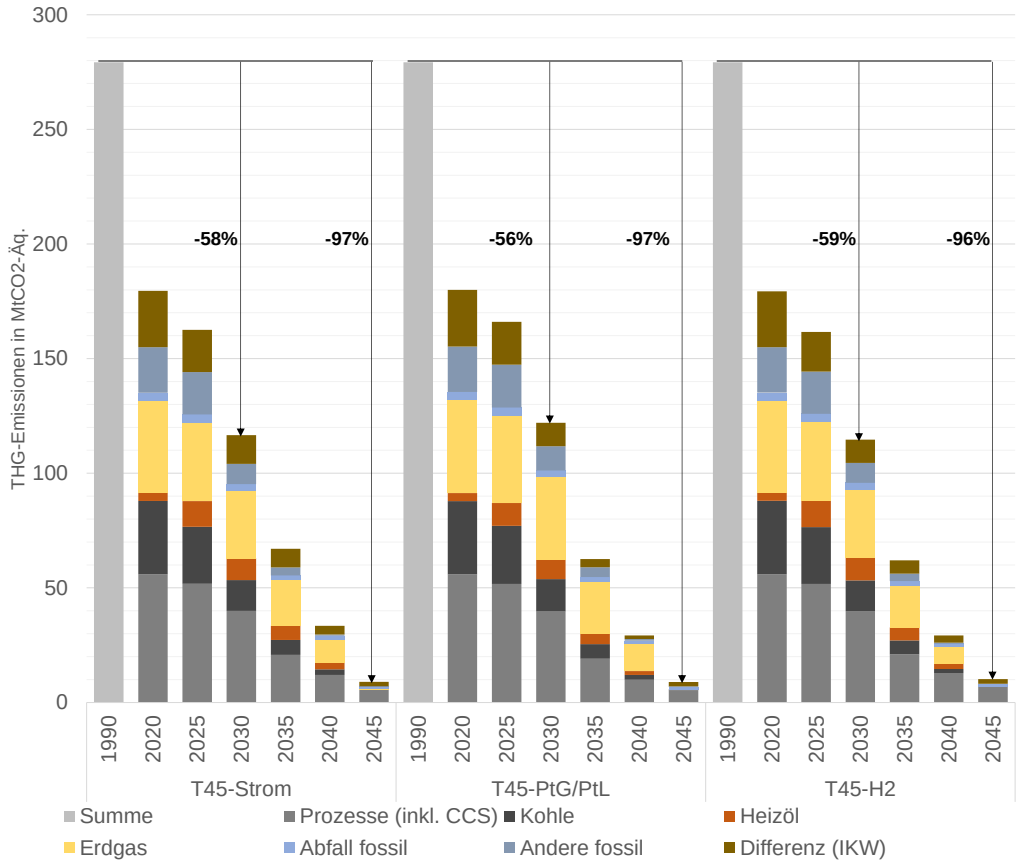
Branchen-Überblick
Ausgestaltung der T45-Szenarien

Vermeidungsoption Sektor	T45-*Strom*	T45-*PtG/PtL*	T45-*H2*	Alle Szenarien Recycling und Wiederverwendung	Alle Szenarien Materialeffizienz und Substitution
Eisen und Stahl	H_2-DRI (+Methan-DRI im Übergang)	Methan-DRI	H_2-DRI (+Methan-DRI im Übergang)	Elektrostahl von 30% auf 50%	10% effizienterer Stahleinsatz und Substitution
Chemie	H_2-Ammoniak H_2-Ethylen (MtO) (Externe Kohlenstoffzufuhr) El. Steamcracker (PtL/bio)	Methan-Ammoniak El. Steamcracker (PtL) Methan-Ethylen (MtO)	H_2-Ammoniak H_2-Ethylen (MtO) (Externe Kohlenstoffzufuhr) El. Steamcracker (PtL/bio)	Kunststoffrecycling: +15%-Punkte bis 2045	Reduktion und Ersatz Kunststoffverbrauch (-13%) (Ethylen), Reduktion Düngerbedarf (-10%) (Ammoniak)
Zement und Kalk	Teil-Elektrifizierung Ersatzbrennstoffe, Biomasse CCUS	Methan Brennstoff Ersatzbrennstoffe, Biomasse CCS	H_2 Brennstoff Ersatzbrennstoffe, Biomasse CCUS	-	Reduktion Zementeinsatz (-7%) Reduktion Klinker (-16%), Sinkender Klinkeranteil (0.67)
Glas und Keramik	Elektrische Schmelzwannen Geringfügig H_2	Methan Brennstoff	Wasserstoff (80%) Teil-Elektrifizierung	Anstieg Flachglasrecycling	Materialeffizienz bei Behälterglas (-15%)
Papier	Elektrokessel, Fernwärme, Wärmepumpen	Methan dominanter Brennstoff (+Fernwärme, Wärmepumpen)	H_2 dominanter Brennstoff (+Fernwärme, Wärmepumpen, Elektrodenkessel)	Altpapierrecycling von 76% auf 77%	Materialeffizienz bei Papiereinsatz (-10%)
Prozesswärme	Elektrokessel, Wärmepumpen, Fernwärme, Biomasse, H_2	PtG, Fernwärme, Strom, Biomasse	H_2, Fernwärme, Strom, Biomasse	-	-

Ergebnisse Treibhausgasemissionen T45-Szenarien

In allen Szenarien wird nahezu THG-Neutralität in 2045 erreicht

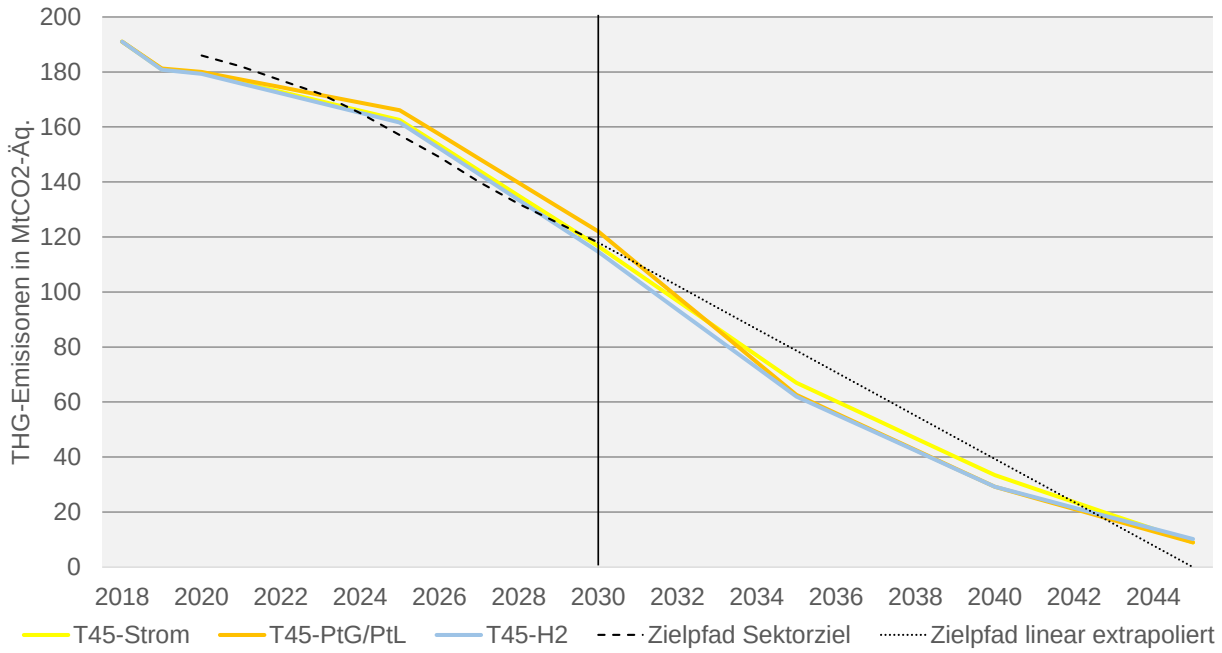
THG-Emissionen nach Definition Klimaschutzgesetz



- **2030**
  - Erreichte Minderung: 56 - 59%
  - Das Sektorziel 2030 (118Mt$_{CO2-Äq.}$, -58%) wird in T45-Strom und T45-H2 erreicht.
  - T45-PtG/PtL verfehlt Ziel um 4Mt$_{CO2-Äq.}$
- **2045**
  - Nahezu keine fossilen THG-Emissionen mehr
  - Etwa 10Mt$_{CO2-Äq.}$ Prozessemissionen verteilt auf etwa 20 kleinere Quelltypen
- Alle Szenarien enthalten CO2-Abscheidung bei Zement und Kalk (enthalten in „Prozesse“)

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

THG-Emissionen folgen nahezu linearem Reduktionspfad



Szenario	Kumulierte THG-Emissionen 2020-2045 [$MtCO_2$-Äq.]
T45-Strom	2464
T45-PtG/PtL	2466
T45-H2	2406

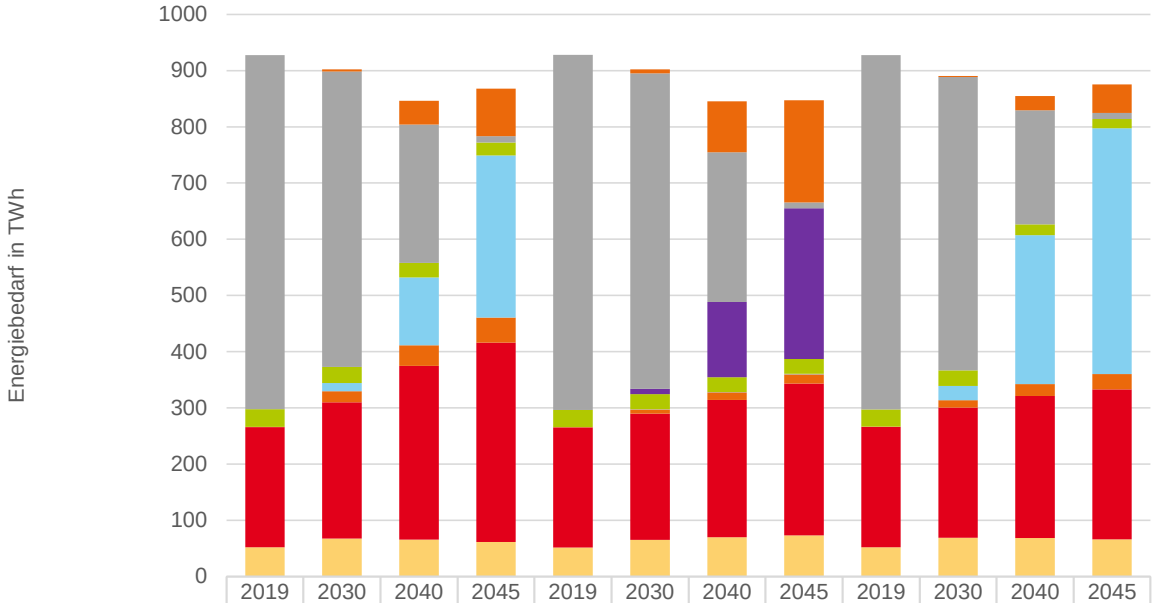
- **Jährliche Minderung**
  - **2030**: Erreichte Minderung: -56-59%
  - **2040**: Szenarien folgen linearer Absenkung
  - **2045**: Nahezu keine fossilen THG-Emissionen mehr (-97%);
  - **Nach 2045:** Emissionssockel verlangt weitere Minderung oder Kompensation

- **Kumulierte Emissionen bis 2045**
  - Alle T45-Grundszenarien haben kumulierte Emissionen in ähnlicher Größenordnung

Ergebnisse Energienachfrage T45-Szenarien

Energieverbrauch: T45-Szenarien unterscheiden sich deutlich

Endenergie und stoffliche Nutzung von Energieträgern

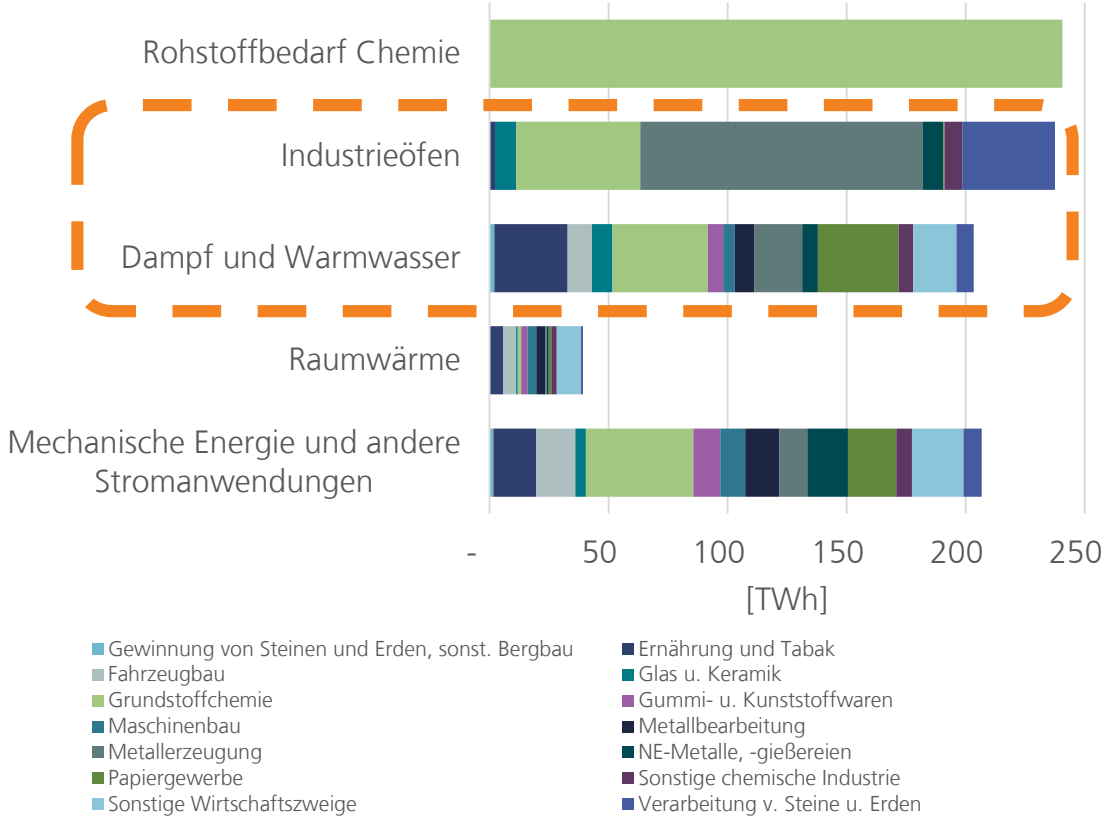


	T45-Strom				T45-PtG/PtL				T45-H2			
	2019	2030	2040	2045	2019	2030	2040	2045	2019	2030	2040	2045
PtL	0	3	42	84	0	7	91	182	0	2	25	51
Fossil	630	526	246	12	632	561	266	10	630	522	203	10
PtG	0	0	0	0	0	9	134	269	0	0	0	0
Biomasse	31	29	26	23	30	27	26	26	31	28	19	16
Wasserstoff	0	15	121	289	0	0	1	1	0	25	265	437
Umgebungswärme	0	20	37	45	0	7	13	16	0	13	21	27
Strom	214	242	309	355	214	225	245	270	214	232	253	267
Fernwärme	52	68	65	61	52	65	70	73	52	69	69	66

- Lediglich geringer Rückgang beim Energieverbrauch; Effizienzgewinne langfristig kompensiert durch neue Verbraucher
- 2045 werden keine fossilen Energieträger mehr eingesetzt (Ausnahme fossiler Müll)
- Sehr ausgeprägte Technologiepfade: Strom, H_2, PtG
- Aber auch Ähnlichkeiten:
  - Der Stromverbrauch steigt in allen Szenarien
  - Hoher H_2-Bedarf auch im Szenario T45-Strom
  - Biomasse und Fernwärme verbleiben auf heutigem Niveau

Hohe Technologiereife bei H_2 und Elektrifizierung in der Dampferzeugung

Energieverbrauch der Industrie im Jahr 2019



Prozesswärme: Elektrifizierung <-> Wasserstoff

	Dampferzeugung	**Industrieöfen**
Struktur	Rel. homogen, Trennung vom Prozess	Sehr heterogen, Integriert in Prozess
Technologie-reife	H_2: 9 El.: 9	H_2: <2 bis 4 El.: <2 bis 9
Energie-effizienz*	Teils Vorteile für Elektrifizierung	
Umbau-bedarf	Wasserstoff meist über Modernisierung/ Brennertausch möglich; Elektrifizierung eher Neubau	

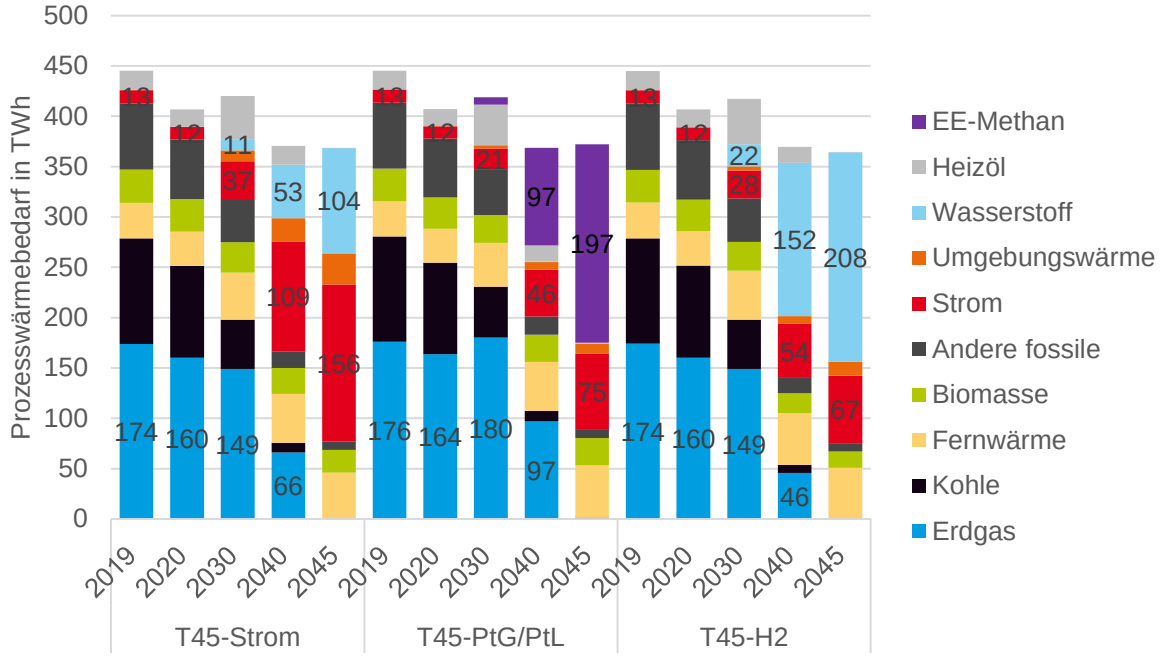
* ohne Vorketten

Quelle: Fraunhofer ISI, IOB: „CO2-neutrale Prozesswärme"

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Große Unterschiede bei der Versorgung der Prozesswärme zwischen den Szenarien

Endenergie für die Prozesswärme

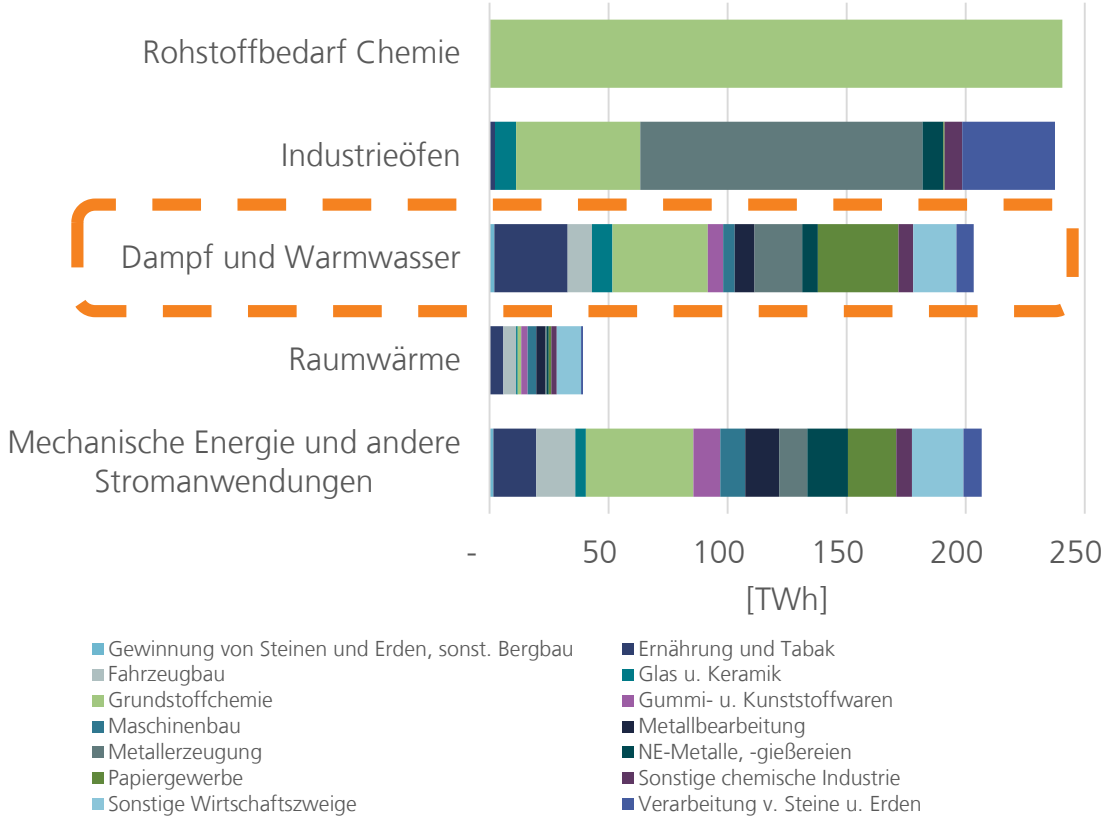


Bereitstellung von Prozesswärme:

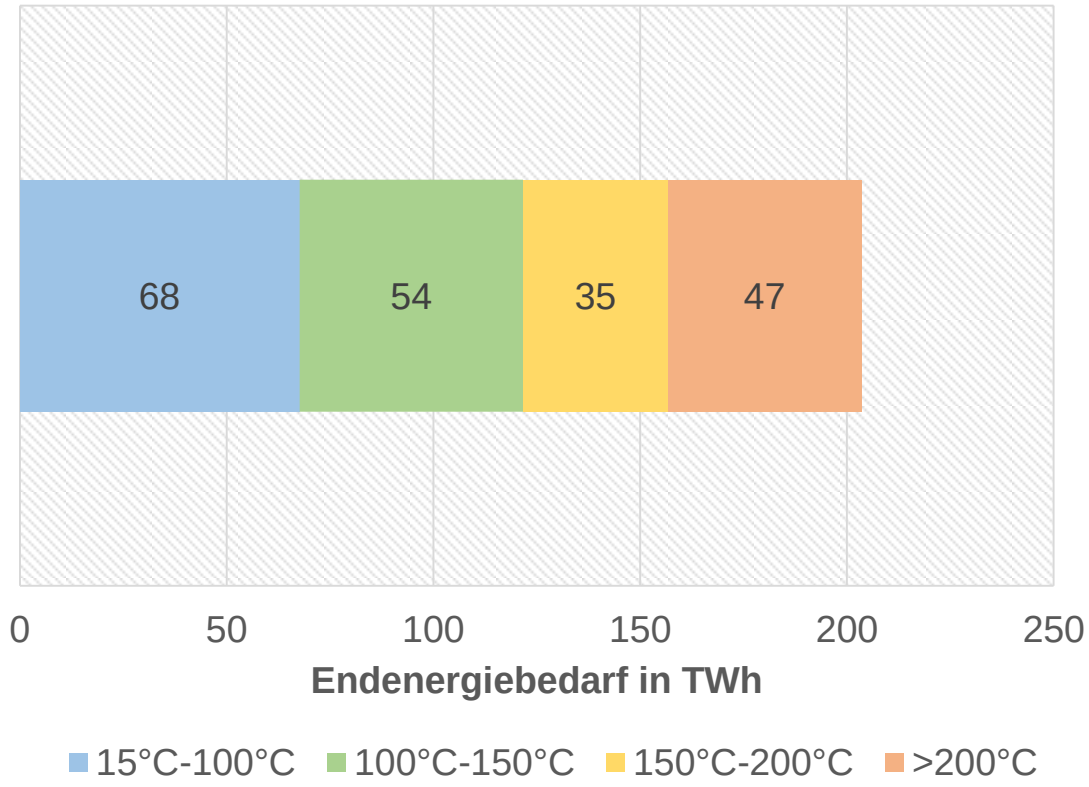
- Hohe Bedeutung von Erdgas im Status-Quo in den meisten Branchen
- Richtung der Transformation unterscheidet sich stark je nach Szenario:
  - Wasserstoff
  - PtG/PtL
  - Strom
- Mindestens Teilelektrifizierung in allen Szenarien

Hohe Technologiereife bei H_2 und Elektrifizierung in der Dampferzeugung

Energieverbrauch der Industrie im Jahr 2019

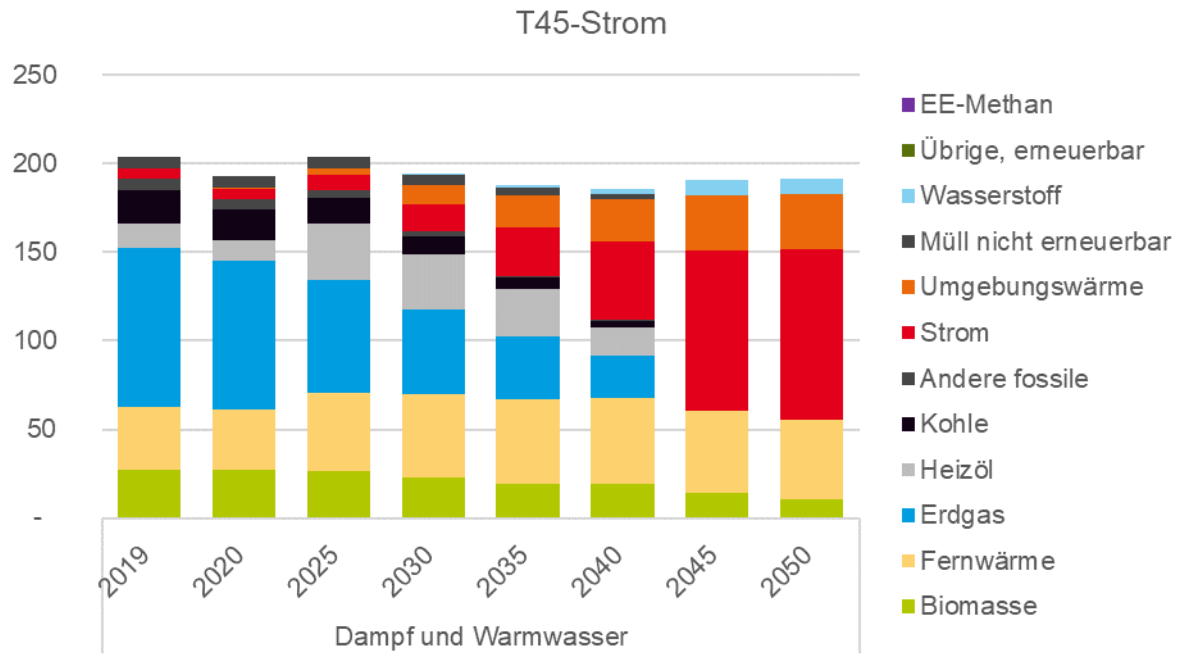


Dampferzeugung: Temperaturverteilung (2019)



Erzeugung von Dampf und Warmwasser

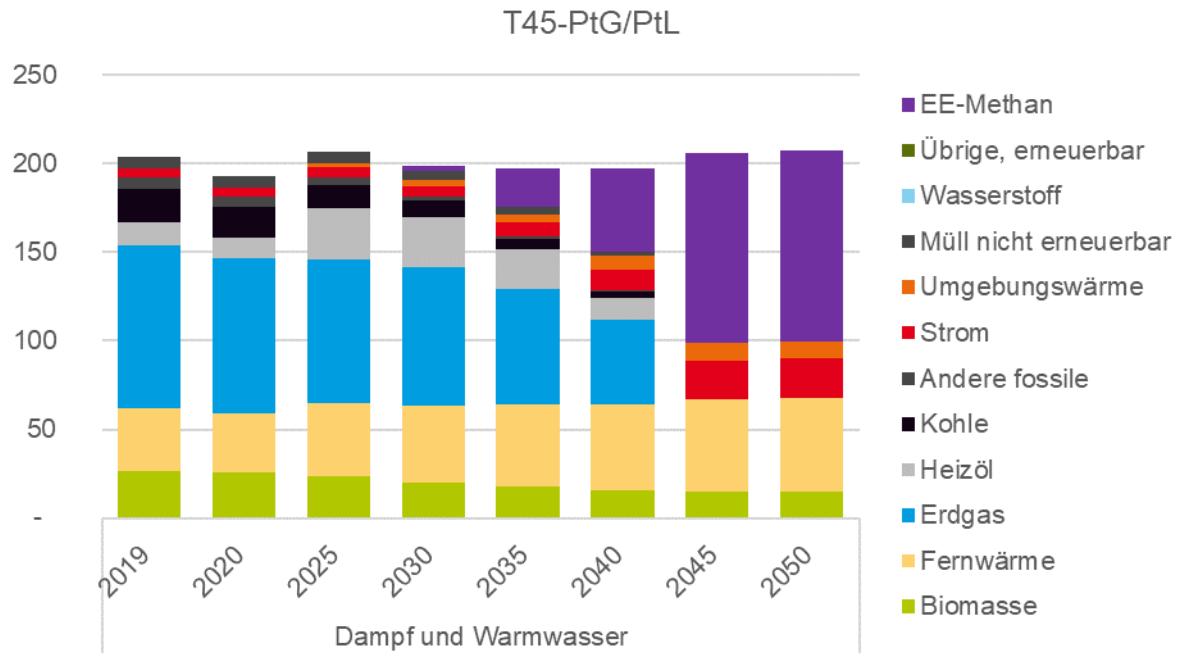
Endenergie für die Erzeugung von Dampf und Warmwasser



- **Status-Quo:**
  - Hohe Bedeutung: Nahezu ein Drittel der Endenergie des Industriesektors
  - Erdgas ist Standard-Technologie: ~50%
  - Trennung von Wärmeerzeugung und Produktion vereinfacht Umstellung
  - Branchenfokus: Chemie, Nahrung und Papier
- **T45-Strom:**
  - Hohe Bedeutung direkter Elektrifizierung: 91 TWh in 2045
  - Effiziente Versorgung über Hochtemperaturwärmepumpen (siehe Bedeutung der Umgebungswärme)
  - Elektrodenkessel haben großes Flexibilitätspotenzial
  - Geringer Einsatz von Wasserstoff

Erzeugung von Dampf und Warmwasser

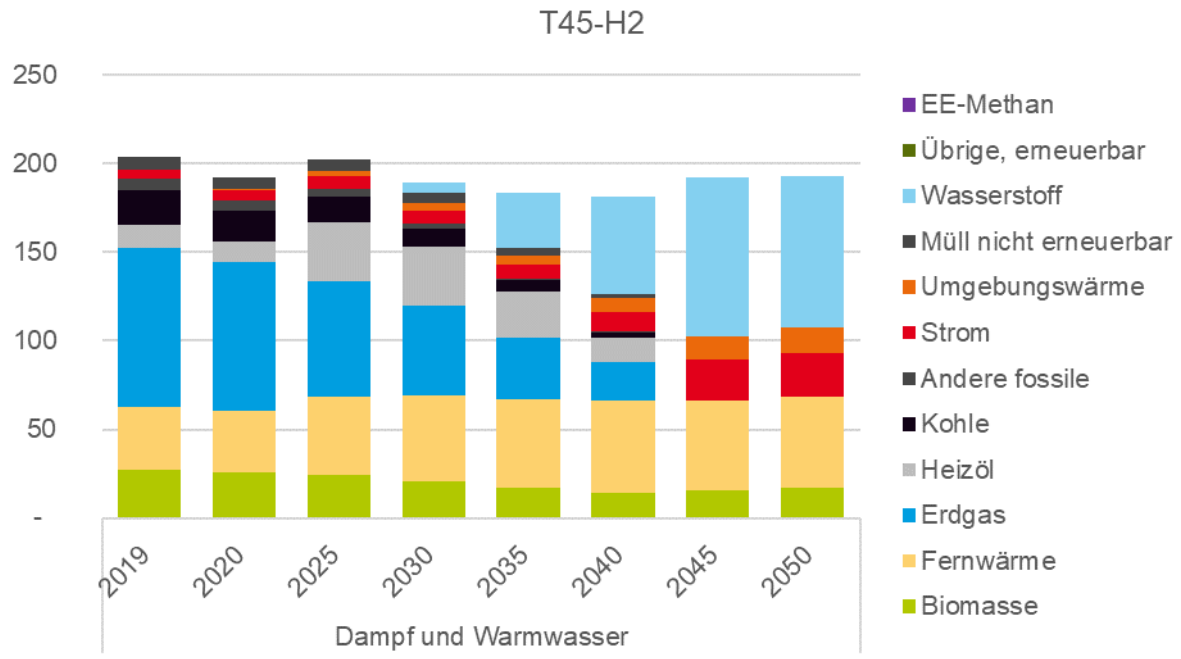
Endenergie für die Erzeugung von Dampf und Warmwasser



- **Status-Quo:**
  - Hohe Bedeutung: Nahezu ein Drittel der Endenergie des Industriesektors
  - Erdgas ist Standard-Technologie: ~50%
  - Trennung von Wärmeerzeugung und Produktion vereinfacht Umstellung
  - Branchenfokus: Chemie, Nahrung und Papier
- **T45-PtG/PtL:**
  - Hohe Bedeutung PtG: 107 TWh in 2045
  - Dadurch später Erdgasausstieg
  - Teilweise dennoch Elektrifizierung
  - Kein Einsatz von Wasserstoff

Erzeugung von Dampf und Warmwasser

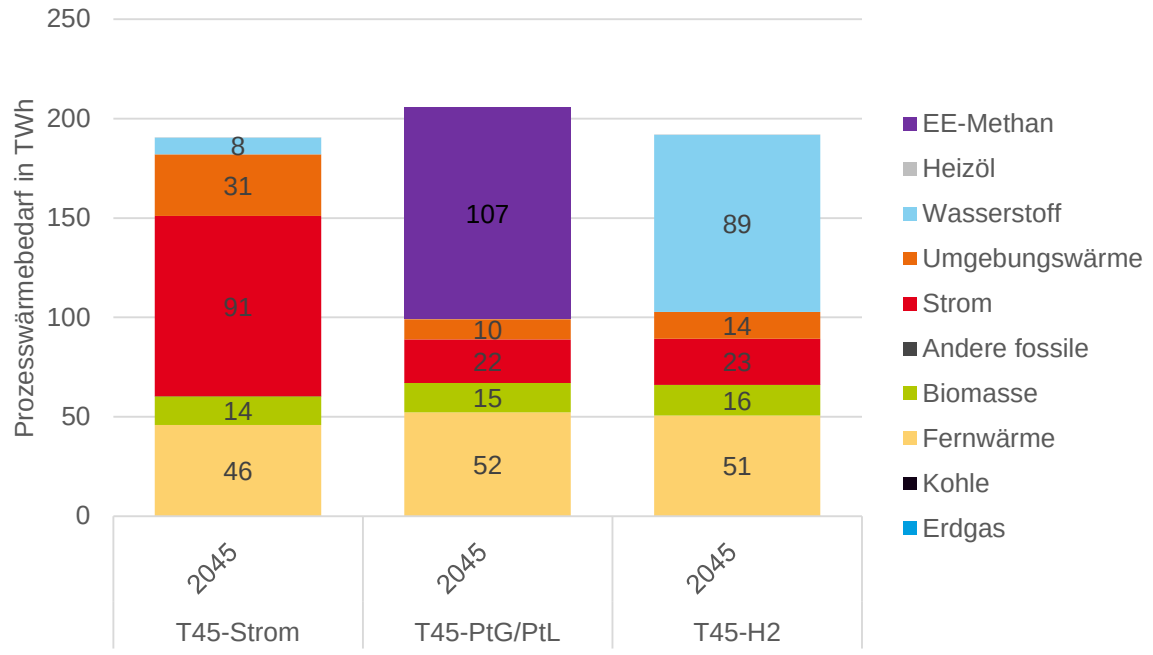
Endenergie für die Erzeugung von Dampf und Warmwasser



- **Status-Quo:**
  - Hohe Bedeutung: Nahezu ein Drittel der Endenergie des Industriesektors
  - Erdgas ist Standard-Technologie: ~50%
  - Trennung von Wärmeerzeugung und Produktion vereinfacht Umstellung
  - Branchenfokus: Chemie, Nahrung und Papier
- **T45-H2:**
  - Hohe Bedeutung Wasserstoff: 89 TWh in 2045
  - Teilweise dennoch Elektrifizierung
  - Kein Einsatz von PtG

Erzeugung von Dampf und Warmwasser T45-Grundszenarien im Vergleich

Endenergie für die Erzeugung von Dampf und Warmwasser



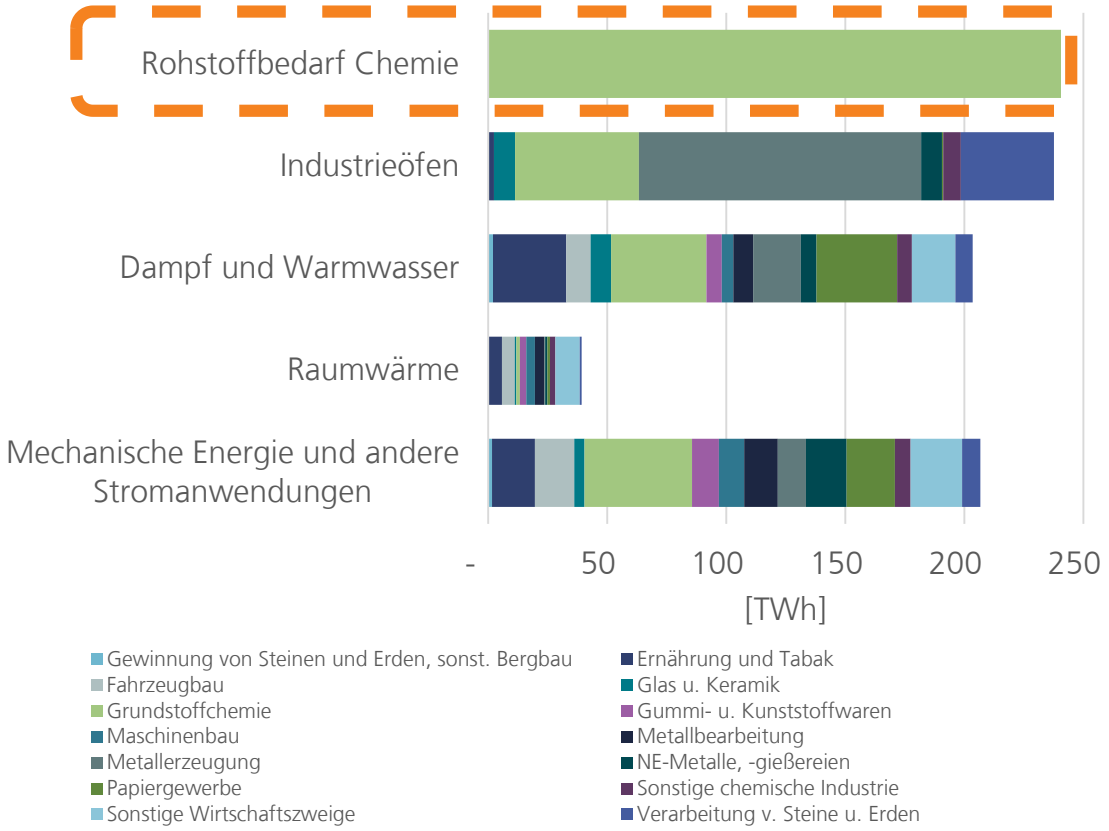
2045: Sockel von Fernwärme und Biomasse (60-67 TWh) ergänzt durch:

- **T45-Strom**
  - 91 TWh Strom (+31 TWh Umgebungswärme)
  - 8 TWh Wasserstoff
- **T45-PtG/PtL**
  - 22 TWh Strom (+ 10 TWh Umgebungswärme)
  - 107 TWh EE-Methan
- **T45-H2**
  - 23 TWh Strom (+ 14 TWh Umgebungswärme)
  - 89 TWh Wasserstoff

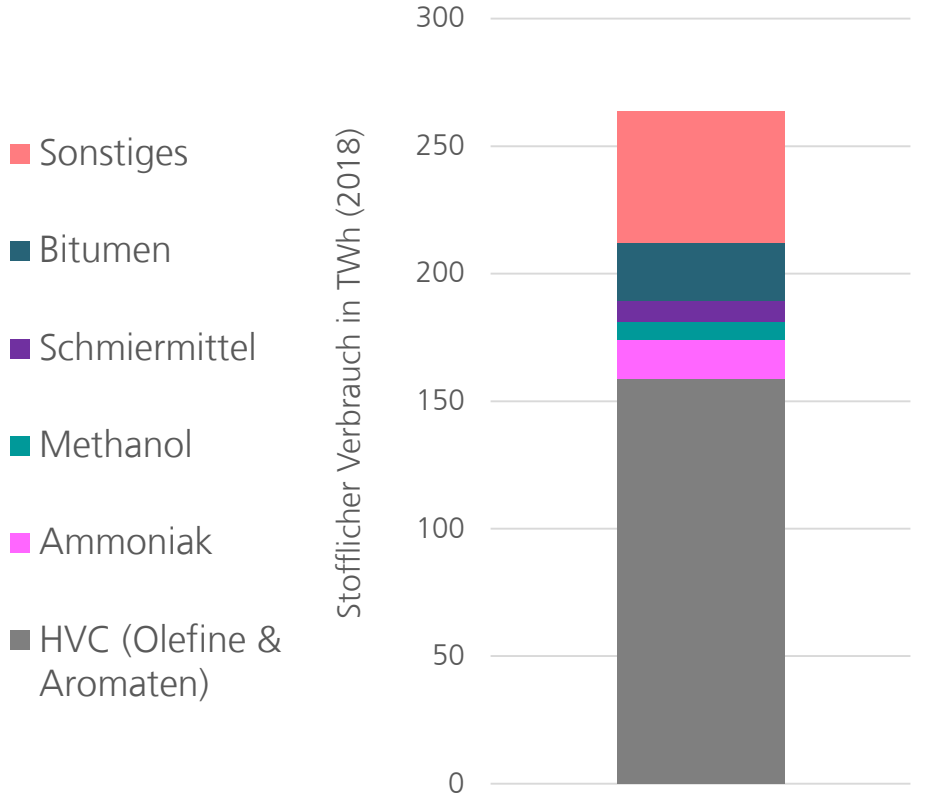
Ergebnisse Feedstocks und CCUS

Sehr hoher stofflicher Energiebedarf in der Chemie

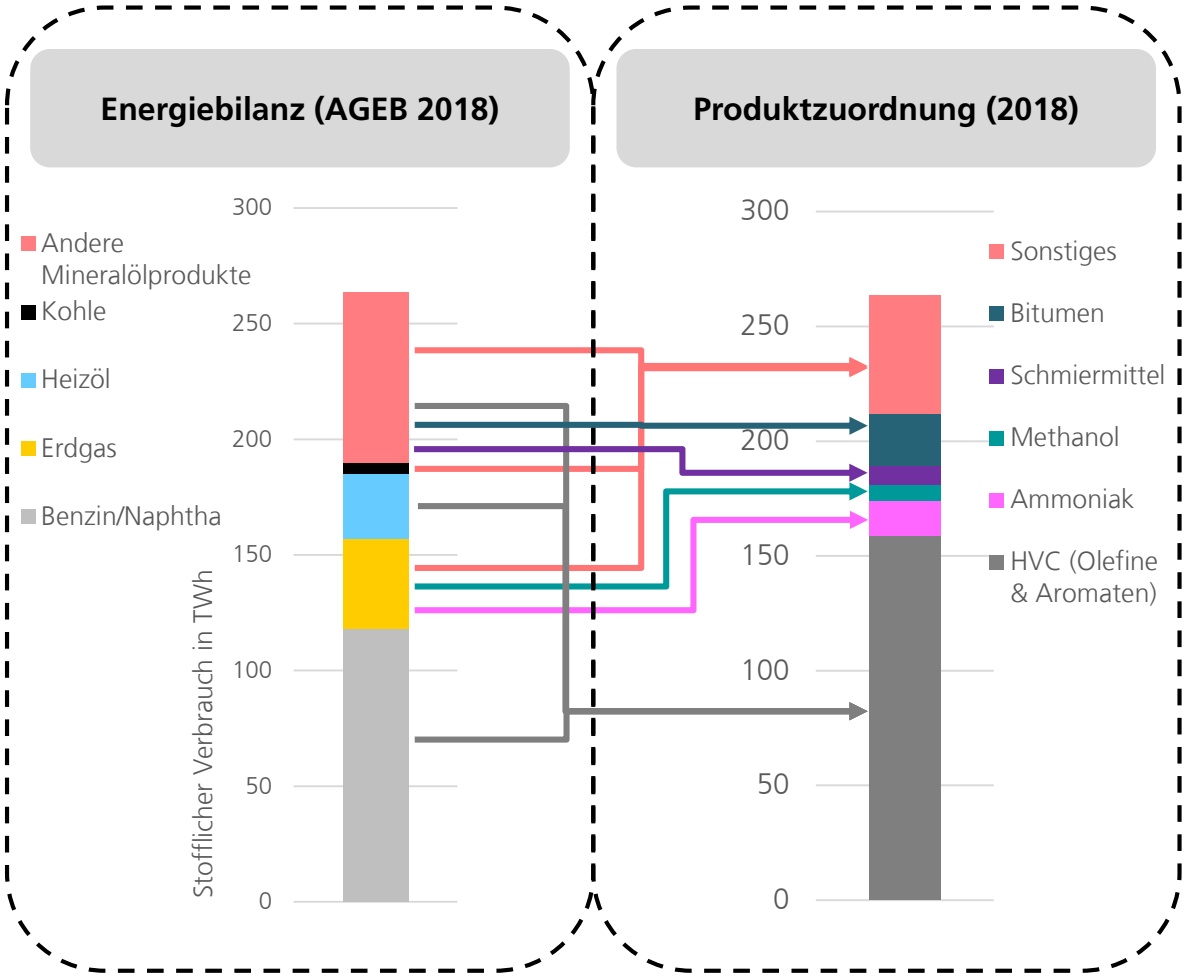
Energieverbrauch der Industrie im Jahr 2019



Stofflicher Bedarf fossiler Energieträger (2018)



Stofflicher Verbrauch nach Energieträger und Produkt – Status Quo

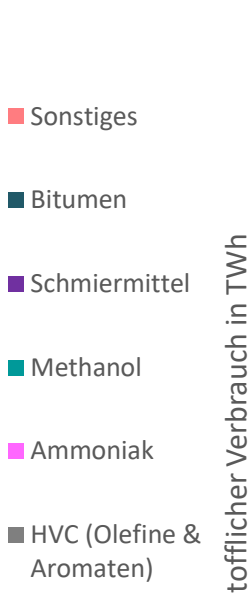


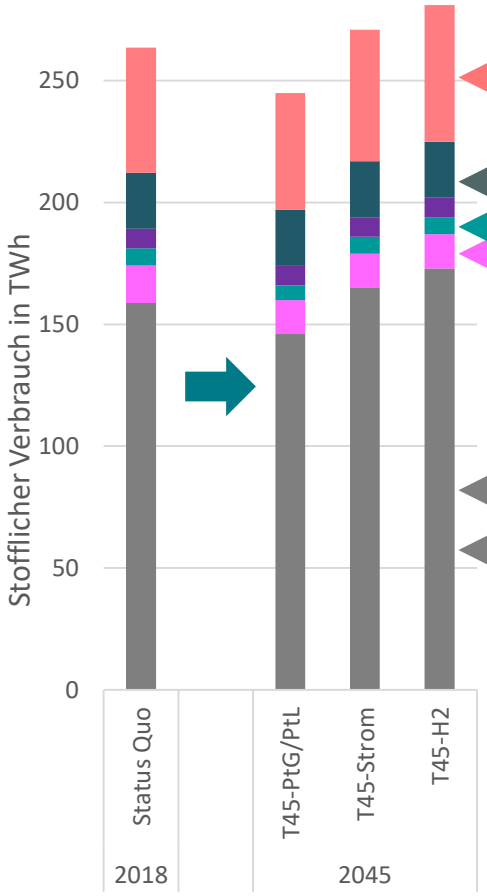
- **Methodikverbesserung gegenüber TN-Szenarien**
  - **TN-Szenarien:**
    - Stofflicher Verbrauch bottom-up für die wichtigsten Produkte: Methanol, Ammoniak, Olefine
  - **T45-Szenarien:**
    - Erweiterung des bottom-up-Ansatzes auf alle HVC (Olefine & Aromaten)
    - Mehr Details durch Eurostat Daten
    - Lücke für unbekannte Produkte („Sonstige“) zu Energiebilanz geschlossen

- **Bedeutung für den Status Quo**
  - Insgesamt sehr relevant, mit 263 TWh in 2018
  - Davon 185 TWh Heizöl, Erdgas, Benzin/Naphtha
    - Fast vollständig (181 TWh) bottom-up zuweisbar
  - Verbleibende Unsicherheiten bei Kategorie „Sonstige“ (35-50 TWh, auch in Energiebilanz nur als „andere Mineralölprodukte“ vermerkt)

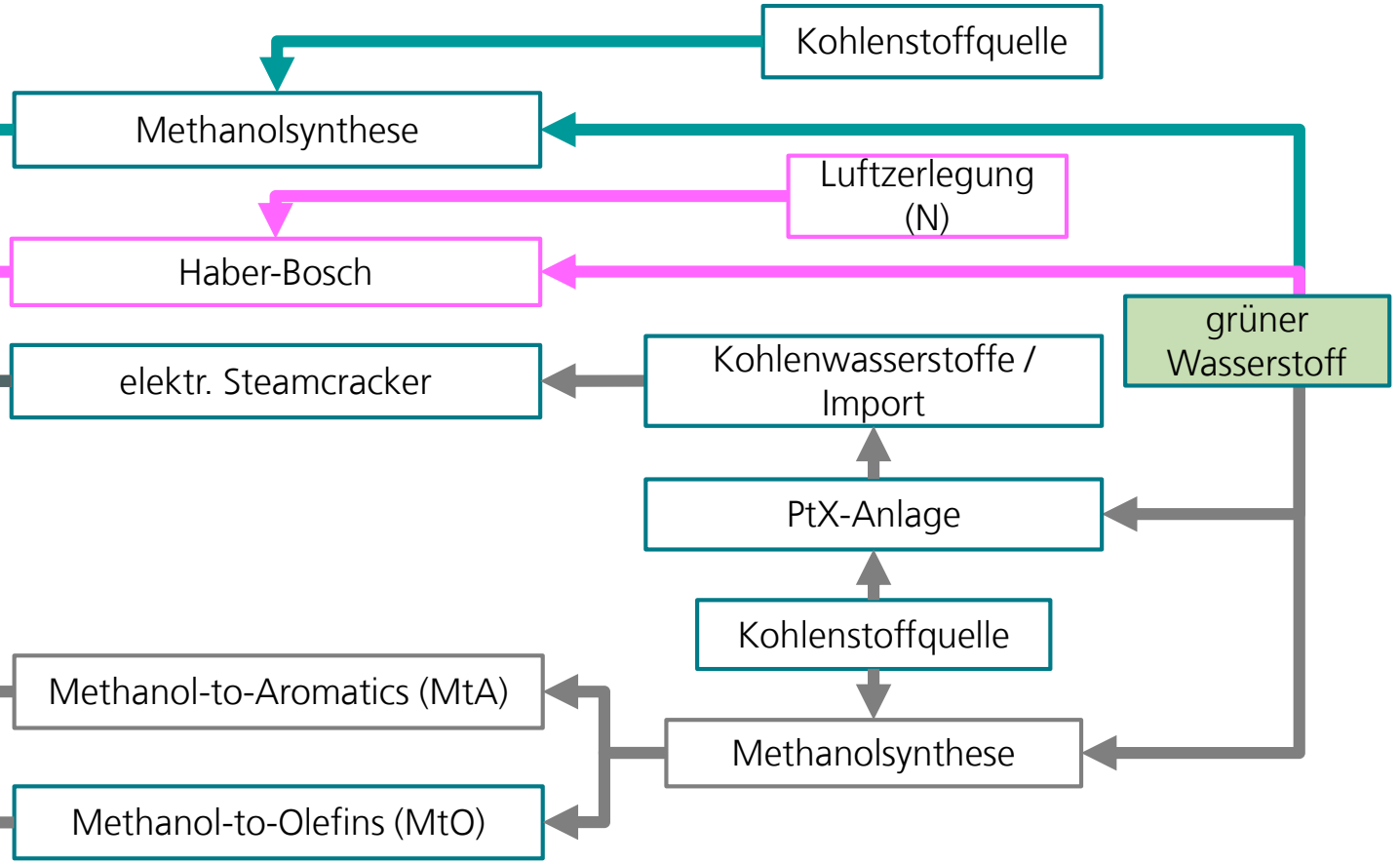
Wasserstoff als Rohstoff für CO_2-neutrale chemische Grundstoffe

Stofflicher Verbrauch 2018 -> 2045



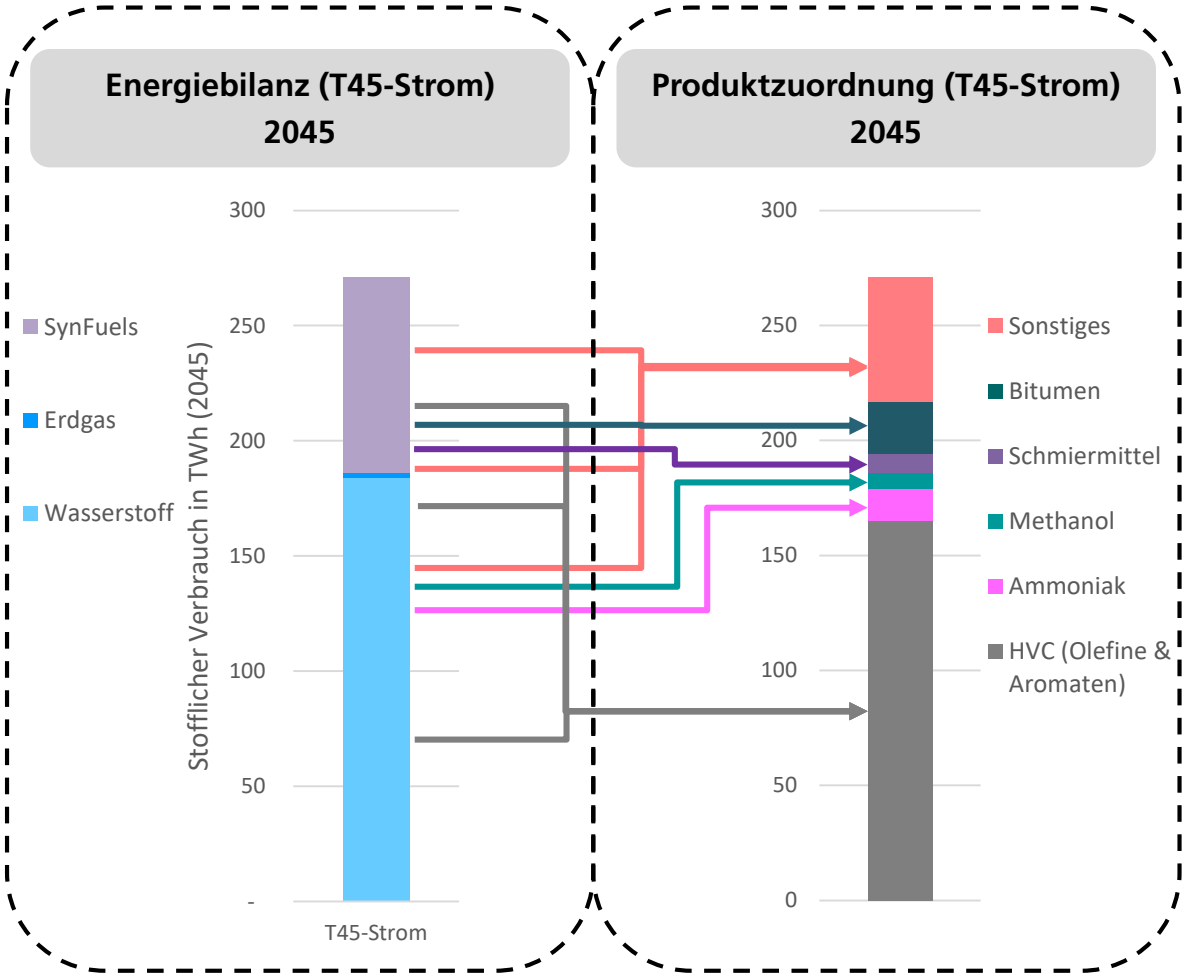


Mögliche CO_2-neutrale Prozessketten auf Basis von grünem Wasserstoff



Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

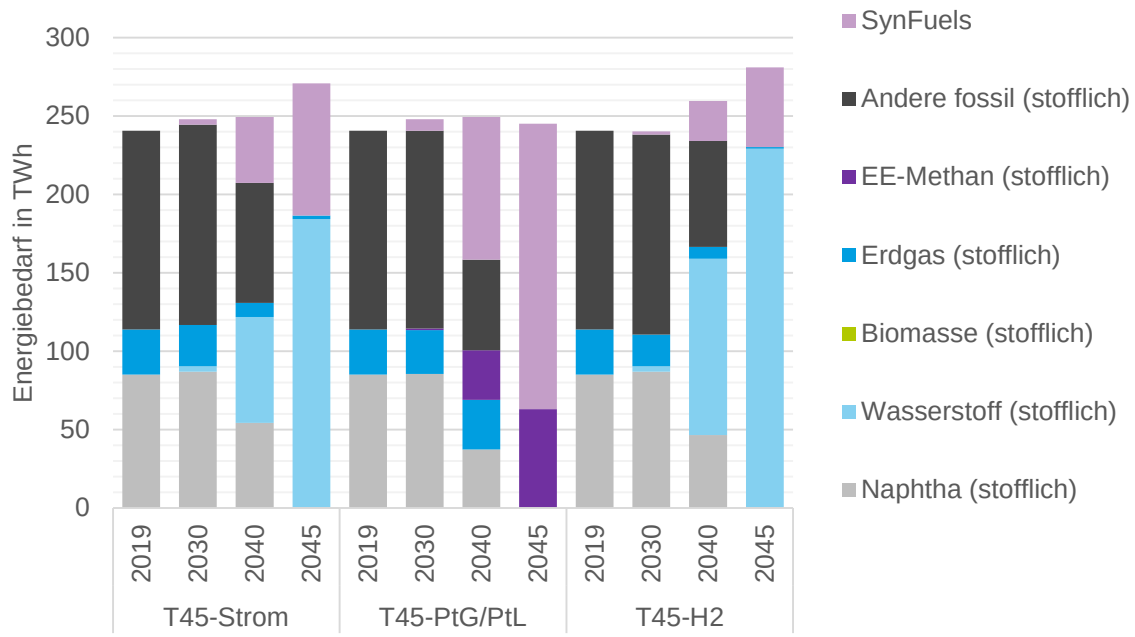
Stofflicher Verbrauch nach Energieträger und Produkt – 2045



- **Stofflicher Verbrauch**
  - In Summe 2045 ähnlich wie 2018
  - **Produktzuordnung:**
    - Produktzuordnung und Höhe stofflichen Verbrauchs nahezu identisch
  - **Energiebilanz:**
    - Änderung in der Energieträgernutzung
    - Höhe des Bedarfs bleibt etwa konstant
    - SynFuels überwiegend für Bitumen, Schmiermittel und Sonstige
    - Einsatz von SynFuels in elektrischen Steamcrackern
- **Bedeutung für 2045 (T45-Strom)**
  - Insgesamt sehr relevant, mit 271 TWh in 2045
  - Davon 184 TWh Wasserstoff
    - Fast vollständig (185 TWh) für HVC, Ammoniak und Methanol
  - Verbleibende Unsicherheiten aus Kategorie „Sonstige“ skaliert in 2045 und Abdeckung durch SynFuels

Alle Szenarien zeigen eine grundlegende Umstellung der Rohstoffversorgung in der chemischen Industrie

Stofflicher Einsatz von Energieträgern



- **Kernergebnisse der stofflichen Nutzung**
  - Stoffliche Nutzung > 250 TWh in allen Szenarien
  - Wasserstoff-Hochlauf für stoffliche Nutzung ab 2030
    - Wasserstoff zentraler Baustein der stofflichen Nutzung in T45-Strom und T45-H2: ~ 200 TWh in 2045
    - Ausnahme wenige Produkte wie z.B. Bitumen
  - Synthetische Energieträger (PtG/PtL) spielen in allen Szenarien eine Rolle
- Große Unsicherheiten hinsichtlich Produktionsmengen und Bedeutung der Importe

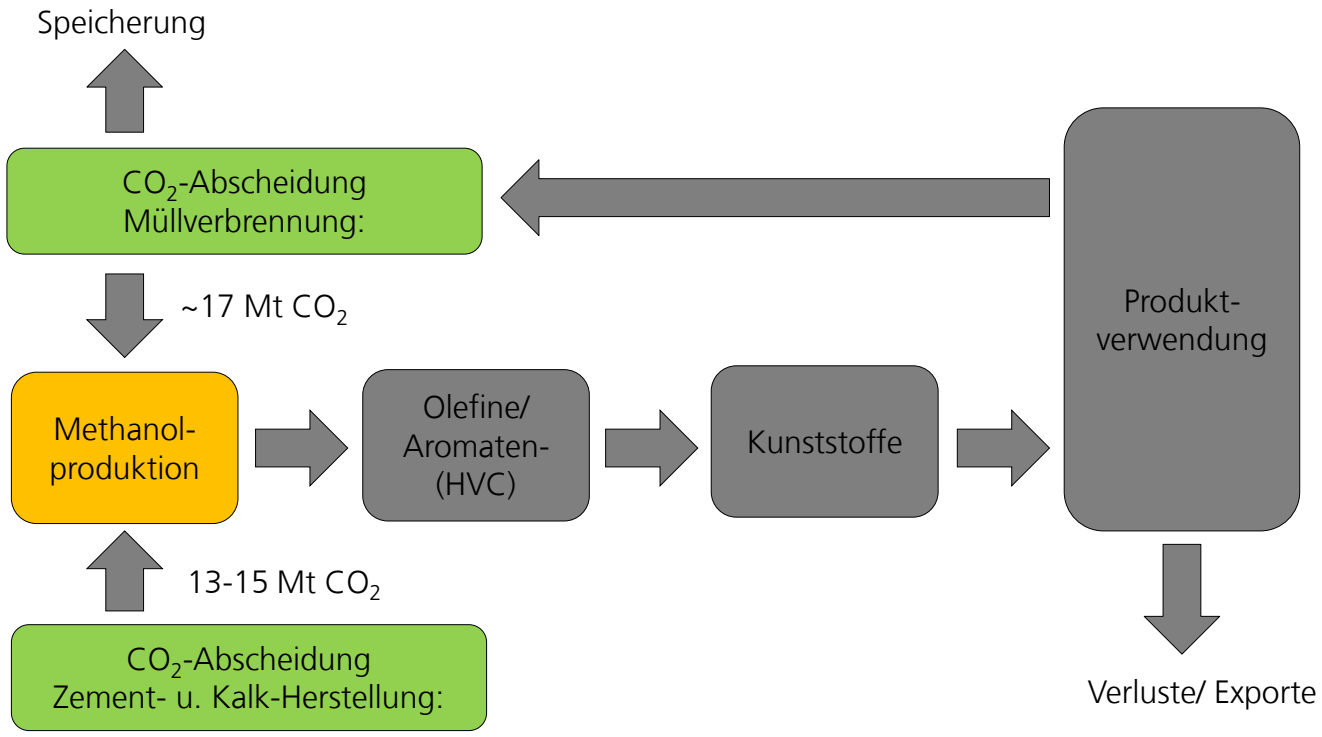
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

CO_2 wird zum Rohstoff für die chemische Industrie

- 1. CO_2 wird Rohstoff:
  - CO_2-Bedarf vor allem für die Herstellung von Methanol auf Basis von Wasserstoff
  - Methanol als Grundstoff für die Kunststoffherstellung
- 2. CO_2-Quellen:
  - Verbleibende prozessbedingte Emissionen der Zement- und Kalkherstellung
- 3. Kreislauf schließen:
  - CO_2-Abscheidung bei der Müllverbrennung
  - Anteil Verbrennung durch Recycling verringern
- 4. CO_2 –Speicherung
  - Offshore, z.B. in der Nordsee

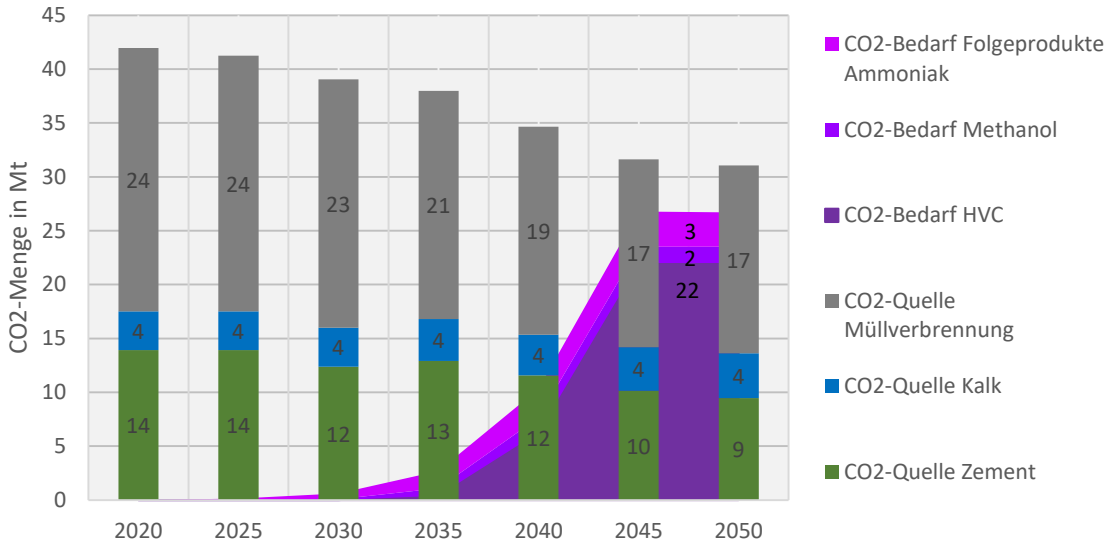
Aufgrund zeitlicher Verschiebung und Verluste im System ist dies lediglich eine Größenordnung

CO_2-Kreislauf in 2045 (T45-Strom und T45-H2)
(stark vereinfachte Darstellung)



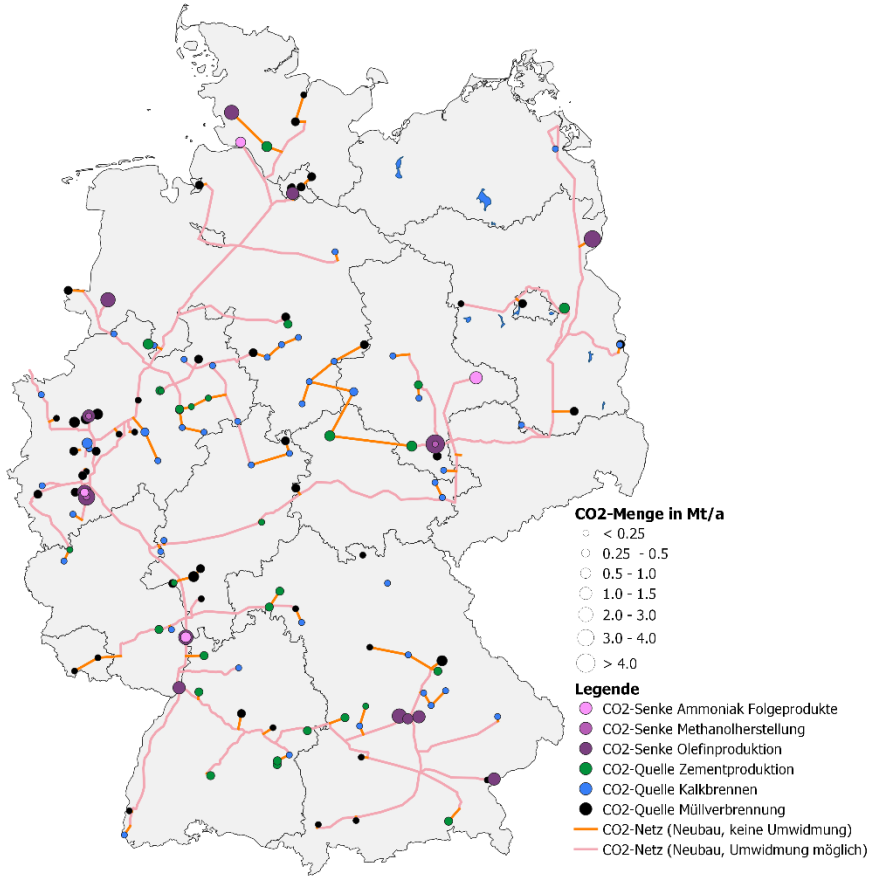
CO_2: Senken, Quellen und ein mögliches Transportnetz

CO_2-Bedarf und -Quellen (T45-Strom)



- CO_2-Bedarf für Methanol und HVC:
  - ~ 30 Mt verteilt auf 14 Anlagen in ganz Deutschland
- Verfügbare CO_2-Quellen: ~ 30-33 Mt
  - Zementindustrie: ~ 9-11 Mt, 32 Standorte
  - Kalkindustrie: ~ 4 Mt, 52 Standorte
  - Müllverbrennungsanlagen: ~ 17 Mt, 55 Standorte

Mögliche CO_2-Senken, -Quellen und -Netz in 2045 (T45-Strom und T45-H2)

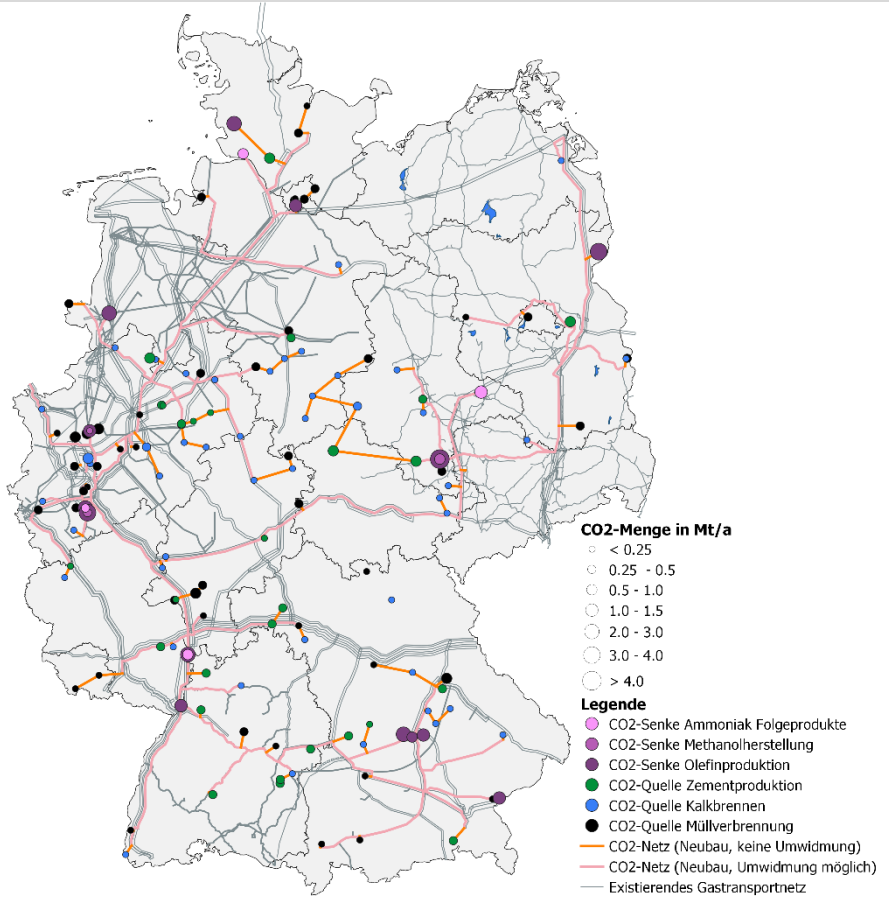


Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

CO_2-Pipelinenetze als Grundlage für CO_2-Speicherung und Nutzung

- Kombinierte CCUS-Strategie:
  - CO_2-Abscheidung bei Zement- und Kalkwerken sowie Müllverbrennung
  - CO_2-Nutzung in der Chemie sowie Speicherung offshore
- Aufbau eines CO_2-Transportnetzes
  - 5.000 - 6.000 km Gesamtlänge
- Teilumbau des Gastransportnetzes zum CO_2-Transport ist theoretisch möglich
  - Große Unsicherheiten hinsichtlich Konkurrenz mit PtG und H_2
  - Vollständiger Neubau des CO_2-Netzes angenommen; Umwidmung erlaubt Kostensenkung

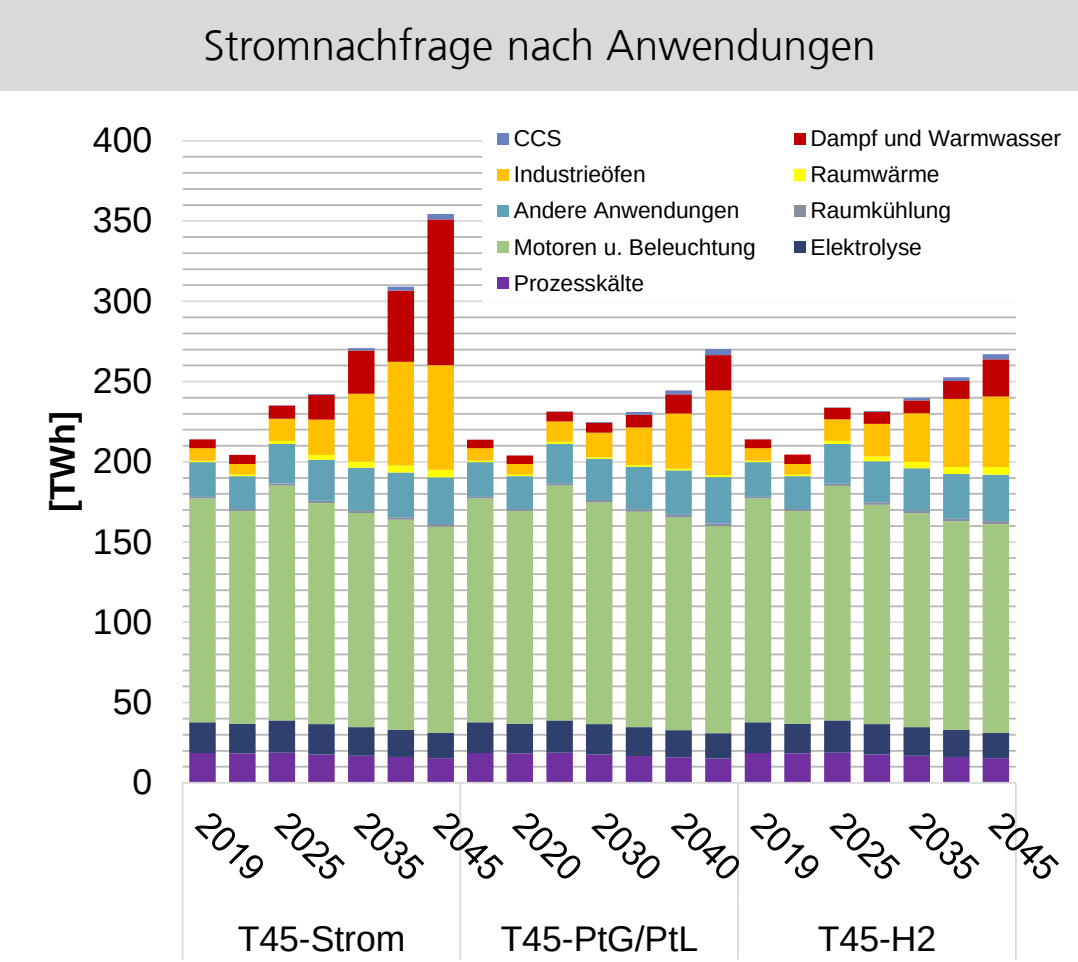
Mögliche CO_2-Senken, -Quellen und -Netz in 2045 (T45-Strom und T45-H2)



Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Ergebnisse Strom, Wasserstoff, PtG/PtL

Die Elektrifizierung der Prozesswärme treibt den Stromverbrauch nach oben



- Konventionelle Stromverbraucher gehen durch Effizienzgewinne in allen Szenarien leicht zurück
- Elektrifizierung der Prozesswärme überkompensiert diesen Rückgang in allen Szenarien, deutlich stärker in T45-Strom:
  - T45-Strom: +146 TWh
  - T45-H2: +54 TWh
  - T45-PtL/PtG: +61 TWh

Die Stromnachfrage steigt in nahezu allen Regionen

Regionale Nachfrage nach Strom 2045 vs. 2019 - T45-Strom

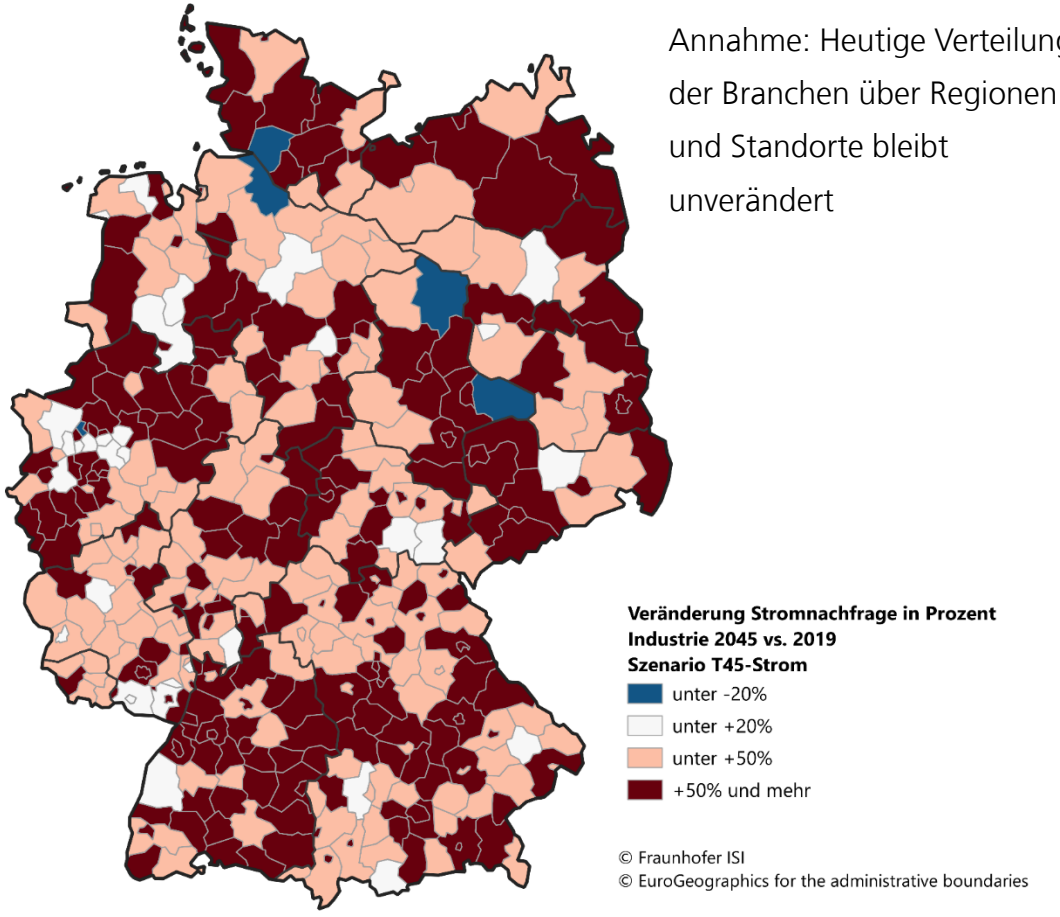
Elektrifizierung der Prozesswärme überkompensiert Effizienzgewinne

Einzelne Standorte z.B. Raffinerien, Chemie, Batteriefabriken,... sind wichtige Treiber

T45-Strom

Die Stromnachfrage steigt in nahezu allen Regionen; in mehr als der Hälfte der Regionen ist der Anstieg höher als 50%

Prozessumstellung an einzelnen Standorten hat z.T. großen Einfluss auf Region

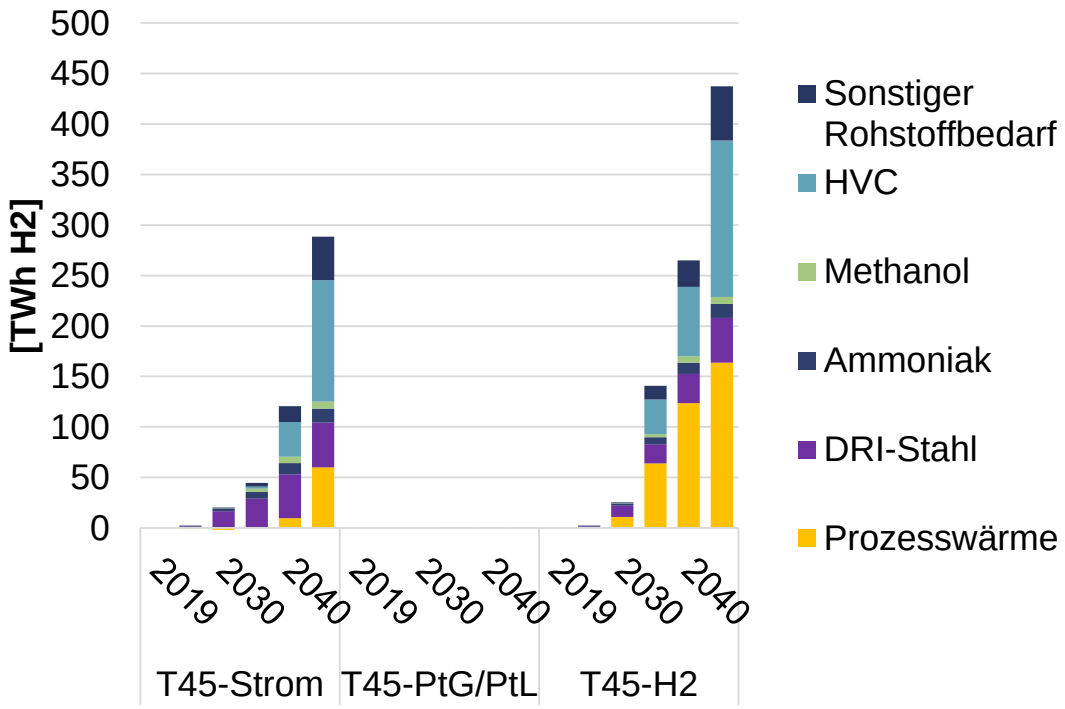


Annahme: Heutige Verteilung der Branchen über Regionen und Standorte bleibt unverändert

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Wasserstoff nach Anwendungen

Einsatz von Wasserstoff nach Anwendungen

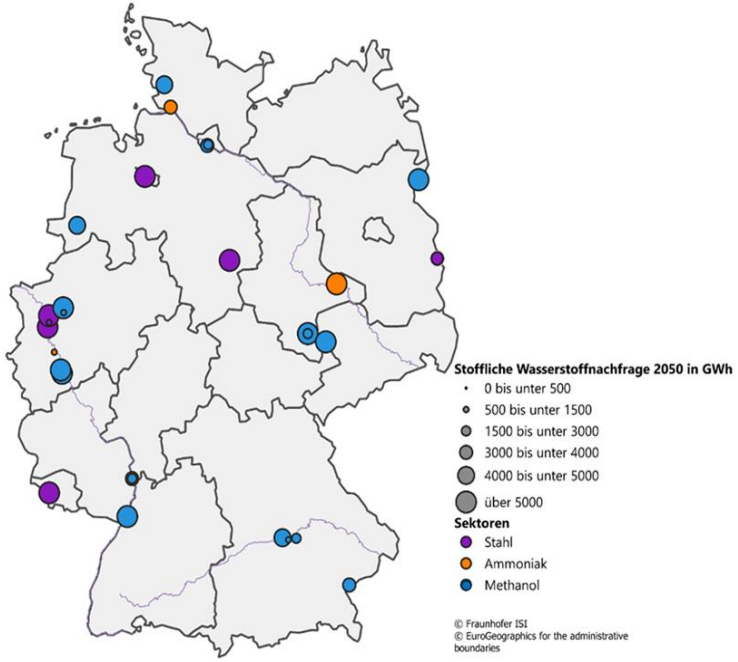


- 2030
  - Wasserstoff zunächst für DRI-Stahl (11-17 TWh)
- Nach 2030
  - Zunehmend Prozesswärme und chemische Grundstoffe
- Bis 2045
  - T45-H2: 437 TWh
  - T45-PtG/PtL: 0 TWh
  - T45-Strom: 289 TWh
- Unterschiede der Szenarien maßgeblich bei Prozesswärme und damit auch bei der regionalen Verteilung
- Hohe Unsicherheit: Produktionsmenge und Verfahren bei chemischen Grundstoffen

Verschiedene Wasserstoff-Welten im Jahr 2045

~20 zentrale Stahl- und Chemie-Standorte

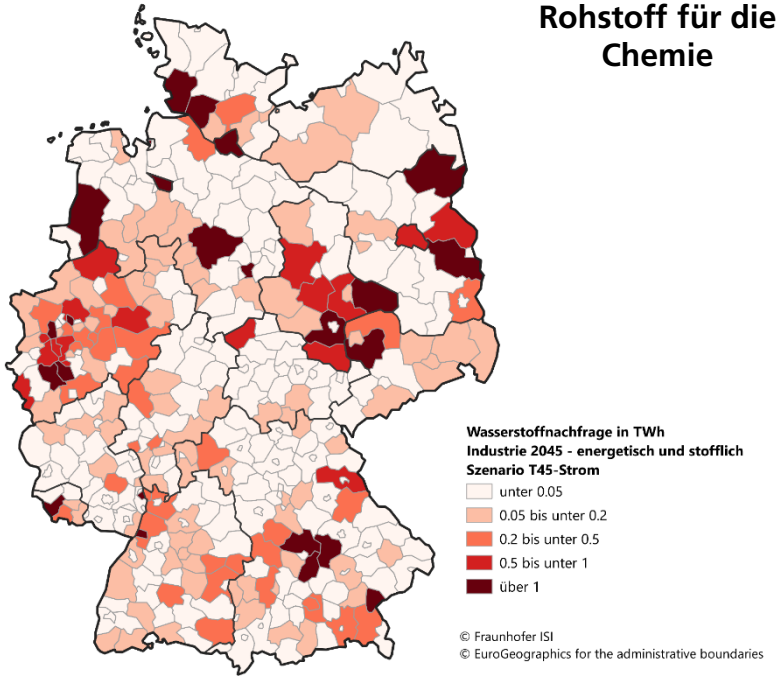
229 TWh Wasserstoff



+ 60 TWh H_2 für Prozesswärme

T45-Strom

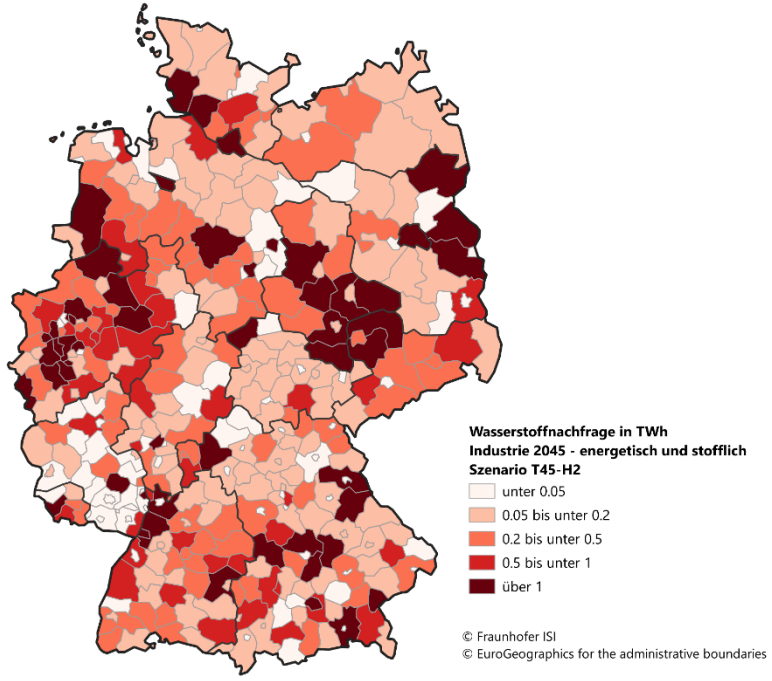
289 TWh Wasserstoff



+ 104 TWh H_2 für Prozesswärme + 42 TWh H_2 als Rohstoff für die Chemie

T45-H2

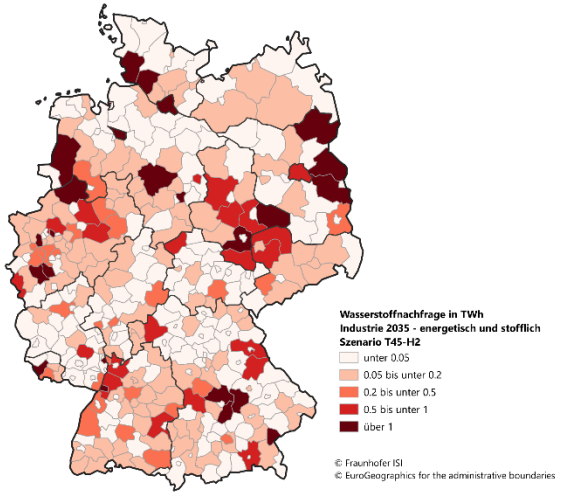
437 TWh Wasserstoff



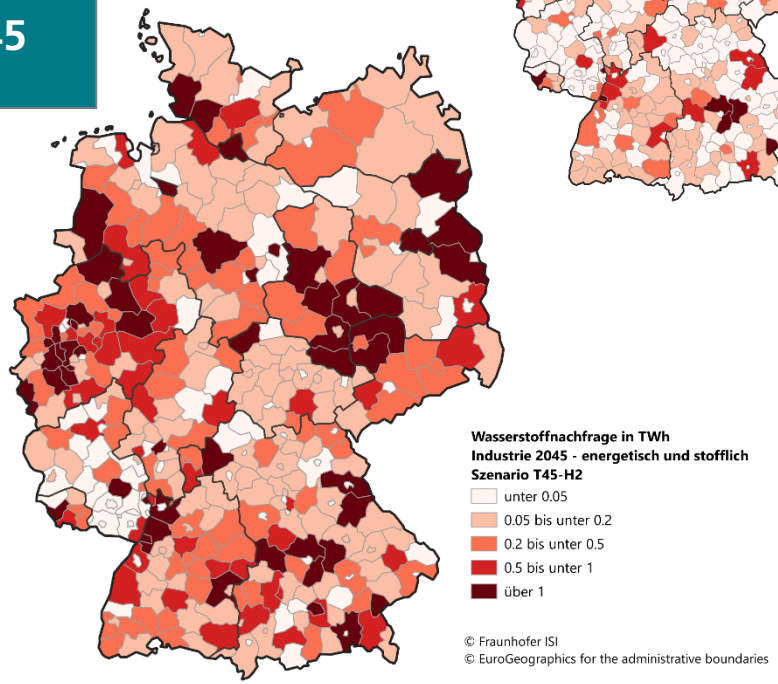
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Wasserstoffnachfrage 2035/2045 in den Regionen Im Szenario T45-H2

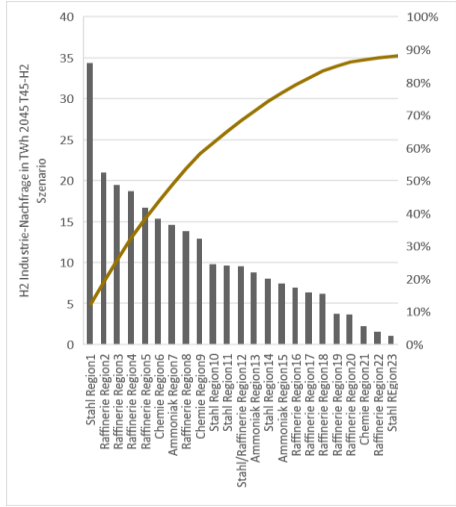
2035



2045



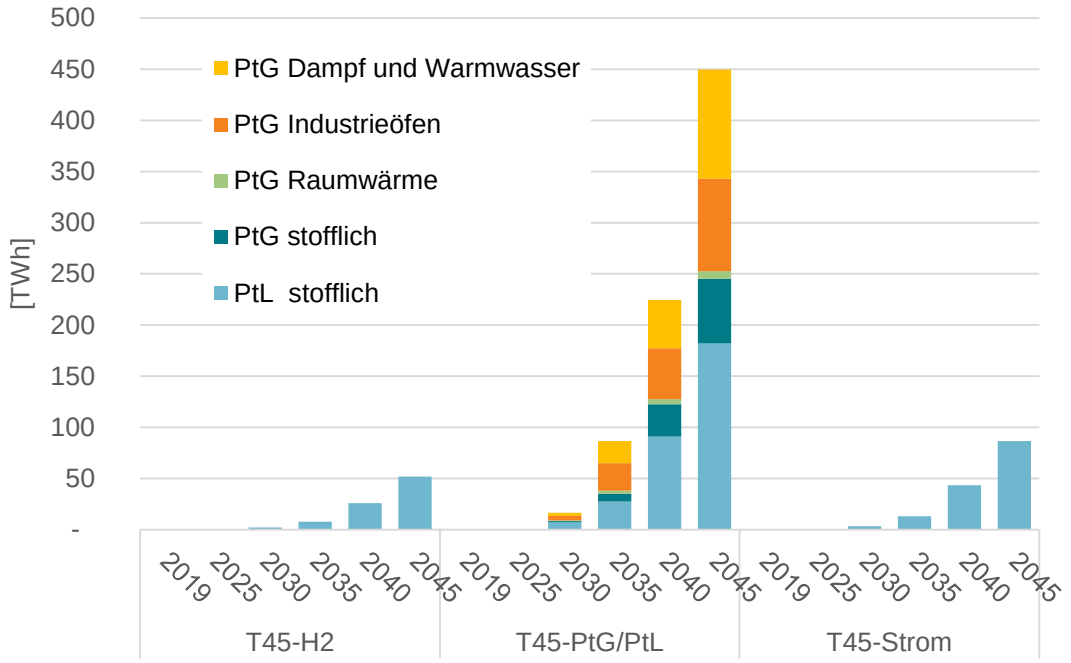
- H_2 in Prozesswärme führt zu breiterer regionaler Verteilung im T45-H2
- 2035: Regionen mit hoher Wasserstoffnachfrage T45-Strom und T45-H2
- 2045: Diffusion in viele Regionen
  - darunter ~50 Regionen (v.a. Stahl und Chemie) mit mehr als 1 TWh/a: 83% der H_2 Gesamtnachfrage
  - Hälfte der Regionen nur geringfügige Nachfrage (<0,2 TWh): <4% der H_2 Gesamtnachfrage



Fraunhofer ISI consentec ifeu berlin E&R Energy and Resources

Nachfrage nach PtG und PtL

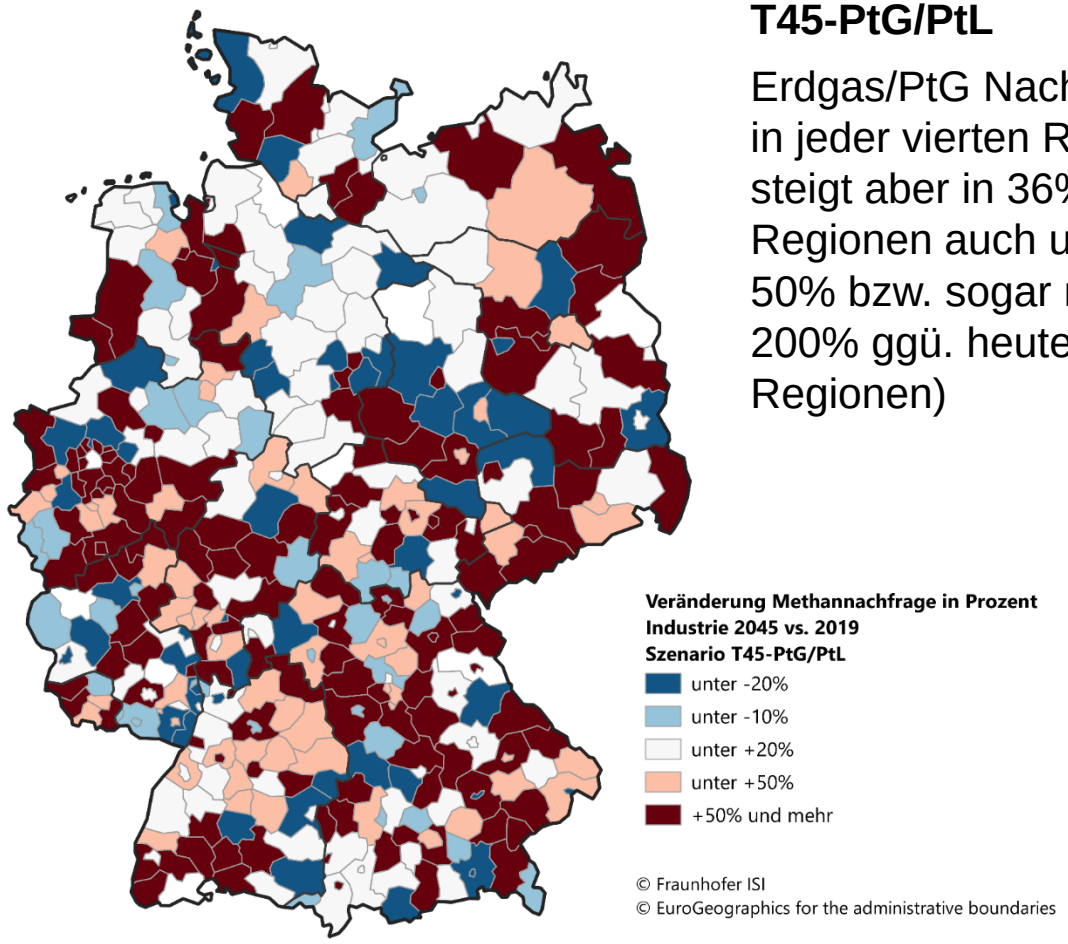
Einsatz von PtG und PtL



- PtG
  - PtG nur relevant in T45-PtG/PtL
  - PtG ersetzt dort Erdgas fast 1:1
  - Relevant in allen Bereichen der Wärmeerzeugung und als Rohstoff
    - Rohstoffliche Nutzung ergänzt durch PtL (z.B. synthetisches Naphtha)
  - Bis 2045 in T45-PtG/PtL 270 TWh
- PtL
  - Einsatz als Rohstoff in allen Szenarien (exogene Annahme der Produktionsroute)

Regionale Nachfrage nach Methan/PtG 2045 vs. 2019 T45-PtG/PtL

	T45-PtG/PtL
Stahl: 15 Hochöfen in 5 Regionen	Umstellung Hochofen auf Direktreduktion: starker Anstieg
Chemie (stofflich): Methanol und Ammoniak je 4 Standorte, 15 Raffinerien	Ethylen/Raffinerie-Standorte haben höheren PtG-Bedarf für stofflichen Einsatz
PtG für die **Prozesswärme**	PtG-Bedarf in nahezu allen Regionen, wo heute Erdgas genutzt wird



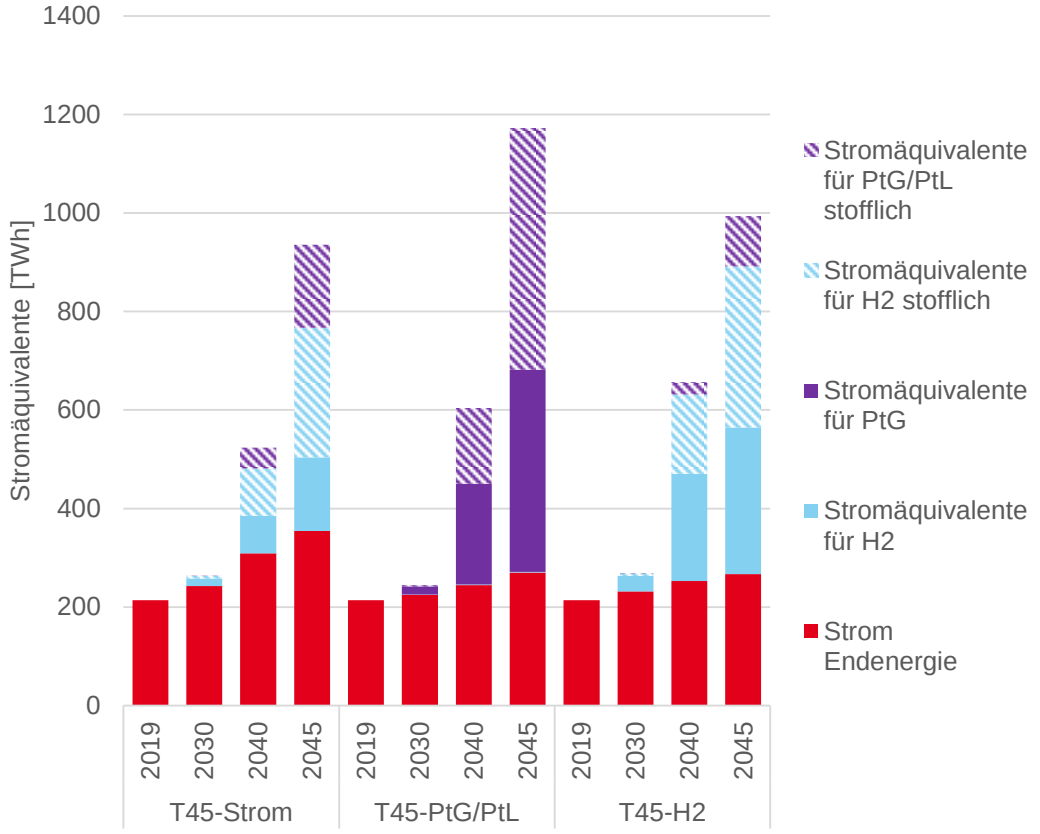
T45-PtG/PtL

Erdgas/PtG Nachfrage sinkt in jeder vierten Region, steigt aber in 36% der Regionen auch um mehr als 50% bzw. sogar mehr als 200% ggü. heute (36 Regionen)

Fraunhofer ISI consentec ifeu berlin E&R Energy and Resources

Stromäquivalente nach Anwendungen

„Stromäquivalente“ für die Versorgung der Industrie



- Ansatz: Überschlägige Umrechnung von H_2/PtG/PtL in Stromäquivalente mit
  - Strom -> H_2: 70% Effizienz
  - Strom -> PtG/PtL: 50% Effizienz
- T45-PtG/PtL wird dadurch zum energieintensivsten Szenario (fast 1200 TWh Stromäquivalente)
- T45-Strom ~20% weniger
- Indirekte Stromnachfrage (H_2, PtG/PtL) übersteigt direkte Stromnachfrage in allen Szenarien
- Sektorale Bewertung schwierig: Stromnachfrage entsteht nicht vollständig national -> Angebotssektor

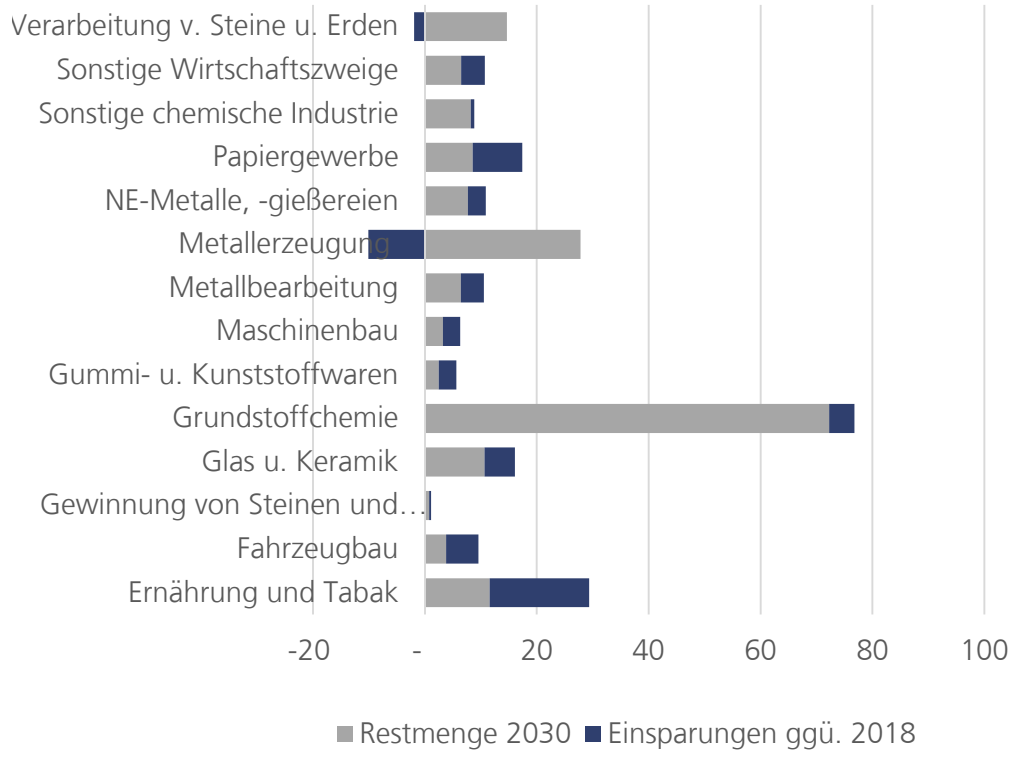
Schlussfolgerungen I: Regionale Verteilung

- **Einordung**
  - Große Unterschiede in der Entwicklung der Regionen.
  - Regional ist die Industriestruktur durch wenige sehr große Standorte geprägt. Diese haben einen großen Einfluss auf den Energiebedarf.
  - Die Szenarien sind in ihrer Ausprägung in vielen Regionen deutlich extremer als im Bundesdurchschnitt.
  - Hohe Unsicherheit bei der zukünftigen Entwicklung einzelner Standorte, insbesondere bei der Umstellung auf neue Verfahren.
  - Abseits von großen Industriezentren wird Wasserstoff nur geringfügig benötigt.
- **Schlussfolgerung**
  - Regionale Unterschiede stellen hohe Herausforderungen an lokale Infrastrukturen.
  - Der Aufbau eines H_2-Transportnetzes muss große Nachfragezentren berücksichtigen.
  - Die breite Nutzung von Wasserstoff und der Aufbau eines entsprechenden Netzes erhöhen den Aufwand für Infrastruktur enorm.

T45-RedEff und T45-RedGas

Ausgangslage: Geringer Rückgang beim Gasverbrauch in T45-Strom bis 2030

T45-Strom:
Gasverbrauch 2030 und Änderung gegenüber 2018



Summe

- -21% bis 2030 gegenüber 2019

Papiergewerbe:

- Deutlicher Rückgang

Metallerzeugung

- Mehrverbrauch durch CH_4-DRI

Grundstoffchemie

- Geringer Rückgang (H_2-Chemie noch nicht wettbewerbsfähig)

Ernährung und Papier

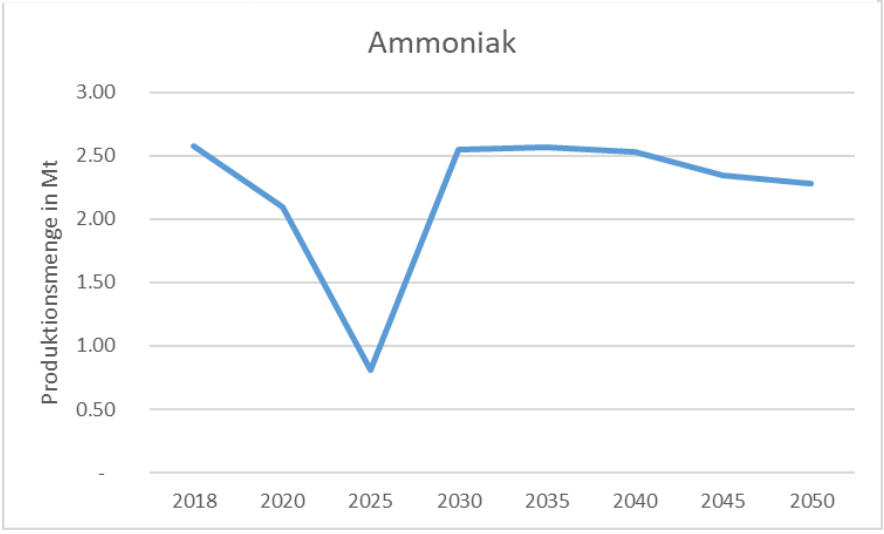
- Deutliche Reduktion (effiziente HT-Wärmepumpe)

T45-RedEff und T45-RedGas basieren auf T45-Strom mit gezielten Änderungen

T45-Strom

- **T45-RedEff**
  - Geringere Energieeffizienz
    - EnEff-Maßnahmen werden maximal zu 60% umgesetzt (T45-Strom: 80%)
    - Höhere Anforderungen an Wirtschaftlichkeit (Umsetzung relevant ab etwa 5 Jahre Amortisationszeit)
  - Geringere Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft
  - Weniger Wärmepumpen
- **T45-RedGas**
  - Starke Reaktion auf Gaspreisschock
  - Keine neuen Erdgasverbraucher (CH_4-DRI)
  - Schnellerer Anlagenaustausch
  - Kurzzeitige Reduktion Ammoniakproduktion
  - Frühere Förderung Elektrifizierung
  - Höhere Förderung H_2-Anwendungen

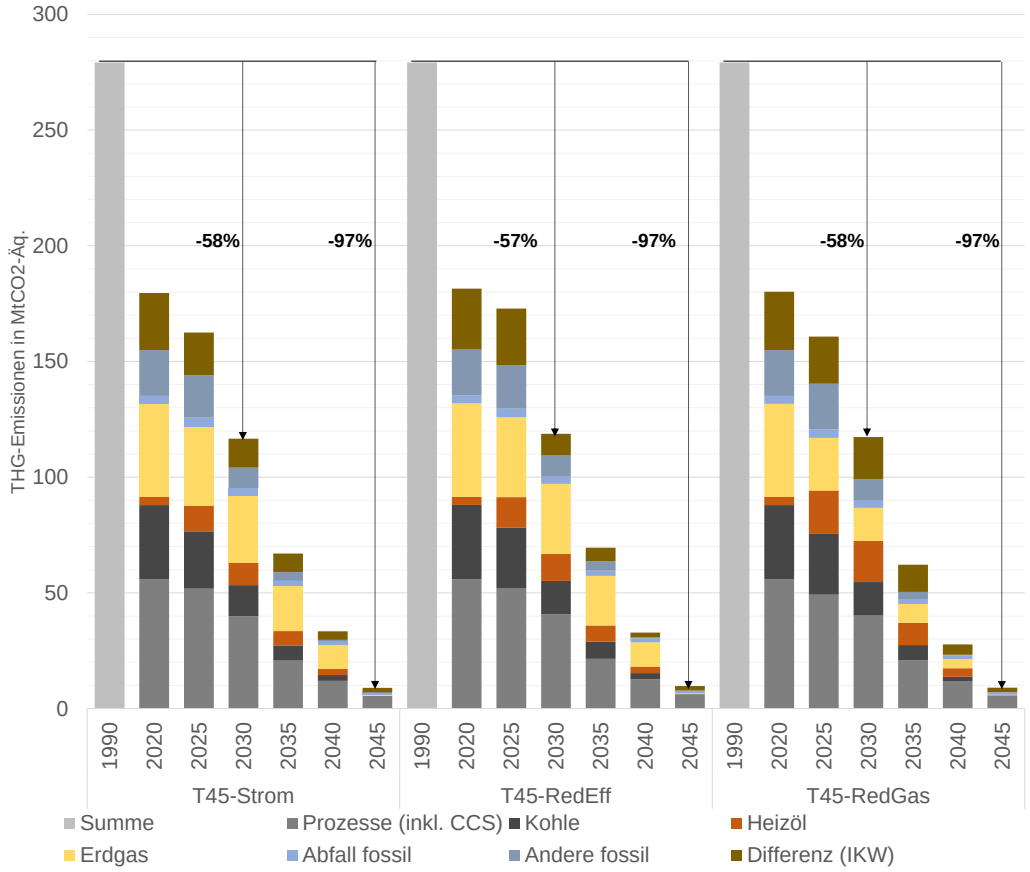
Produkt	Recyclingquoten bis 2045
Stahl	Anstieg von 30% (2018) auf 37% (T45-RedEff) statt auf 48% (T45-Strom)
Aluminium	Anstieg von 59% (2018) auf 60% (T45-RedEff) statt auf 73% (T45-Strom)
Kupfer	Anstieg von 41% (2018) auf 51% (T45-RedEff) statt auf 62% (T45-Strom)
Papier	Anstieg von 76% (2018) auf 77% (T45-RedEff) statt auf 82% (T45-Strom)



Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Ergebnisse Sensitivitäten: Treibhausgasemissionen

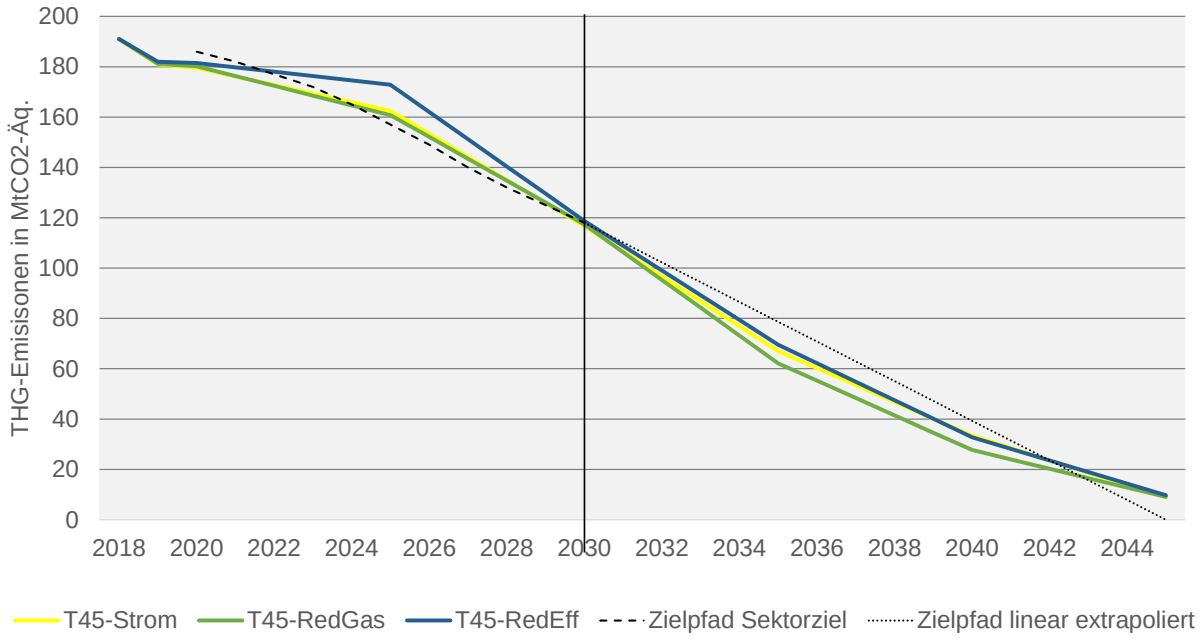
THG-Emissionen nach Definition Klimaschutzgesetz



- T45-RedEff
  - 2030-Ziel geringfügig verfehlt (<1Mt$_{CO2-Äq.}$)
  - 2045 gleiches Niveau wie T45-Strom
- T45-RedGas
  - 2030-Ziel wird erreicht
  - Deutliche Zunahme der Emissionen aus Heizöl bis 2030 (+8Mt$_{CO2-Äq.}$(+87%) ggü. T45-Strom)
  - Überkompensiert durch Rückgang beim Erdgas (2030: -15Mt$_{CO2-Äq.}$(-52%) ggü. T45-Strom)
  - 2045 gleiches Niveau wie T45-Strom

Ergebnisse Sensitivitäten: Treibhausgasemissionen II

THG-Emissionen nach Definition Klimaschutzgesetz



- **2030**: Erreichte Minderung: 57 - 58%
  - T45-Variationen halten 2030-Sektorziele und Budget bis 2045 ein
  - Emissionen im T45-RedEff liegen vor 2030 aber deutlich über allen T45-Szenarien

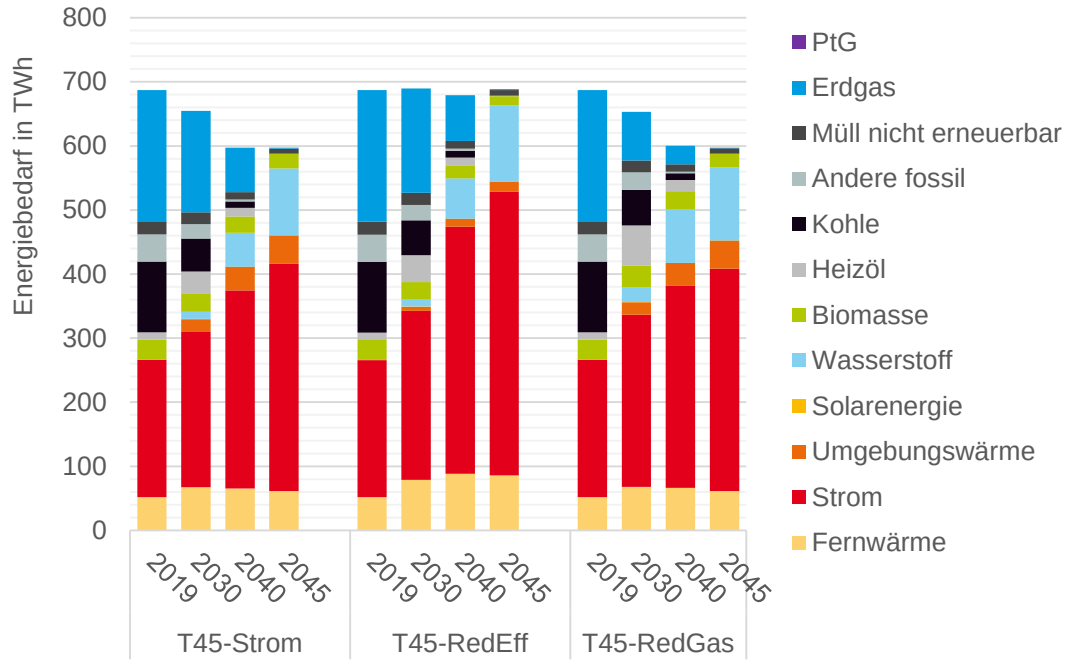
Kumulierte THG-Emissionen 2020-2045

	[$MtCO_2$-Äq.]
T45-Strom	**2464**
T45-PtG/PtL	2466
T45-H2	2406
T45-RedGas	**2408**
T45-RedEff	**2543**

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Sensitivitäten zeigen Bandbreiten des Energieverbrauchs

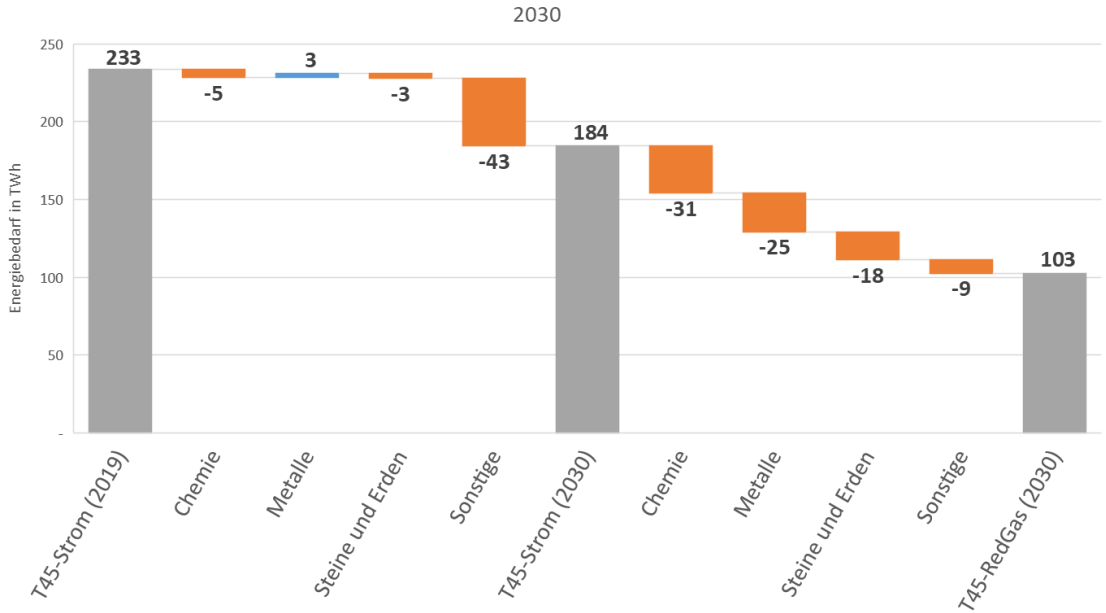
Endenergie nach AGEB



- **T45-RedEff** im Vergleich zu T45-Strom
  - +200 TWh Energiebedarf in 2045, ähnliche Energieträgeranteile
    - 320 TWh Wasserstoff (+30TWh)
    - 450 TWh Strom (+90 TWh)
    - 165 TWh Kohlenwasserstoffe (+70 TWh)
- **T45-RedGas** im Vergleich zu T45-Strom
  - Langfristig fast identisch
  - Kurz- und mittelfristig reduzierter Erdgaseinsatz
    - 2025: 133 TWh (-70 TWh)
    - 2030: 103 TWh (-81 TWh)
    - 2040: 38 TWh (-40 TWh)
  - In T45-RedGas wird 2030 mehr Heizöl, Strom und Wasserstoff genutzt.

T45-RedGas ersetzt Erdgas in allen Subsektoren

Veränderung Einsatz von Erdgas von 2019 bis 2030

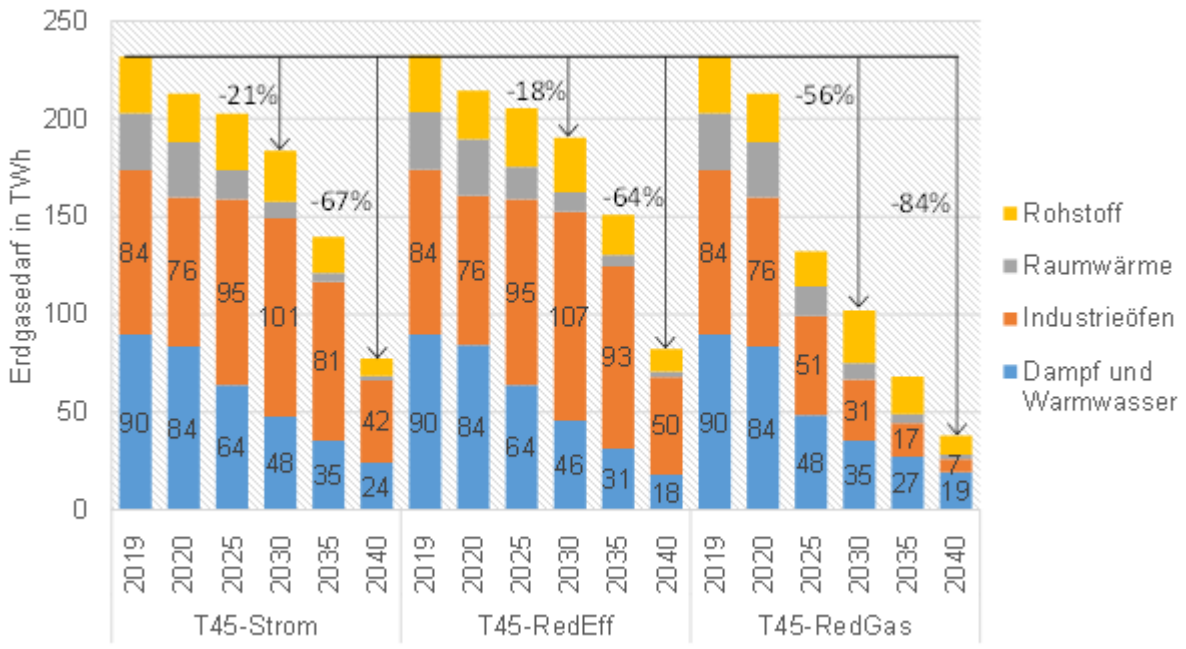


- T45-Strom reduziert vor allem in der Papier- und Nahrungsmittelindustrie Erdgas (Elektrifizierung Dampf)
- T45-RedGas beschleunigt Gasausstieg in Chemie, Metallen und Zement
- Insgesamt sinkt der Erdgasbedarf in T45-Strom um 21%, in T45-RedGas um 56%.
  - T45-Strom: -49 TWh Erdgas ggü. 2019
  - T45-RedGas: -130 TWh Erdgas ggü. 2019

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Beschleunigter Rückgang beim Gasverbrauch in T45-RedGas

Gasverbrauch 2030 und Änderung gegenüber 2018



T45-Strom

- -21% bis 2030 gegenüber 2019
  - Danach hoher Gradient bis 2045
  - Großer Block 2040-2045 (~80 TWh)

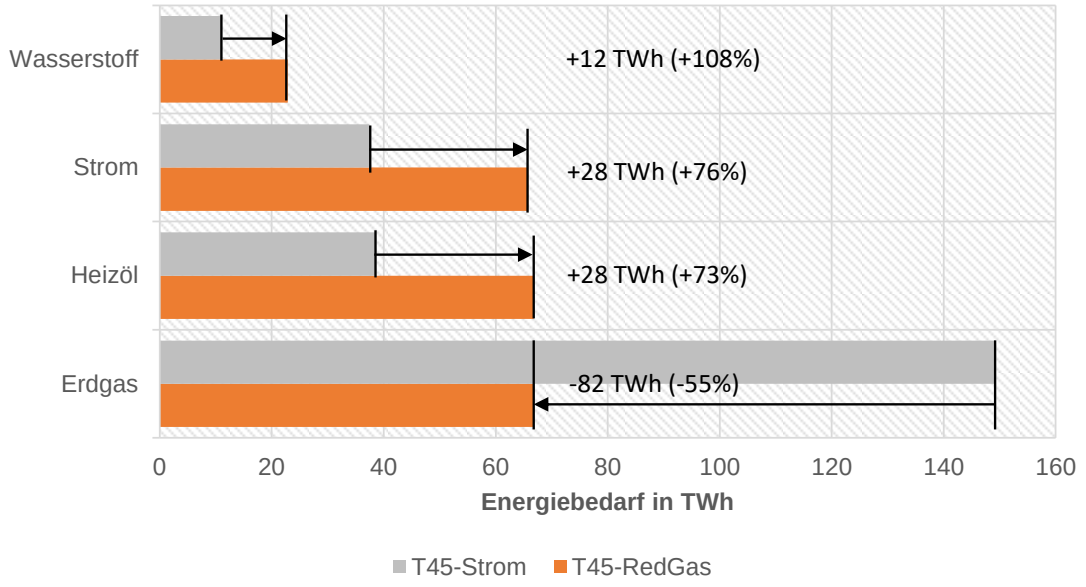
T45-RedGas

- -56% bis 2030 gegenüber 2019
  - Danach stetiger Verlauf.
  - Geringe Restmenge 2040 (~30 TWh)

Die hohen Gradienten tauchen in beiden Szenarien auf – zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

Ergebnis: In T45-RedGas wird in der Prozesswärme Erdgas substituiert

Bereitstellung von Prozesswärme 2030 [TWh/a]
Änderung im T45-RedGas ggü. T45-Strom



- Beschleunigter **Gasausstieg** in der Prozesswärme -> Reduktion um 55% in 2030 gegenüber T45-Strom
- **Mehr Wasserstoff** (+108%)
- **Schnellere Elektrifizierung** (+76%)
- Starker Anstieg beim **Heizöl** (+73%), nach 2030 Rückgang

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zusammenfassung: Szenarienvergleich zeigt große Unterschiede der Sekundärenergieträger

	Einheit	T45-Strom	T45-PtG/PtL	T45-H2	T45-RedEff	T45-RedGas
Wertschöpfung	%/Jahr	1%	1%	1%	1%	1%
THG-Minderung (2030)	%	58%	56%	59%	57%	58%
THG-Minderung (2045)	%	97%	97%	96%	97%	97%
Energieeffizienz	-	++	++	++	0/+	++
Materialeffizienz und Kreislauf	-	+	+	+	0/+	+
Erdgas (inkl. stofflich) (2030)	TWh	184	222	178	191	103
Biomasse (2045)	TWh	23	26	16	15	22
Wasserstoff (2045)	TWh	289	0	437	315	298
PtG/PtL (2045)	TWh	84	388	51	148	84
Elektrifizierung PtH (2045)	TWh	161	76	72	227	153
CCS / CCU (2045)	$MtCO_2$	15	16	13	15	15

Schlussfolgerungen Zielsystem

- **THG-Minderung von ~96-97%** ggü. 1990 im Industriesektor in allen Szenarien erreicht, Restemissionen in einzelnen Prozessen
- Wichtige Voraussetzungen
  - Neue CO_2-neutrale Herstellungsverfahren sind **zwischen 2025 und 2030 marktfähig** und erreichen 100% Bestandsdiffusion bis 2045 in den Grundstoffbranchen
  - Große Mengen grüner Strom/Wasserstoff/PtG sind verfügbar und **verdrängen fossile Energieträger vollständig**
  - **Grüner Wasserstoff** oder PtG/PtL versorgen Chemie und Stahlindustrie als Rohstoff
  - **Kreislaufwirtschaft** setzt sich weiter durch: Elektrostahl wird für Qualitätsstähle verwendet, stärkeres Kunststoffrecycling
  - **Materialeffizienz** entlang der Wertschöpfungskette steigt deutlich, besonders in der Bauwirtschaft
  - Ambitionierte **Energieeffizienz** sichert Zielerreichung ab und verringert die Nutzung hochwertiger Energieträger
  - CO_2 wird Rohstoff: **CO_2-Kreislauf über den Kunststoff-Lebenszyklus** wird etabliert
  - **Infrastruktur**: Umbau/Ausbau nötig, besonders in stark betroffenen Regionen; Abhängigkeit mit Umbau des Anlagenparks
  - T45-*PtG/PtL* zeigt die geringeren **Anpassungen am Anlagenbestand** der Industrie und bei der Infrastruktur, ist jedoch auch auf neue Verfahren angewiesen (Stahl, Zement)
  - Bestandsanlagen der Prozesswärmeerzeugung werden deutlich schneller als in der Vergangenheit ausgetauscht

Schlussfolgerungen Meilenstein 2030

- **2030-Zielerreichung ist möglich**, erfordert unter anderem:
  - **Umbau der Stahlindustrie:** Ermöglicht große Mengen CO_2-intensive Kohle durch Erdgas und Wasserstoff zu ersetzen (~ 10 Mt Rohstahl über DRI in 2030) – auch danach weiter hohe Dynamik
  - **Beschleunigten Einsatz von Strom und Wasserstoff in der Prozesswärme** als Ersatz von Erdgas
  - **Beschleunigten Ausbau der Erneuerbaren im Stromsektor** sowie die Verfügbarkeit **großer Mengen von grünem Wasserstoff**
  - **Einstieg in den Aufbau einer CCUS Infrastruktur** (~2 Mt CO_2-Abscheidung)
  - **Große Mengen PtG** im Szenario T45-PtG/PtL
- Deutliche Fortschritte hin zu einer **energie- und materialeffizienten Kreislaufwirtschaft** vereinfachen die Zielerreichung, sind aber nicht hinreichend
- Die **Wechselwirkungen mit dem Stromsektor** sind sehr groß:
  - **Elektrifizierung** verschiebt unter Umständen Emissionen aus dem Industriesektor in den Stromsektor (ohne große Effizienzgewinne)
  - **Industriekraftwerke** machen einen großen Teil der Emissionen im Industriesektor aus
- Große Unsicherheiten hinsichtlich Produktionsentwicklung der Grundstoffindustrie

Kontakt:
Tobias.Fleiter@isi.fraunhofer.de

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Mehr Informationen und Updates gibt es auf:

https://www.langfristszenarien.de/