LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND

Treibhausgasneutrale Szenarien T45

Überblickswebinar 15.11.2022, Dr. Frank Sensfuß (Fraunhofer ISI)

T45 Hauptszenarien

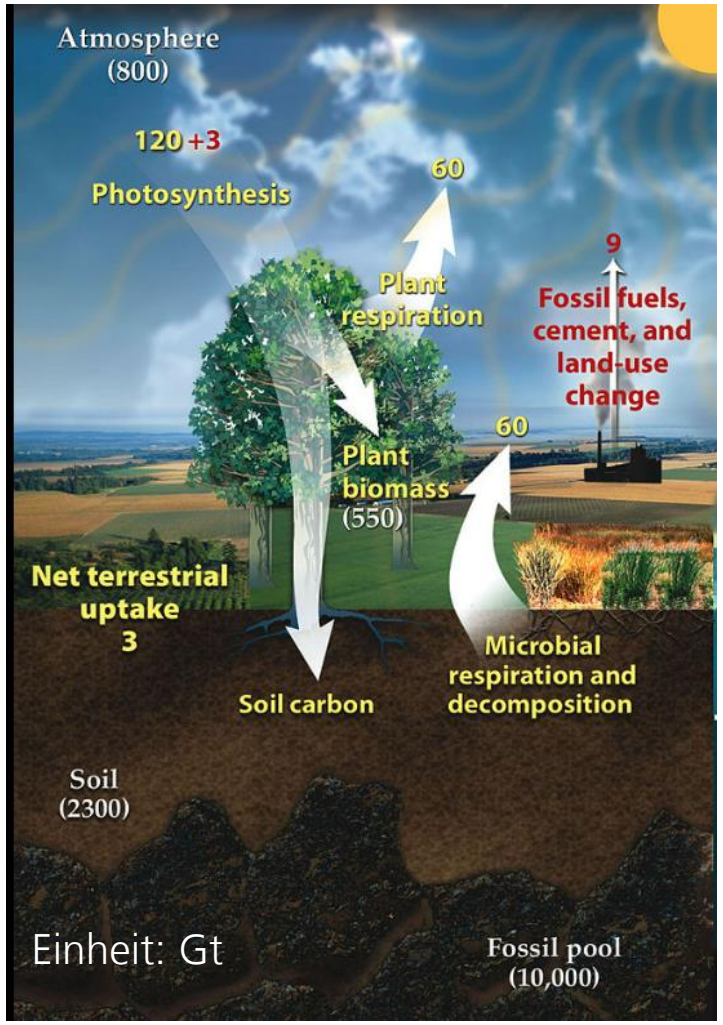
Autoren:
Sensfuß, Frank; Lux, Benjamin; Bernath, Christiane; Kiefer, Christoph; Pfluger, Benjamin; Kleinschmitt, Christoph; Franke, Katja; Fragoso Garcia, Joshua; Deac, Gerda; Männer, Wolfgang; Brugger, Heike; Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Herbst, Andrea; Manz, Pia; Neuwirth, Marius; Wietschel, Martin; Gnann, Till; Speth, Daniel; Krail, Michael; Mellwig, Peter; Blömer, Sebastian; Köppen, Susanne; Tersteegen, Bernd; Maurer, Christoph; Ladermann, Alexander; Dröscher, Tom; Willemsen, Sebastian; Müller-Kirchenbauer, Joachim; Evers, Maximilian; Akça, Okan; Jiang, Dongrui; Hollnagel, Jeremias; Giehl, Johannes; Mielich, Tim

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

Agenda

- Vorbemerkungen & Konzept der Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Netze
- Gesamtbild
- Zusammenfassung & Diskussion

Die Ausgangslage I/III
Das Kohlenstoff-Dilemma der Menschheit



Ausgangslage
Die Menschheit verändert das Klima durch starken Anstieg des Kohlenstoffgehalts in der Atmosphäre.

Erkenntnis
Der Fußabdruck der Menschheit im Kohlenstoffkreislauf ist zu hoch.

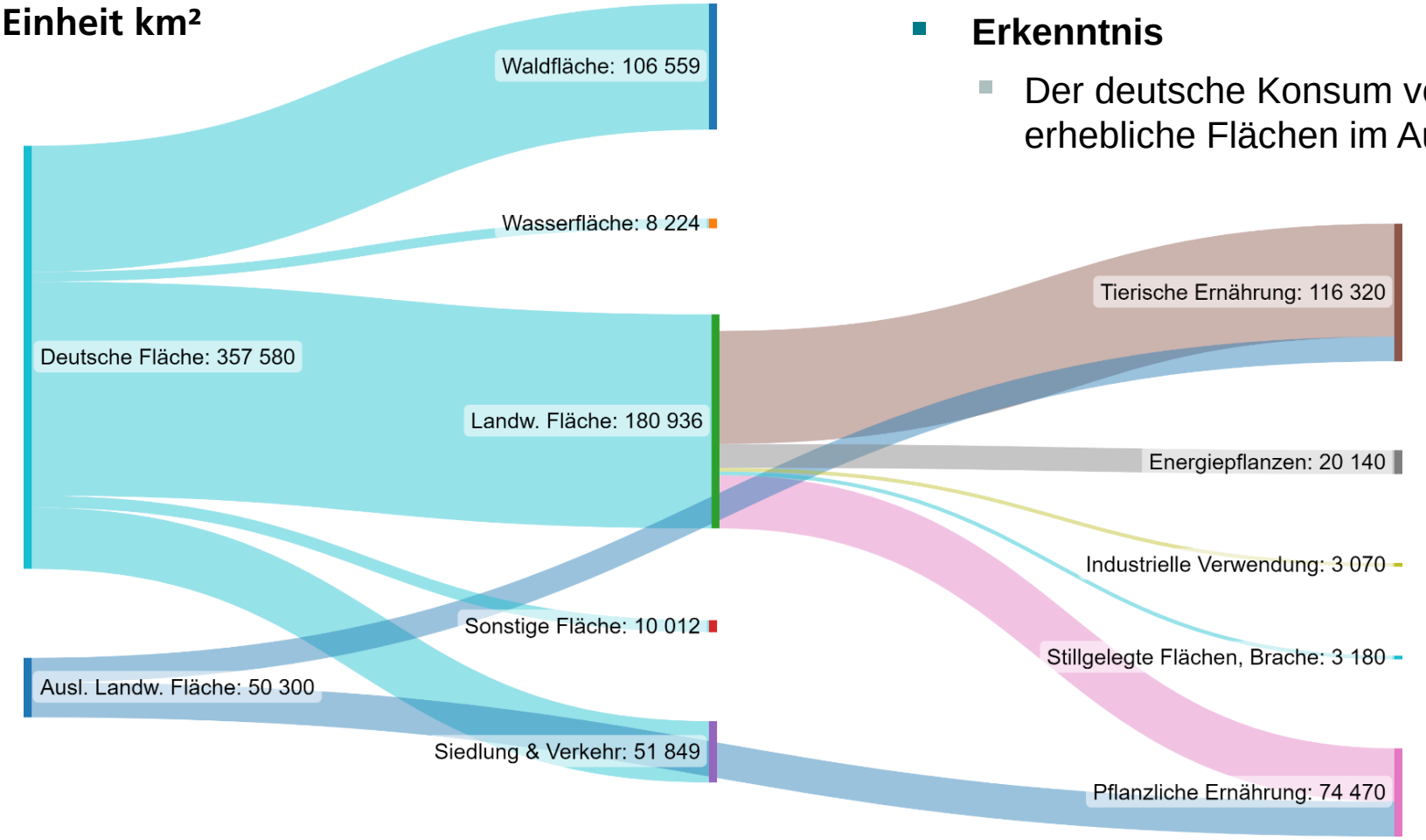
Zielsetzung
Zur Stabilisierung des Klimas müssen die Netto-THG-Emissionen in die Atmosphäre auf der Welt **so schnell wie möglich** auf **0** sinken.

Treibhausgasemissionen Deutschland
2018: 866 Mt CO_2-Äq. (0,26 Gt C)

Quelle: NASA 2011, https://web.archive.org/web/20160305010126/http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/?src=eoa-features

Die Ausgangslage II/III
Deutscher Flächenimport - Landwirtschaft

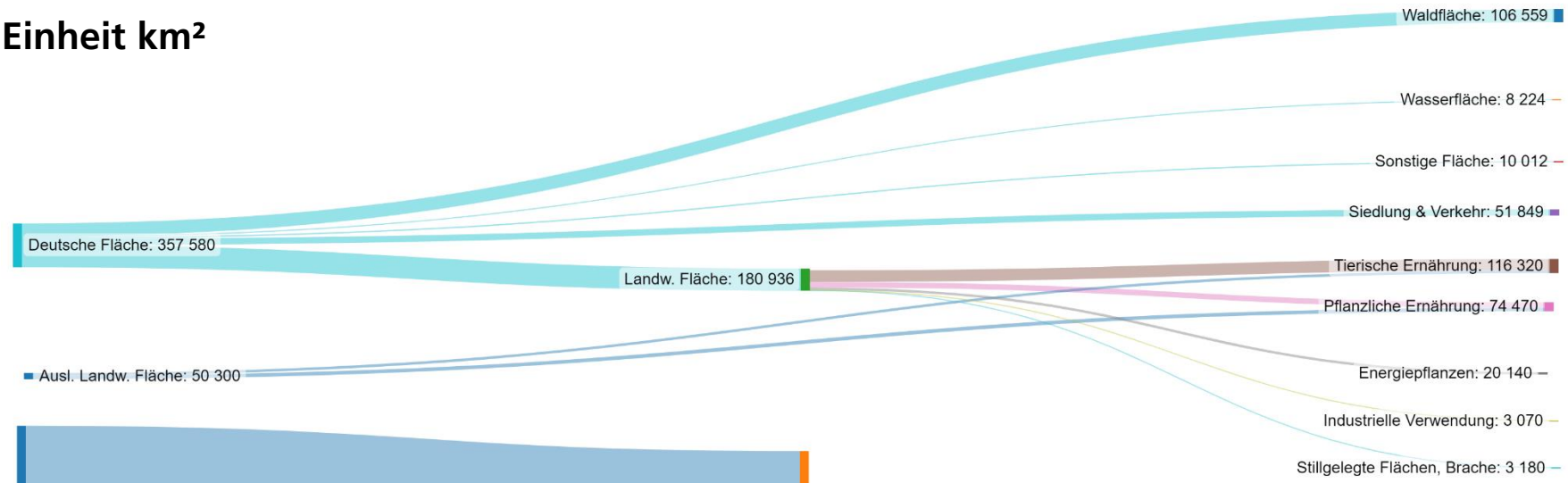
Einheit km²

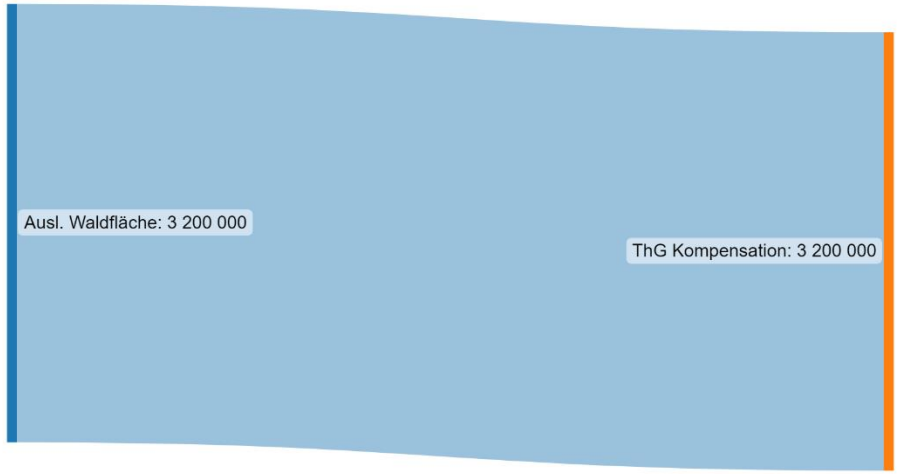


- **Erkenntnis**
  - Der deutsche Konsum von Nahrungsmitteln belegt netto erhebliche Flächen im Ausland

Die Ausgangslage III/III
Vom Klimaschutz zum deutschen Flächendilemma

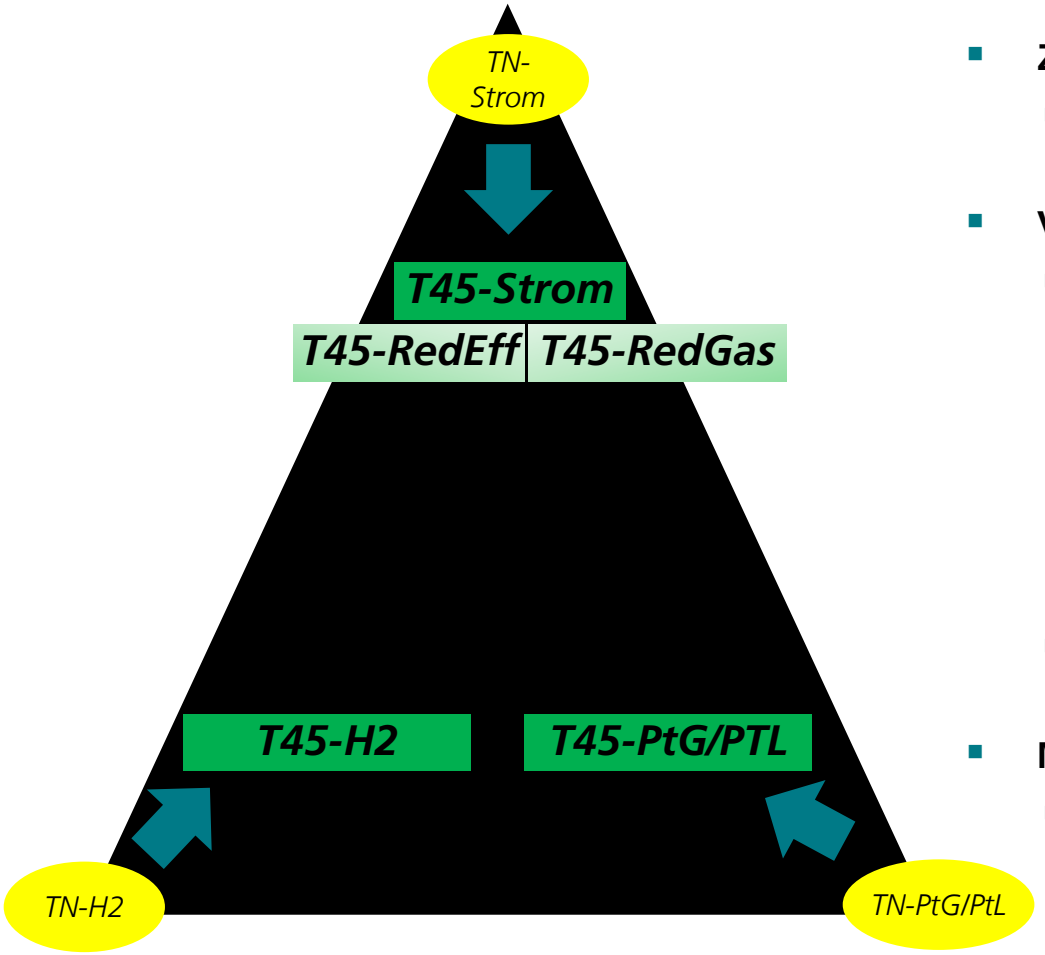
Einheit km²





- **Erkenntnis**
  - Der deutsche Flächenfußabdruck auf „lebenswichtigen“ Flächen (Landwirtschaft & Wald) ist zu hoch.
- **Operationalisierung des Klimaziels**
  - Der Flächenabdruck Deutschlands auf „lebenswichtigen“ Flächen muss schnell sehr deutlich reduziert werden.

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-H2*)
    - 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“

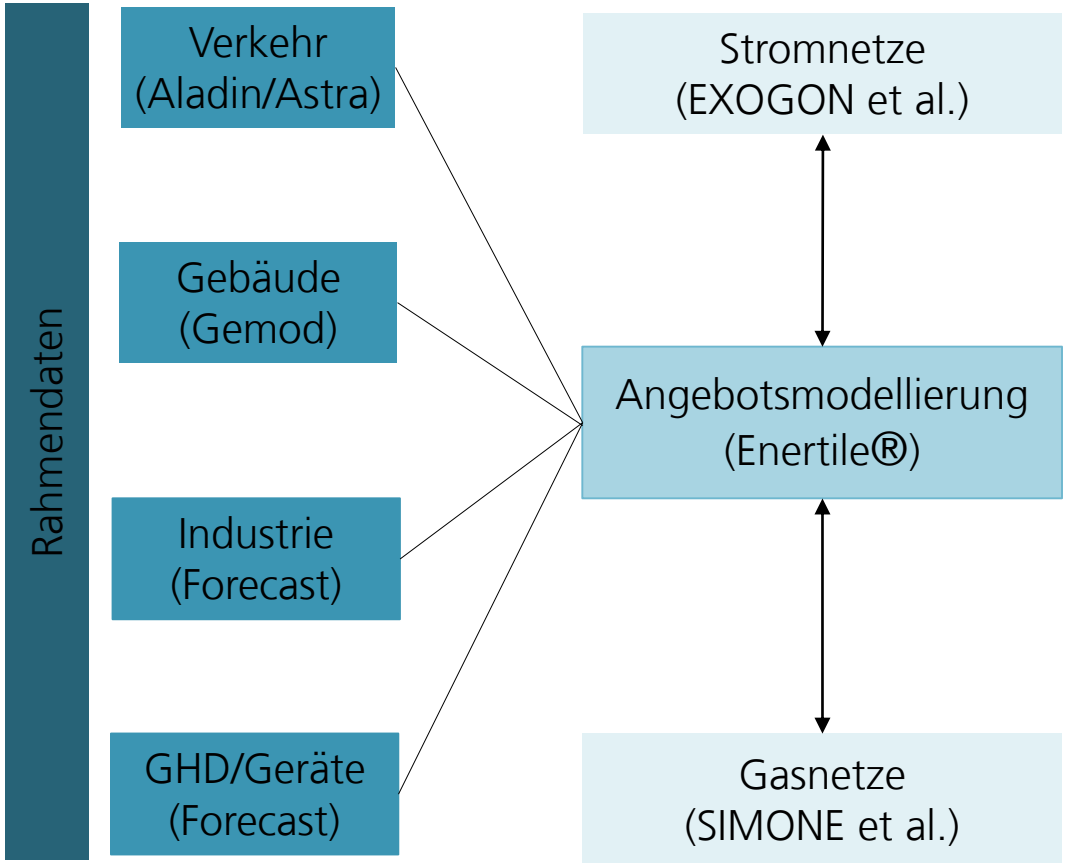
T45-Szenarien
Fokus: Schärfere Auflösung des politischen Lösungsraums

Treibhausgasneutralität schon bis 2045

Energiewende im Vollsprint

- **Deutschland**
  - Sektorziele werden vorgegeben
  - Neue Ausbauziele der erneuerbaren Energien berücksichtigt
  - Keine Verlagerung der Industrie (Ammoniak usw.)
- **Europa**
  - Europa wird ebenfalls an die jeweiligen Szenarien angepasst
  - Ausbau der erneuerbaren Energien in einzelnen Ländern wird stärker beschränkt
  - Höhere Auflösung der H_2-Importrouten
- **Methodik**
  - Auflösung: Energieangebot 5 Jahre
  - Veröffentlichte Daten mit höherer Auflösung

Modellsystem
Gekoppelte Modelle erlauben hoch aufgelöste Analysen

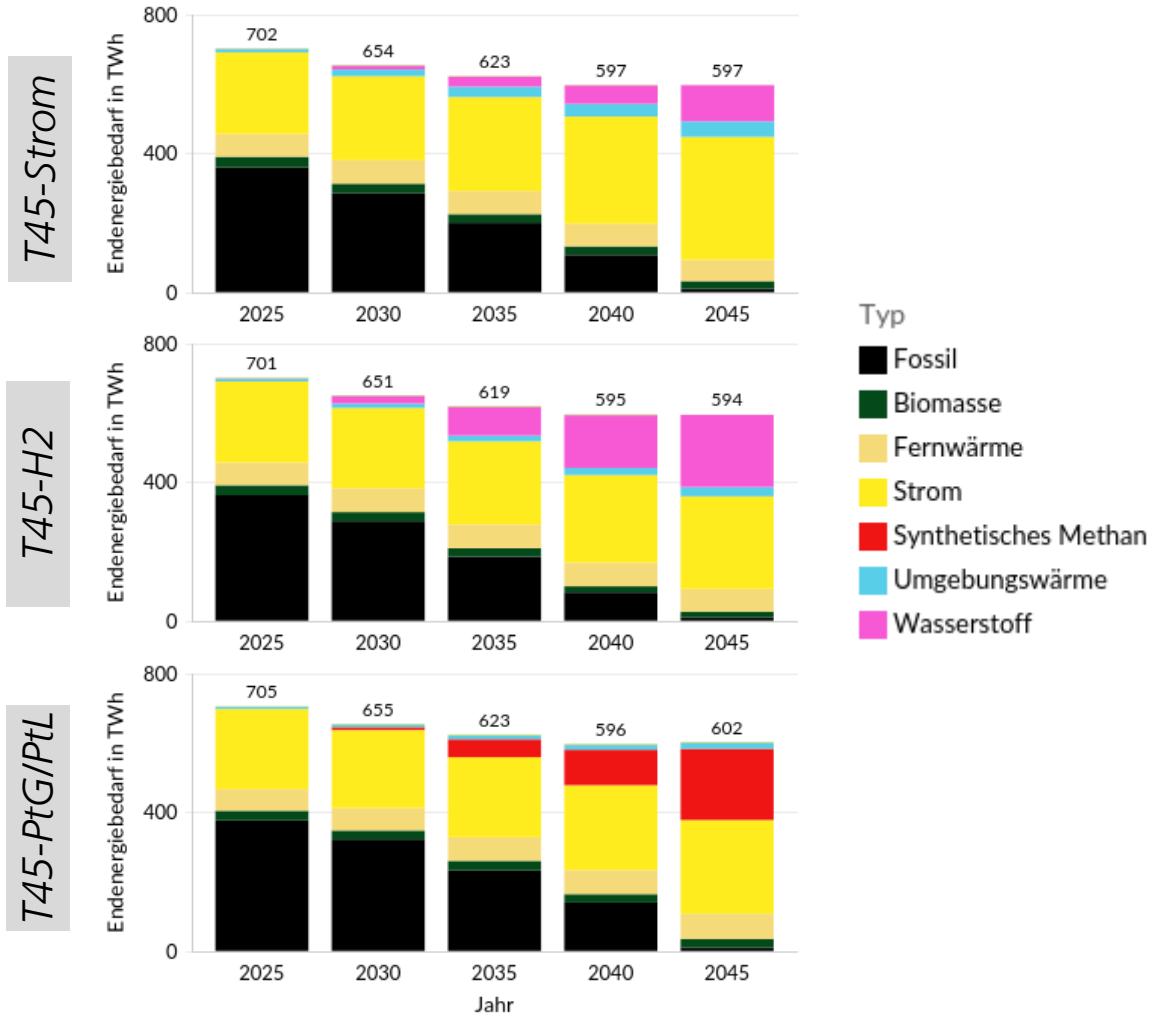


- **Vorgehensweise**
  - Detaillierte Modelle berechnen Energienachfrage
  - Energienachfrage wird **regionalisiert**
  - Potentiale Erneuerbarer Energien werden in hoher räumlicher und **zeitlicher** (stundenscharf) Auflösung berechnet
  - Bereitstellung der Energie wird optimiert und mit Netzmodellen 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

- Vorbemerkungen & Konzept der Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Netze
- Gesamtbild
- Zusammenfassung & Diskussion

Kurzübersicht – Industrie – Endenergiebedarf
Tiefgreifende Transformation erforderlich



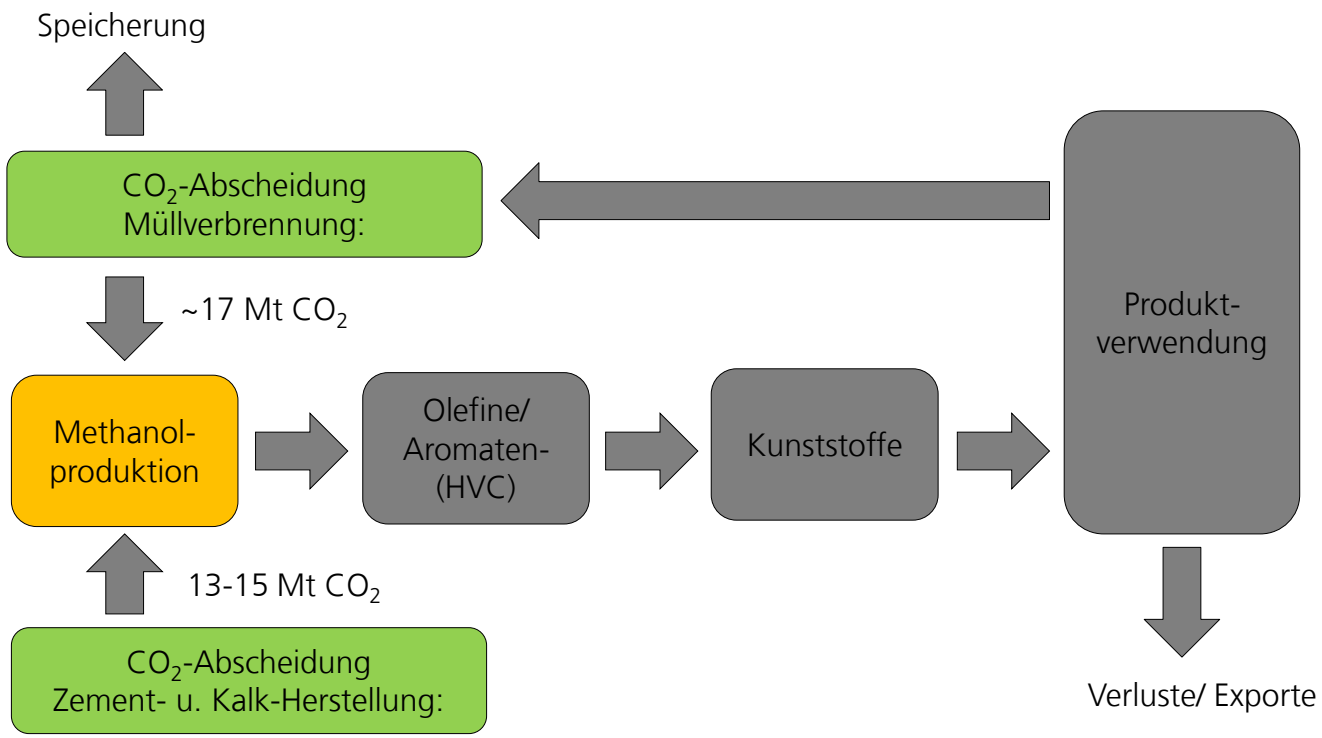
- **Ergebnisse**
  - THG-Minderung bis 2045 bei 96-97% gegenüber 1990; es verbleiben verteilte prozessbedingte Emissionen
  - Der Energieverbrauch (inkl. stofflicher Nutzung) sinkt in allen T45-Grundszenarien leicht; Effizienzgewinne werden durch neue Verbraucher nahezu kompensiert
    - Treiber: Energie- und Materialeffizienz, Prozesswechsel auf Sekundärrouten, H_2 bzw. Elektrifizierung, Batteriefabriken
  - Szenarien zeigen deutliche Unterschiede bei der Bedeutung von Strom, synthetischem Methan (PtG) und H_2, aber auch Gemeinsamkeiten:
    - Der Stromverbrauch steigt in allen Szenarien deutlich
    - Hoher Wasserstoffbedarf auch im Szenario *T45-Strom*; Treiber sind Chemie und Stahl
- **Schlussfolgerungen**
  - Ohne große Mengen CO_2-neutraler Sekundärenergieträger (Strom, H_2, PtG) ist die Transformation nicht möglich
  - Besonders energieintensive Grundstoffindustrien stehen vor einem umfassenden Umbau des Anlagenbestandes

CO_2 wird zum Rohstoff für die chemische Industrie
CCUS Infrastruktur für viele Szenarien sinnvoll

- 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

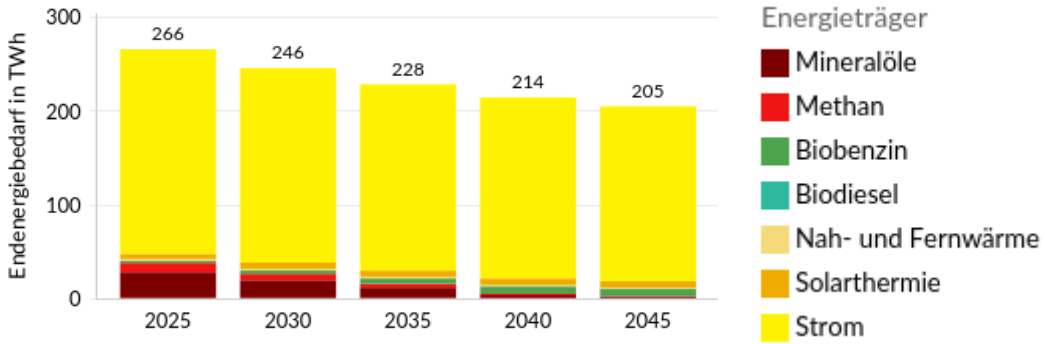
Aufgrund zeitlicher Verschiebung und Verluste im System ist dies lediglich eine Größenordnung

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



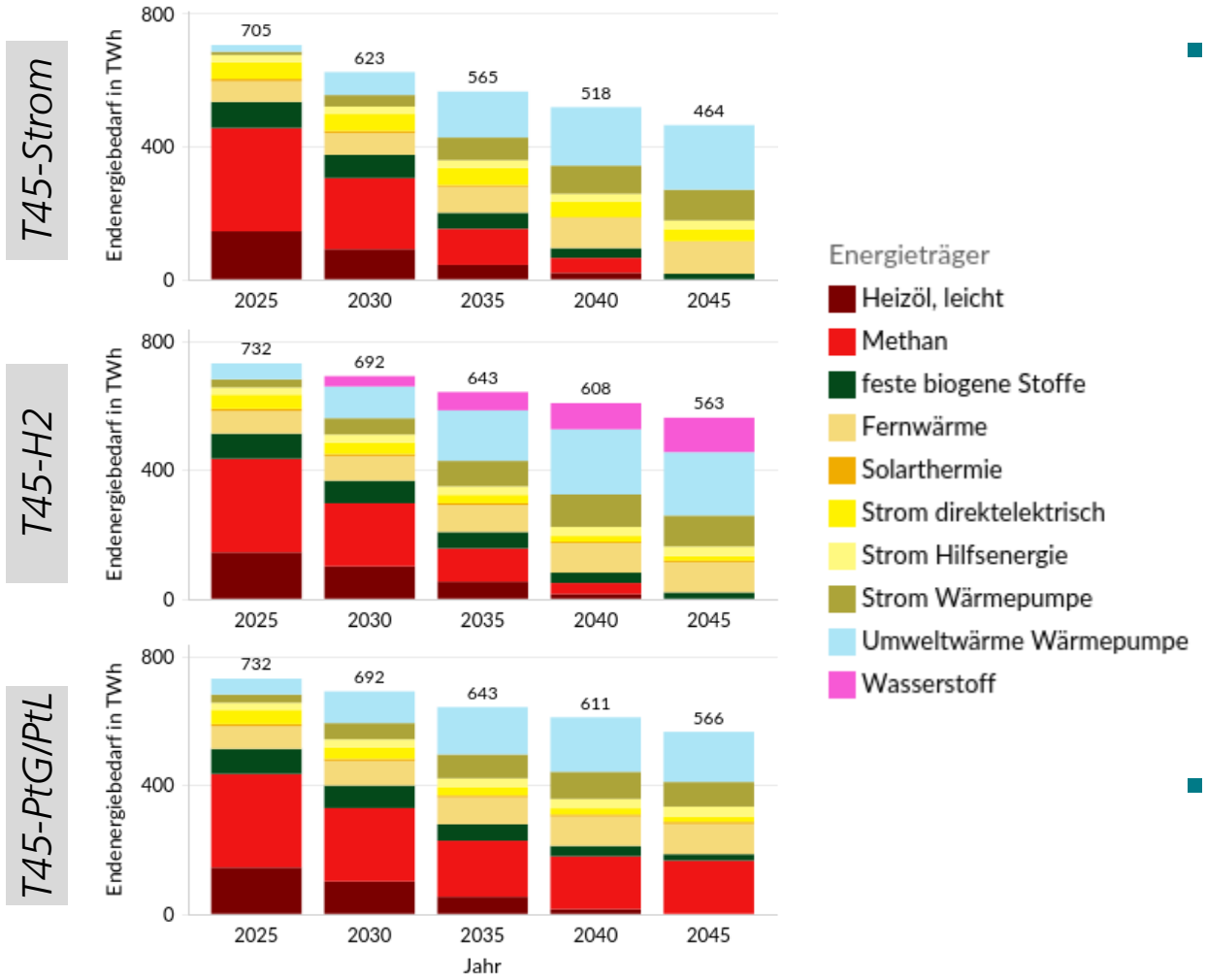
Kurzübersicht – GHD & Geräte – Endenergiebedarf
Effizienz kann wichtigen Beitrag leisten

T45-Strom



- **Ergebnisse**
  - Weitgehende Elektrifizierung des GHD-Sektors senkt Endenergiebedarf um 27% und den Strombedarf um 9% (im Vergleich zum Basisjahr 2019)
  - Bedarf von Rechenzentren nimmt bis 2045 um 38% (5 TWh) zu
  - Strombedarf der Haushalte sinkt um 30% im Vergleich zu 2019
  - Reduktion des Strombedarfs durch effizientere HH-Geräte, auch bei teils steigenden Ausstattungsraten (insb. bei IKT-Endgeräten)
  - Anstieg in Haushalten nur im Bereich Klimatisierung
- **Einordnung**
  - Die Entwicklung des steigenden Energiebedarfs von Rechenzentren im GHD-Sektor sowie der Klimatisierung in Haushalten und GHD ist teilweise sehr unsicher
- **Schlussfolgerungen**
  - Erhebliche Anstrengungen für eine deutliche Reduktion des Energiebedarfs erforderlich
  - Insbesondere in GHD-Prozessen und Anwendungen mit langfristigen Investitionszyklen müssen zeitnah die richtigen Investitionsanreize gesetzt werden

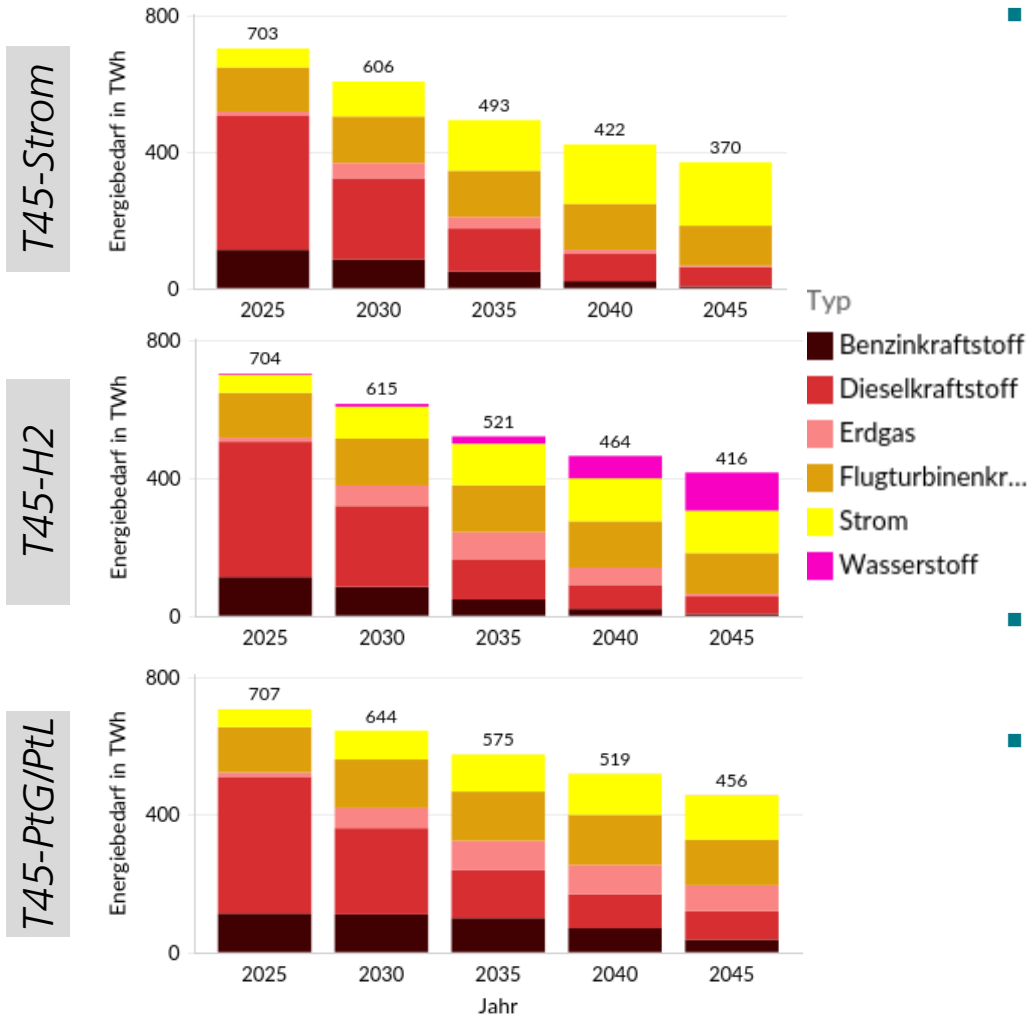
Kurzübersicht – Gebäude – Endenergiebedarf
Wärmepumpen und Wärmenetze wachsen in allen Szenarien



- **Ergebnisse**
  - In allen Szenarien muss die Anzahl der Wärmenetzanschlüsse knapp verdreifacht werden
  - Starker Ausbau der Wärmepumpen in allen Szenarien

  Einordnung
  - Sektorziel wird eingehalten
  - 65% EE-Ziel wird ab 2024 eingehalten
  - Zielerreichung 2030 in allen Szenarien außer *T45-Strom* sehr schwierig
  - Hybrid-Wärmepumpen werden nur zwischen 2024 und 2030 installiert.
  - Biomasse knapp und wird deutlich reduziert
- **Schlussfolgerungen**
  - Möglichst hohe Effizienz, starker Ausbau von Wärmepumpen und Wärmenetzen sind zentral

Kurzübersicht – Verkehr – Endenergiebedarf
Trend zu Elektromobilität robust



- **Ergebnisse**
  - Pkw und Lkw bis 12t nahezu vollständig elektrisch
  - Lkw >12t batterieelektrisch bis zu mittleren Fahrleistungen
  - Langstrecken-Lkw noch mit mehreren Optionen (batterieelektrisch, oberleitungsgebunden (*T45-Strom*), wasserstoffbetrieben (*T45-H2*), synthetisch (*T45-PtG/PtL*))
  - Bus & Bahn (abseits der elektrifizierten Strecken) mit Batterie oder H_2
  - Schiffs- & Luftverkehr zu kleinen Teilen für Batterie und Brennstoffzelle denkbar, aber synthetische Kraftstoffe überwiegen
  - Sektorziele bis 2030 mit aktueller Gesetzgebung schwer erreichbar, Nullemissionen 2045 nur über Verbote oder synthetische Kraftstoffe
- **Einordnung**
  - Sehr ambitionierte Szenarien, da die Anstrengungen noch nicht ausreichen
- **Schlussfolgerungen**
  - Umfangreiche Förderprogramme und Regularien zur schnelleren Marktdiffusion alternativer Antriebe notwendig
  - Infrastrukturaufbau für Lkw-Verkehr zentral
  - Klärungsbedarf für knappe Bio- und Synfuels im Verkehr, v.a. 2045

Kurzzusammenfassung T45 Szenarien Nachfrage 2045
Mehr Strom für Verkehr & Gebäude, mehr H_2 für die Industrie

Anteil an E-Fahrzeugen/Heizungen

	Kategorie	T45-PtG/PtL	T45-H2	T45-Strom
Verkehr	PkW	57%	78%	95%
	LkW-leicht	97%	98%	99%
	LkW-mittel	85%	79%	97%
	LkW-schwer	42%	40%	92%
Gebäude	Wärmepumpen	45%	57%	74%
	Wärmenetze	19%	19%	24%

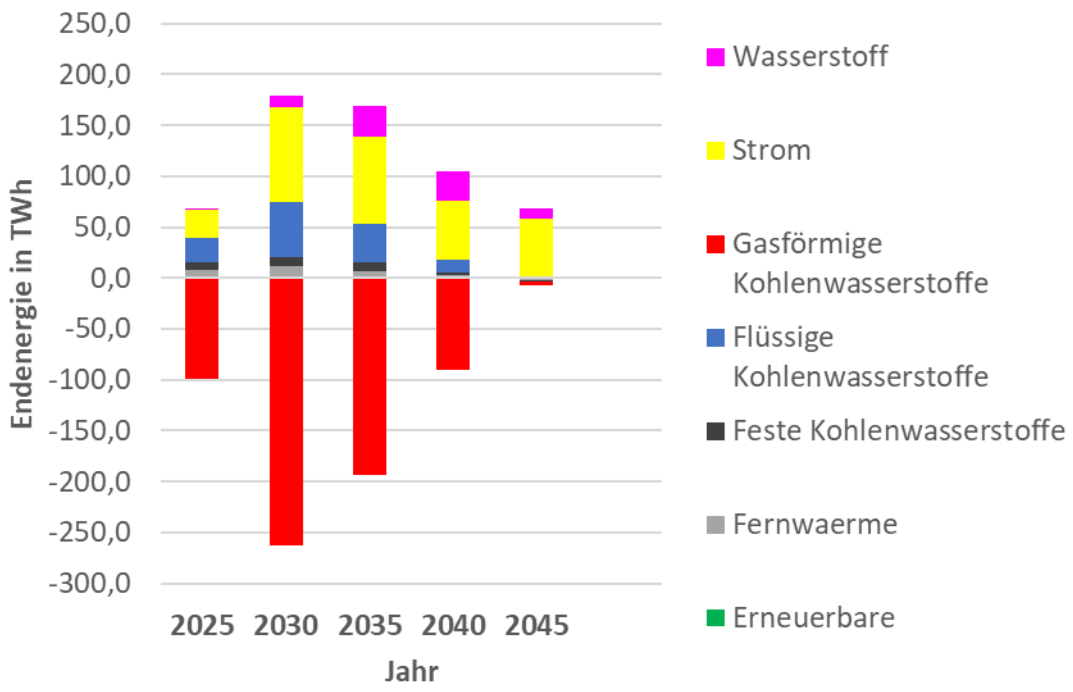
→ **Delta zu TN-Szenarien**
Stärkere Elektrifizierung

Zentrale Entwicklungen in der Industrie

Industrie	Prozesswärme	C-H	H2/Strom	Strom
	Stahl	CH4-DRI	H2-DRI	H2-DRI
	CCS/CCU	ja	ja	ja

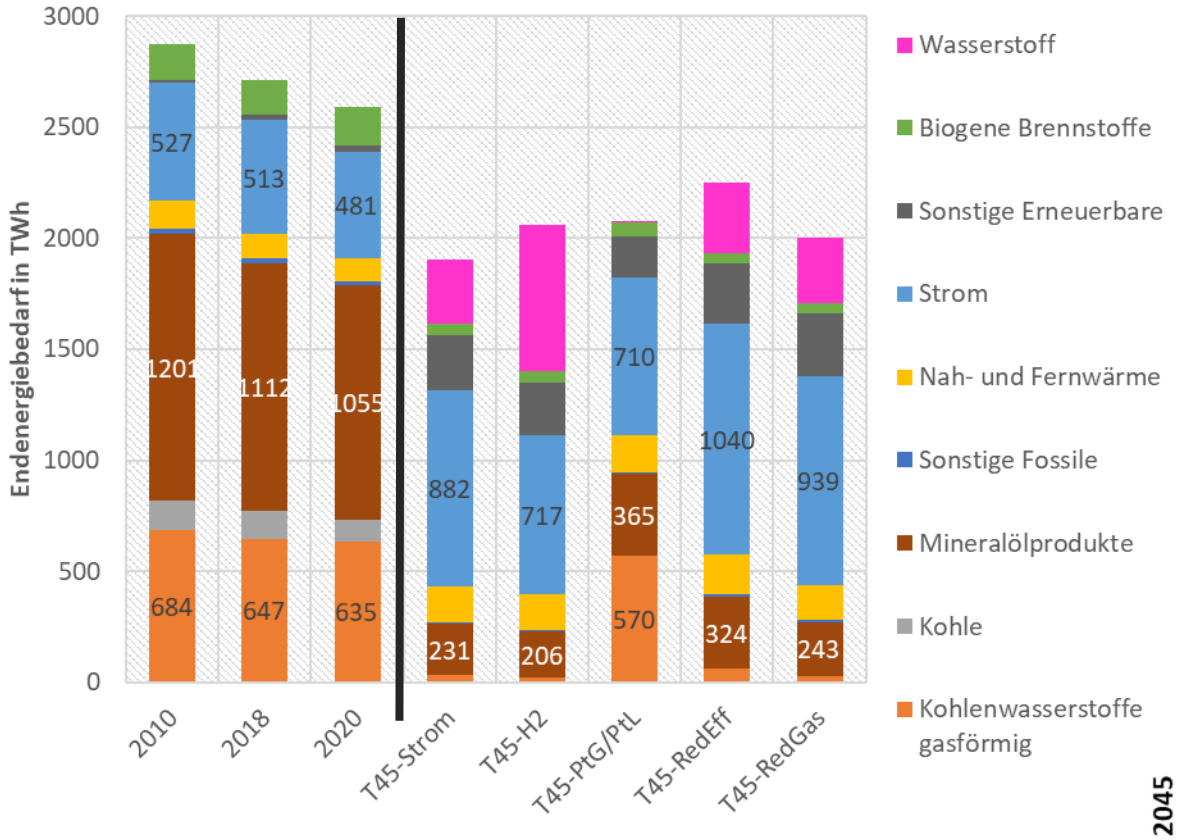
→ **Delta zu TN-Szenarien**
Stärkere H_2-Nutzung

Endenergie: Veränderung *T45-RedGas* zu *T45-Strom*
Strom und Öl ersetzen kurzfristig Erdgas



- **Zentrale Entwicklungen**
  - Industrie
    - Annahmen: Preiswirkung, Vertrauensverlust in Gas als sichere Versorgung, Zuschüsse Elektrifizierung und H_2
    - Gasverbrauch sinkt um zusätzliche 81 TWh bis 2030
    - Verschiebungen von Erdgas zu Heizöl, Strom und Wasserstoff, 2030 THG-Ziel des KSG erreicht
  - Gebäude
    - Extremer Ausbau der Wärmepumpen in der kurzen Frist, um Sektorziele zu erreichen
- **Einordnung**
  - Die hier untersuchte Entwicklung ist eher ein theoretisches Maximum

Endenergienachfrage inkl. stofflicher Nutzung
Strom in allen Szenarien zentraler Energieträger

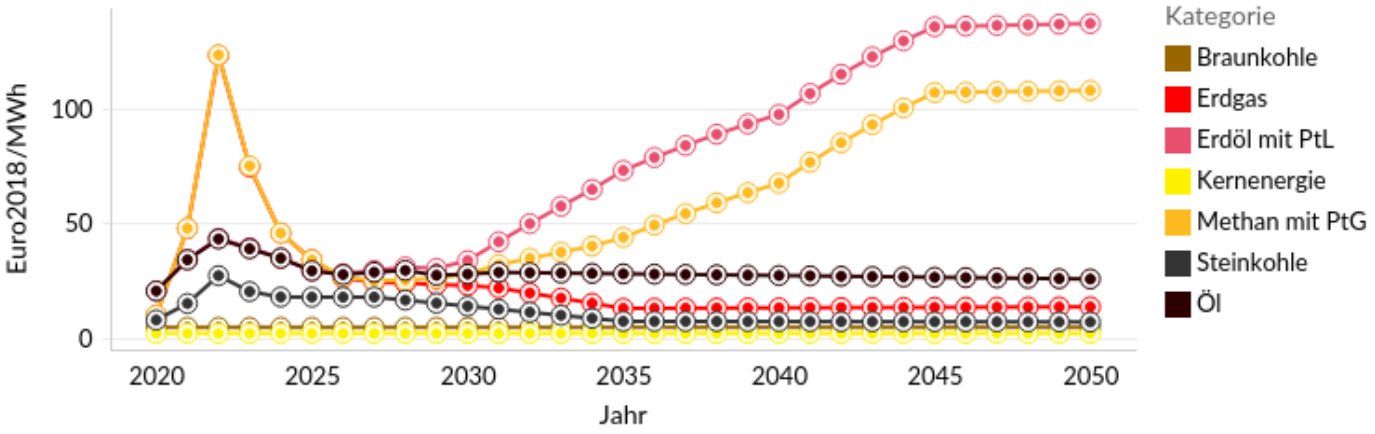


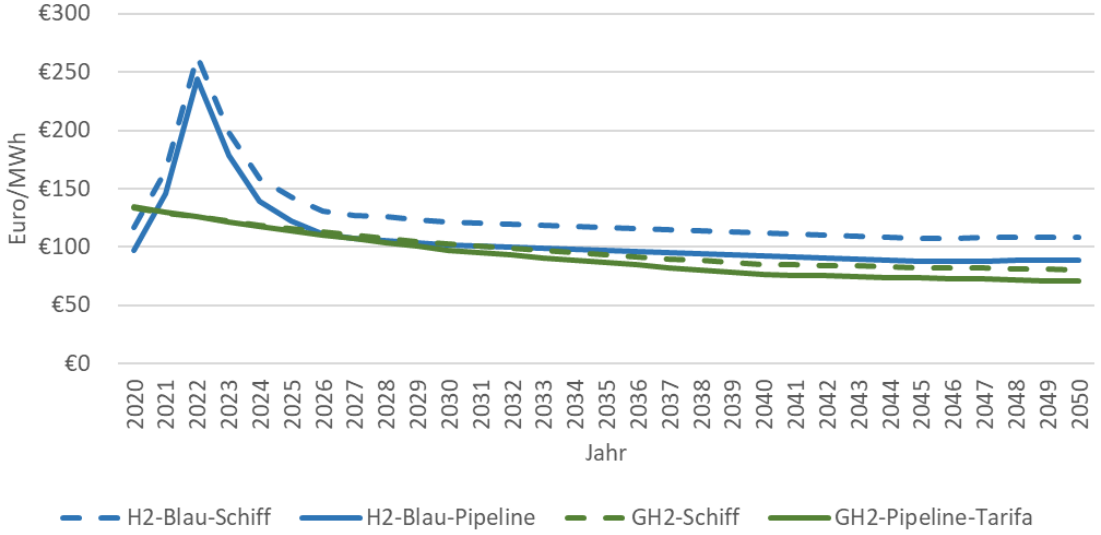
- **Ergebnis**
  - Strombedarf 2045 zwischen 710-1040 TWh
  - Wasserstoffbedarf 2045 zwischen 1 (289)-655 TWh
  - Deutlicher Rückgang Kohlenwasserstoffe in allen Szenarien
- **Einordnung**
  - Korridore der Szenarien werden kleiner
  - Nah- und Fernwärme in allen Szenarien mit Aufwuchs
  - Hoher Strom- und Wasserstoffbedarf in allen Szenarien (außer *T45-PtG/PtL*)
  - Wasserstoffbedarf erhöht den Strombedarf auf der Erzeugungsseite zusätzlich
  - Die Versorgungsaufgabe auf der Angebotsseite wird herausfordernder

Agenda

- Vorbemerkungen & Konzept der Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Netze
- Gesamtbild
- Zusammenfassung & Diskussion

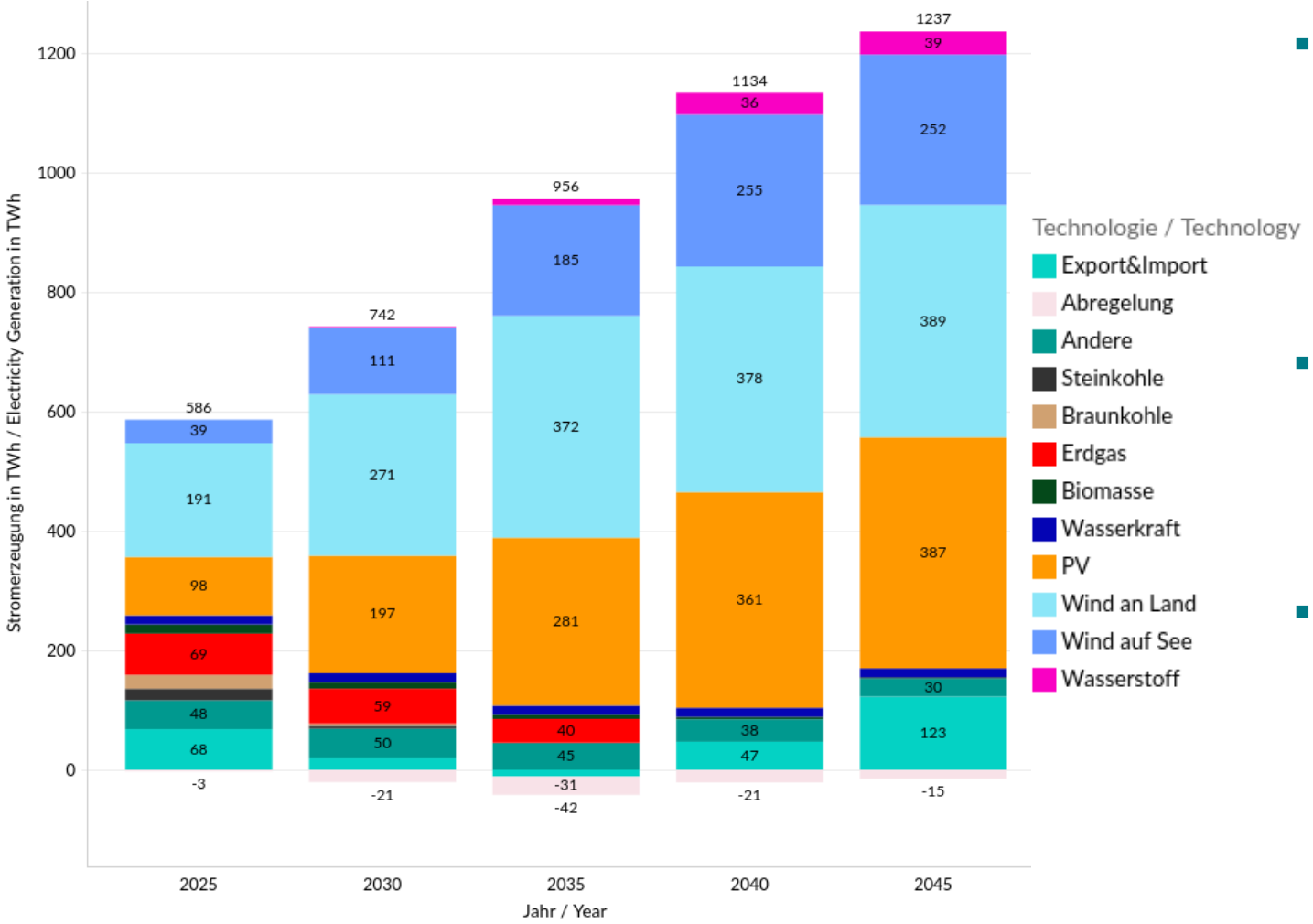
Energieträgerpreise
Grüner Wasserstoff ist die günstigere Option





- **Ergebnisse**
  - Grüner Wasserstoff kurz- und langfristig günstiger als blauer Wasserstoff
  - Methan mit Beimischung bleibt im gesamten Zeitverlauf ein teurer Energieträger
- **Einordung**
  - Orientierung an langfristigen IEA Szenarien 2030
  - Bis 2030 Orientierung an Terminmarktnotierungen (Februar 2022)
  - Gleichstellung von Europa und Importregionen in der Modellierung mit WACC von 2%, dies führt tendenziell zur Unterschätzung der Kosten des außereuropäischem Imports von H_2 und Derivaten
  - Pipeline-Transport von außerhalb Europas nur aus der MENA-Region, Import über Schiffe von den besten PV-Standorten der Welt
  - H_2-Erzeugung in Europa wird modellendogen berechnet

Stromerzeugung in Deutschland: Szenario *T45-Strom*
Schneller Ausbau der Erneuerbare Energien

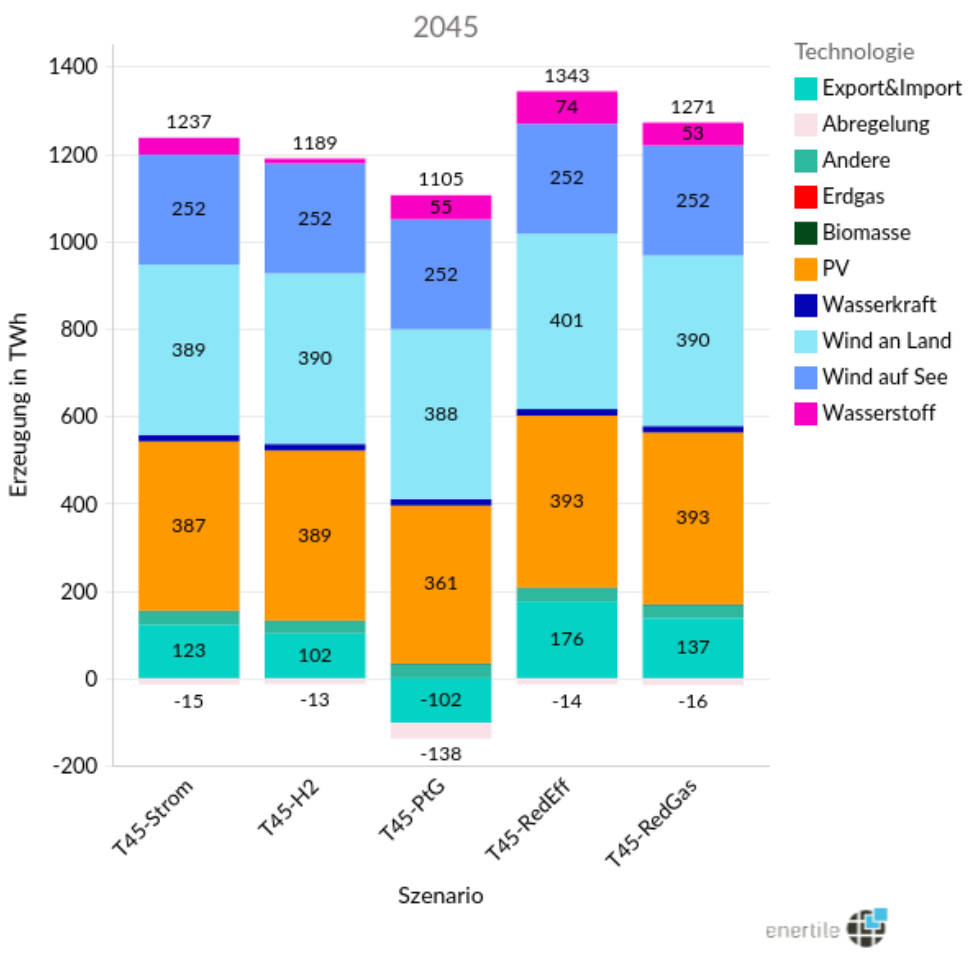


- **Ergebnisse**
  - Hoher Strombedarf in Deutschland (>1200 TWh)
  - Fluktuierende Stromerzeugung dominiert das Stromsystem
  - Wasserstoffkraftwerke als Backup
  - Bedeutender Import nach 2035
- **Einordung**
  - Ausbauziele für Erneuerbare sind als Minimumbedingung vorgegeben
  - Bedeutung der Biomasse sinkt, da ihr Einsatz in anderen Bereichen wertvoller ist
- **Schlussfolgerungen**
  - Die Sicherung des Ausbaus Erneuerbarer Energien ist das zentrale Element für die Energiewende
  - Strategie für die Sicherung von Importen ist sinnvoll

IDs 42215, 42246, 42224, 42211, 42236

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

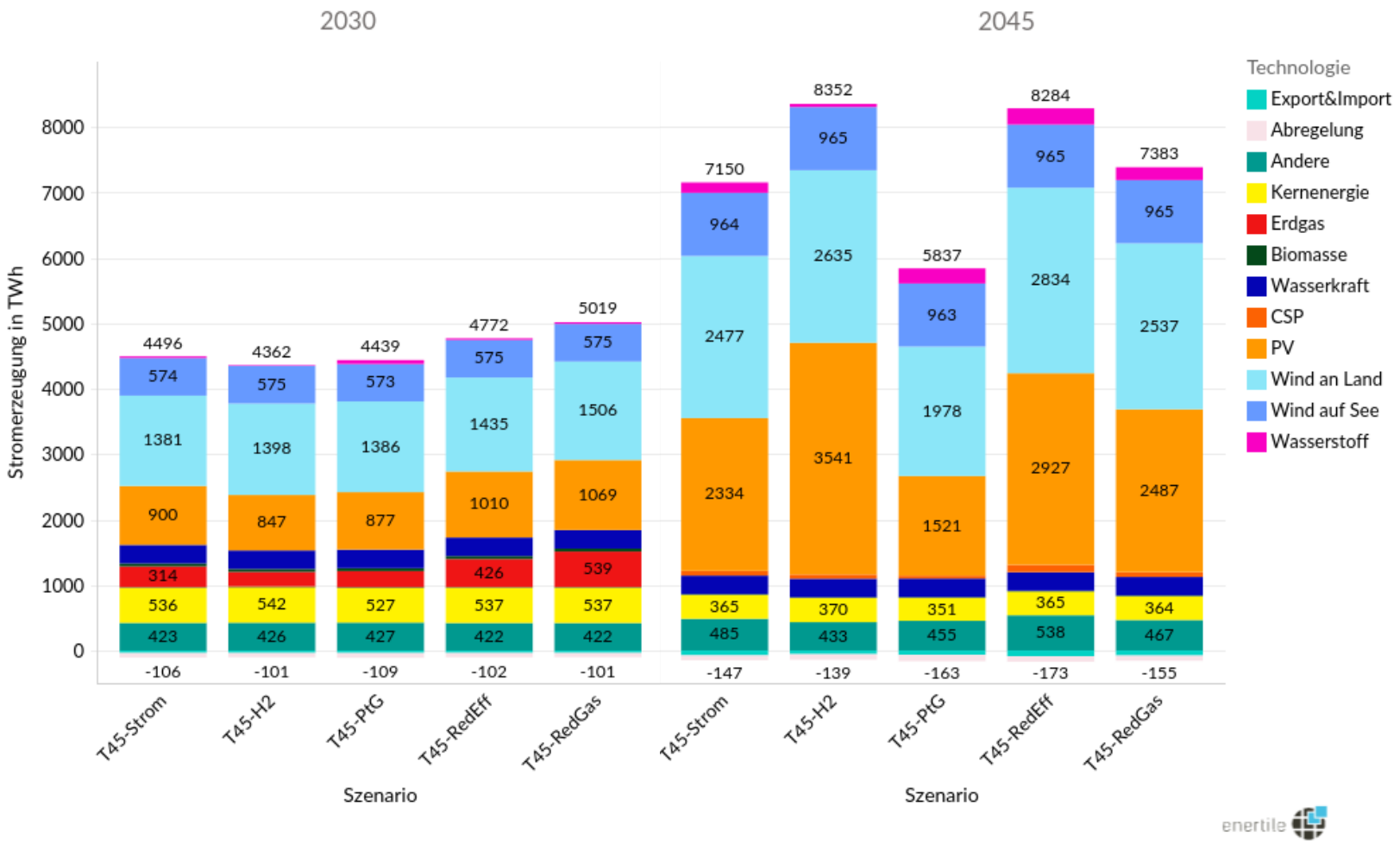
Stromerzeugung Deutschland 2045: Szenariovergleich
Ausbauziele für Erneuerbare dominieren das System



- **Ergebnisse**
  - Im Grundsatz sehen die Stromsysteme in allen Szenarien strukturell gleich aus; im Detail gibt es jedoch Abweichungen
  - Die Stromerzeugung in 2045 variiert zwischen ca. 1100 und 1340 TWh (höchste Werte im Szenario *T45-RedGas* und *T45-Strom*, niedrigste im Szenario *T45-PtG*)
  - Deutschland importiert im Jahr 2045 nennenswert Strom in allen Szenarien mit Ausnahme des *T45-PtG* (hier Export)
  - Wasserstoffrückverstromung stabilisiert das Stromsystem in allen Szenarien
- **Einordnung**
  - Politische Ziele definieren den Stromerzeugungsmix in Deutschland
  - Wasserstoff hat eine Rolle im Stromsystem
  - Deutschland ist weiterhin ein Stromimporteur (mit Ausnahme des *T45-PtG*)
- **Schlussfolgerungen**
  - Verbindungen des deutschen Stromnetzes ins europäische Ausland sind essentiell
  - Das Stromsystem wäre für das Szenario *T45-PtG* überdimensioniert

 IDs 42215, 42246, 42224, 42211, 42236

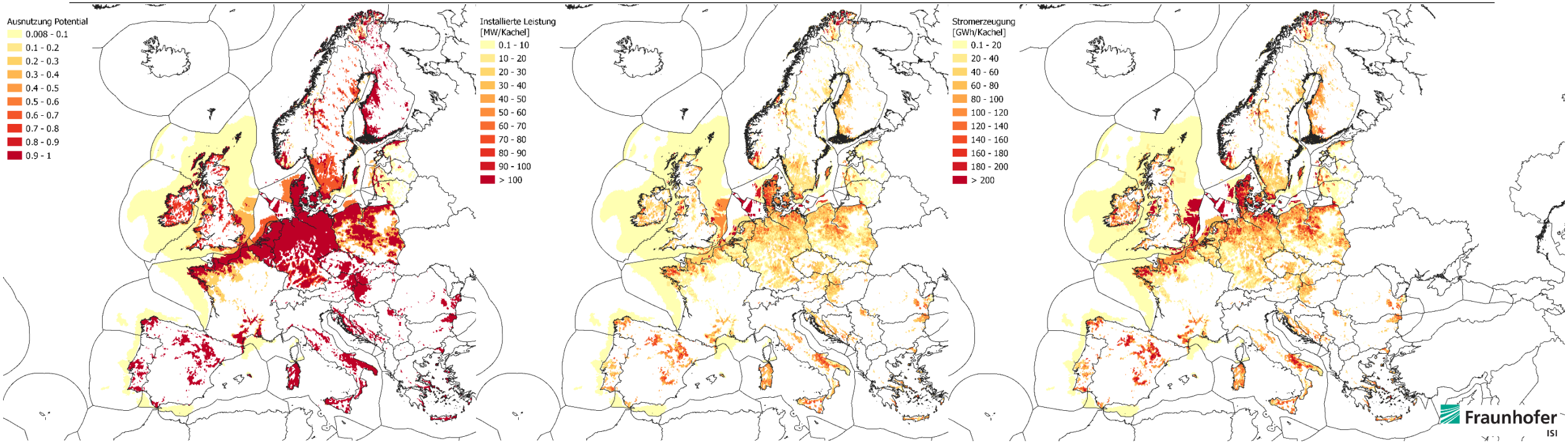
Stromerzeugung in Europa
Windenergie und PV dominieren das Stromsystem



- **Zieljahr 2045**
  - Geringste Gesamtstromerzeugung im Szenario *T45-PtG* (5800 TWh), höchste im *T45-H2* und *T45-RedEff* (8300 TWh)
- **Zwischenjahr 2030**
  - Im Grundsatz hier relativ ähnliche Systeme mit Ausnahme von *T45-RedEff* und *T45-RedGas*
  - Die insgesamt höhere Stromnachfrage (*T45-RedEff*) und der schnelle Ausstieg aus Erdgas in den Nachfragesektoren (*T45-RedGas*) führen hier zu einer wesentlich höheren Erzeugung ab 2030

IDs 42215, 42246, 42224, 42211, 42236

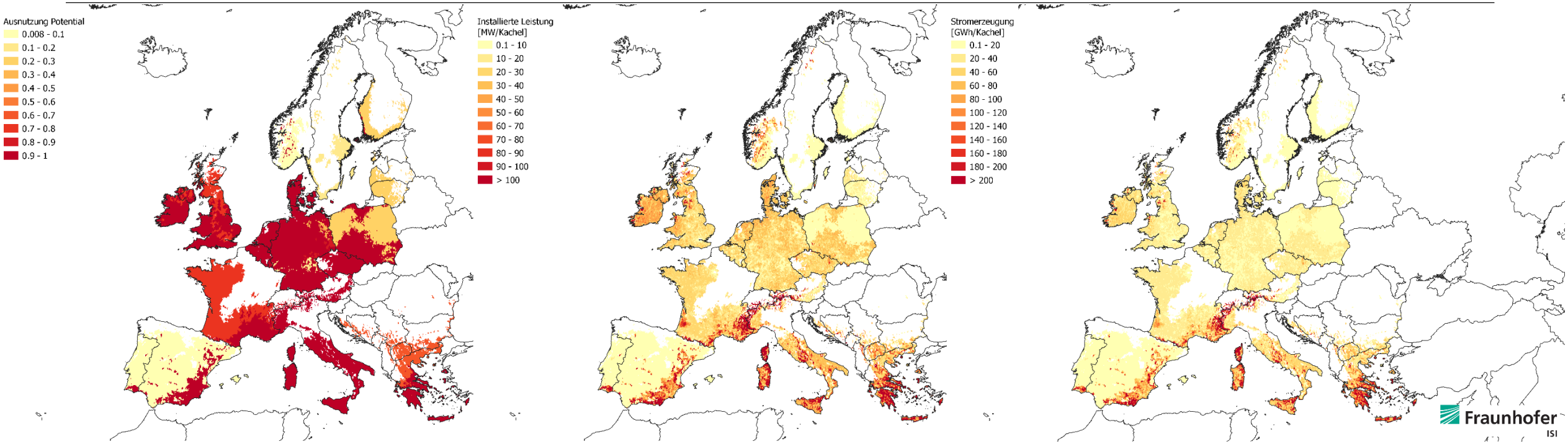
Potentialausnutzung Wind 2045: *T45-Strom*
Vorgaben bestimmen den Ausbau



Ausnutzung Potential | Leistung | Erzeugung

Onshore: FR: Max 70 GW; NO: Max 65 GW; UK & IE: Max 70 GW
Offshore: FR: Min 25 GW; UK & IE: Min 85 GW

Potentialausnutzung PV-Freifläche 2045: Szenario *T45-Strom*
Starker PV-Ausbau in Europa

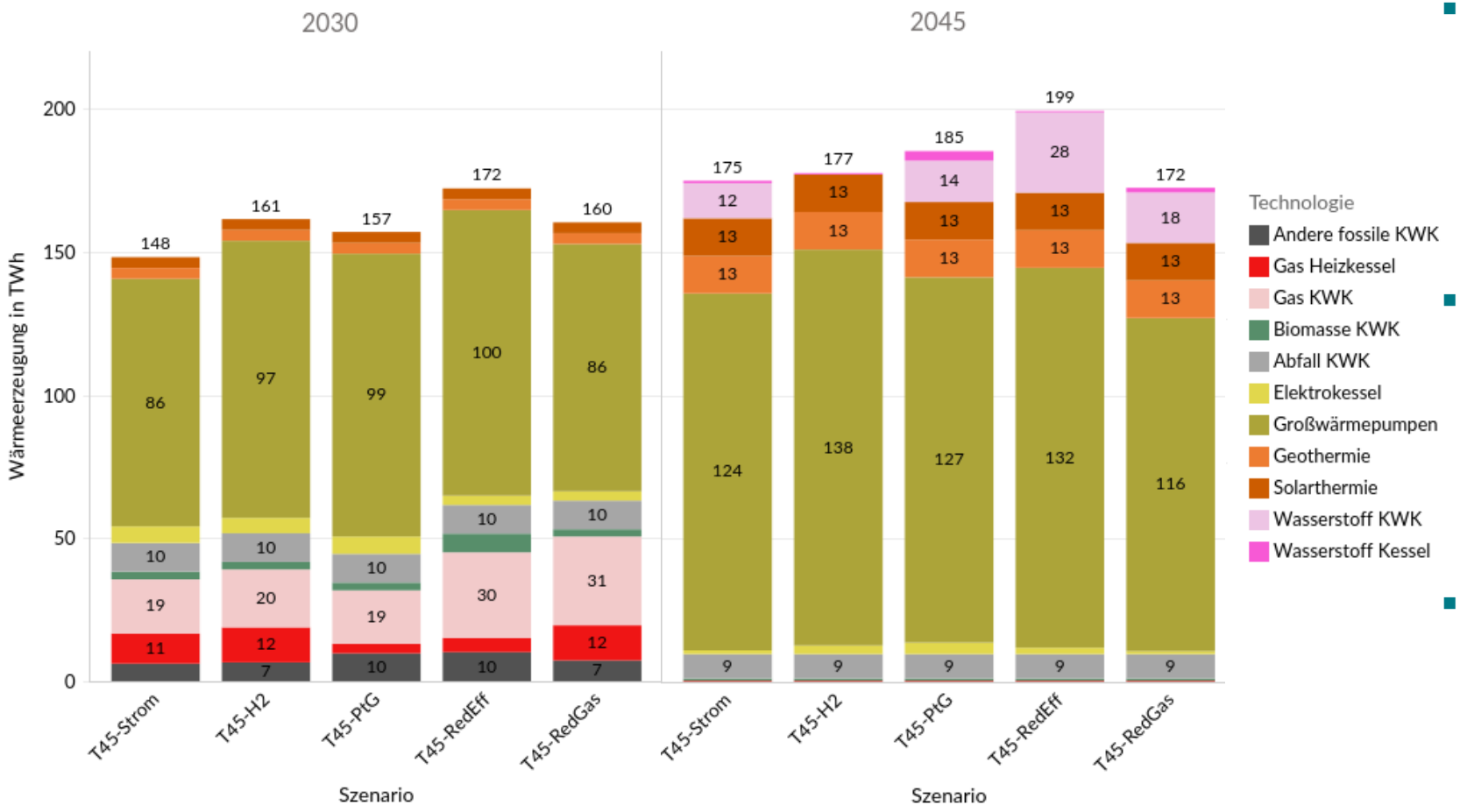


Ausnutzung Potential | Leistung | Erzeugung

ID 42215

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

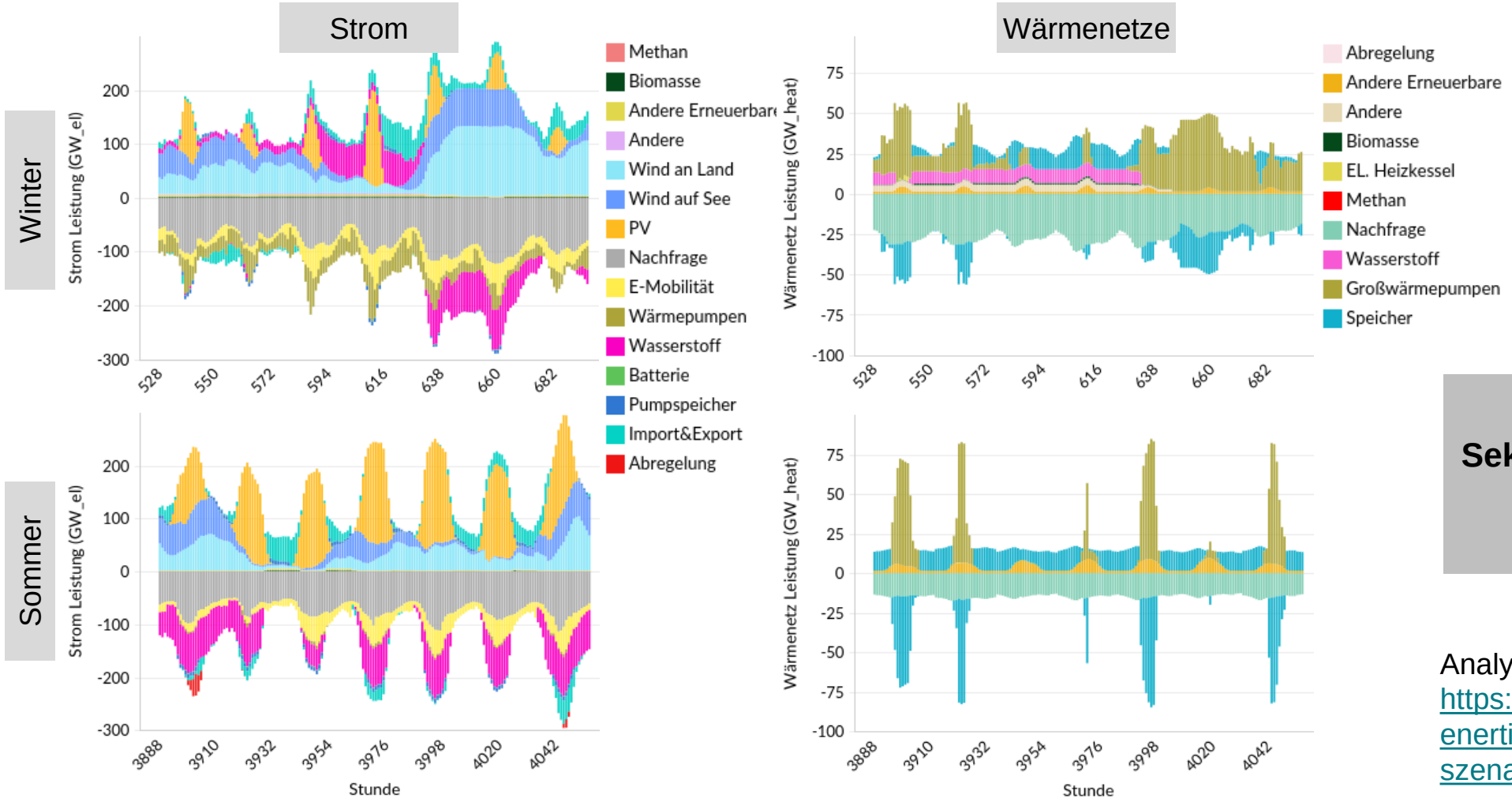
Wärmenetze in Deutschland
Großwärmepumpen mit zentraler Rolle



- **Ergebnisse**
  - Dominierende Rolle der Großwärmepumpen schon ab 2030
  - Wasserstoff mit begrenzter Rolle in KWK in Kesseln
  - Ausbau der Wärmespeicher
- **Einordnung**
  - Die Technologien Wasserstoff-KWK und Wasserstoff-Kessel tragen im Szenario *T45-H2* nicht zur Wärmeversorgung bei aufgrund der in diesem Szenario höheren Wasserstoffpreise
- **Schlussfolgerungen**
  - Wärmepumpen und Wärmespeicher sind in allen Szenarien Schlüsseltechnologien

IDs 42215, 42246, 42224, 42211, 42236

Sektorenkopplung – Dispatch Winter und Sommer 2045
Flexibilität im Energiesystem ist zentral

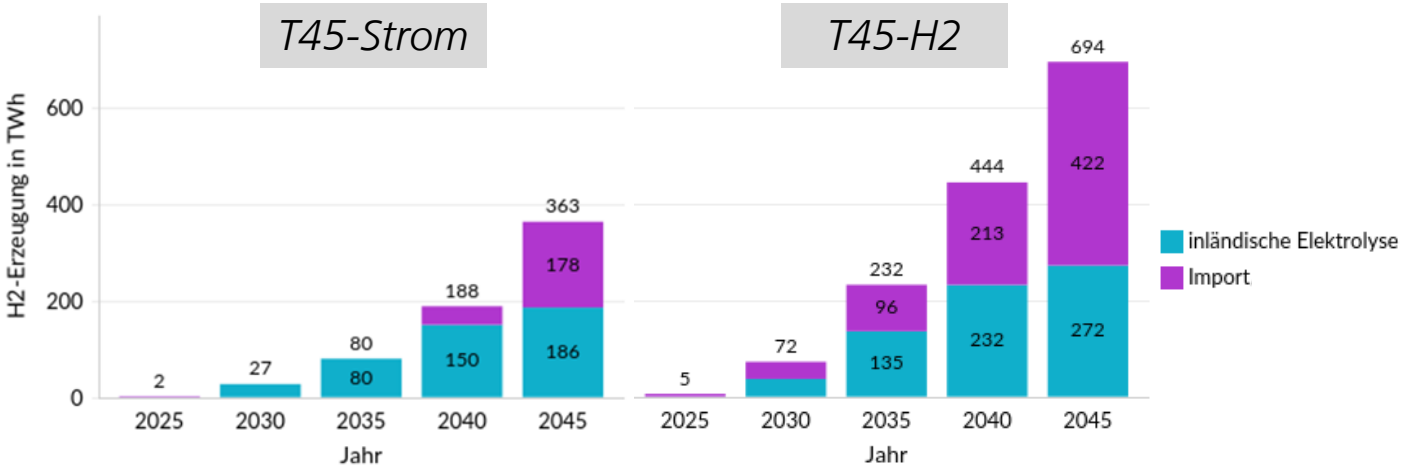


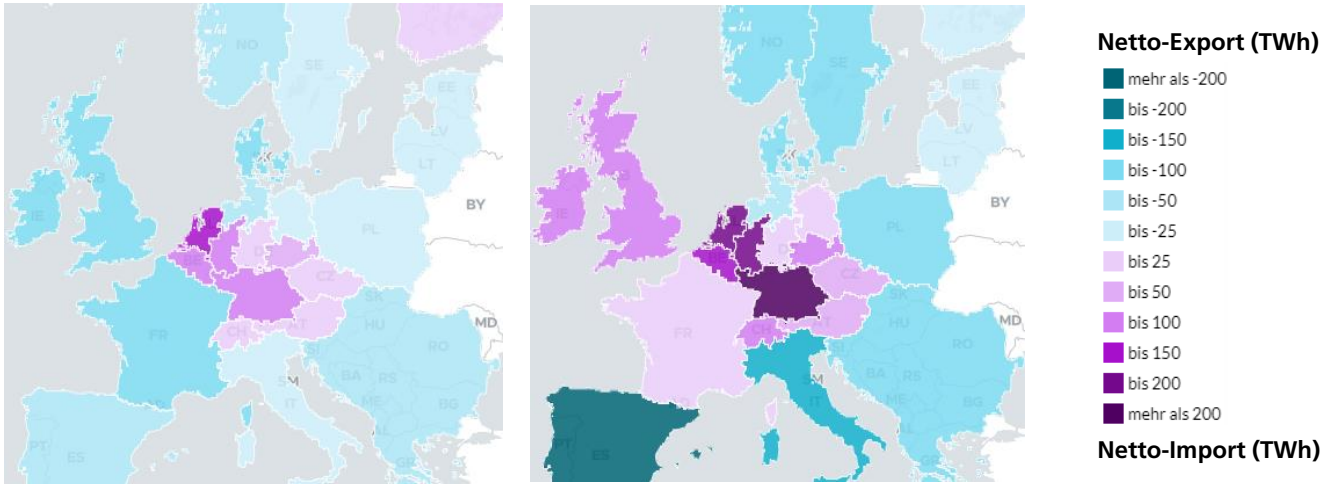
Beispiel Dispatch in (Winterwoche) und (Sommerwoche)

Sektorkopplung schafft Flexibilität

Analysieren Sie die Daten unter: https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/szenario-explorer/angebot.php

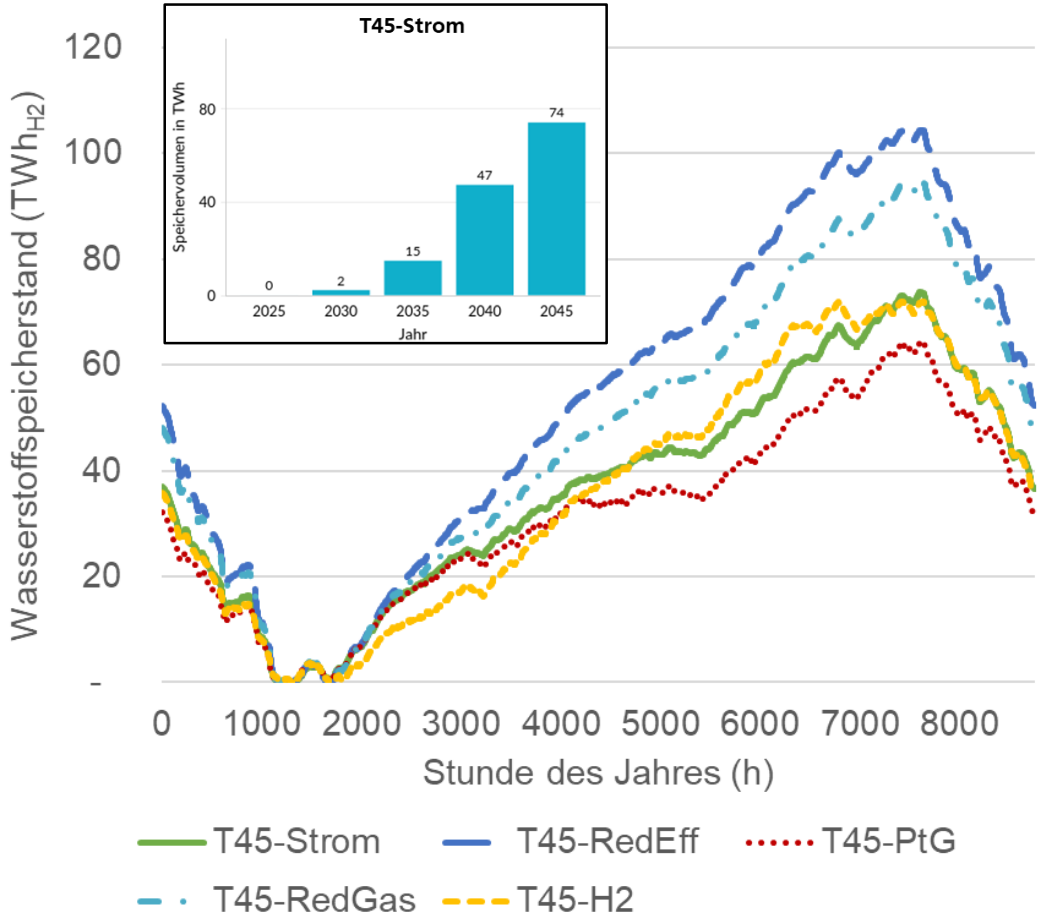
Wasserstoffsystem im Szenario *T45-Strom* und *T45-H2*
Deutschland importiert Wasserstoff





- **Ergebnisse**
  - Deutschland importiert Wasserstoff
  - Elektrolyseure folgen dem Angebot Erneuerbarer Energien (Positionierung in Norddeutschland)
  - Der in Deutschland und Europa verbrauchte Wasserstoff wird überwiegend in Europa erzeugt; Derivate kommen überwiegend von außerhalb Europas
  - Insbesondere ab 2030 starker Anstieg des Wasserstoffbedarfs
- **Einordung**
  - Europäische Produktion hängt stark von Akzeptanz und nationalen Präferenzen ab
- **Schlussfolgerungen**
  - Diversifizierung über verschiedene Importregionen innerhalb und außerhalb Europas kann eine sinnvolle Strategie sein
  - Schneller Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ist notwendig

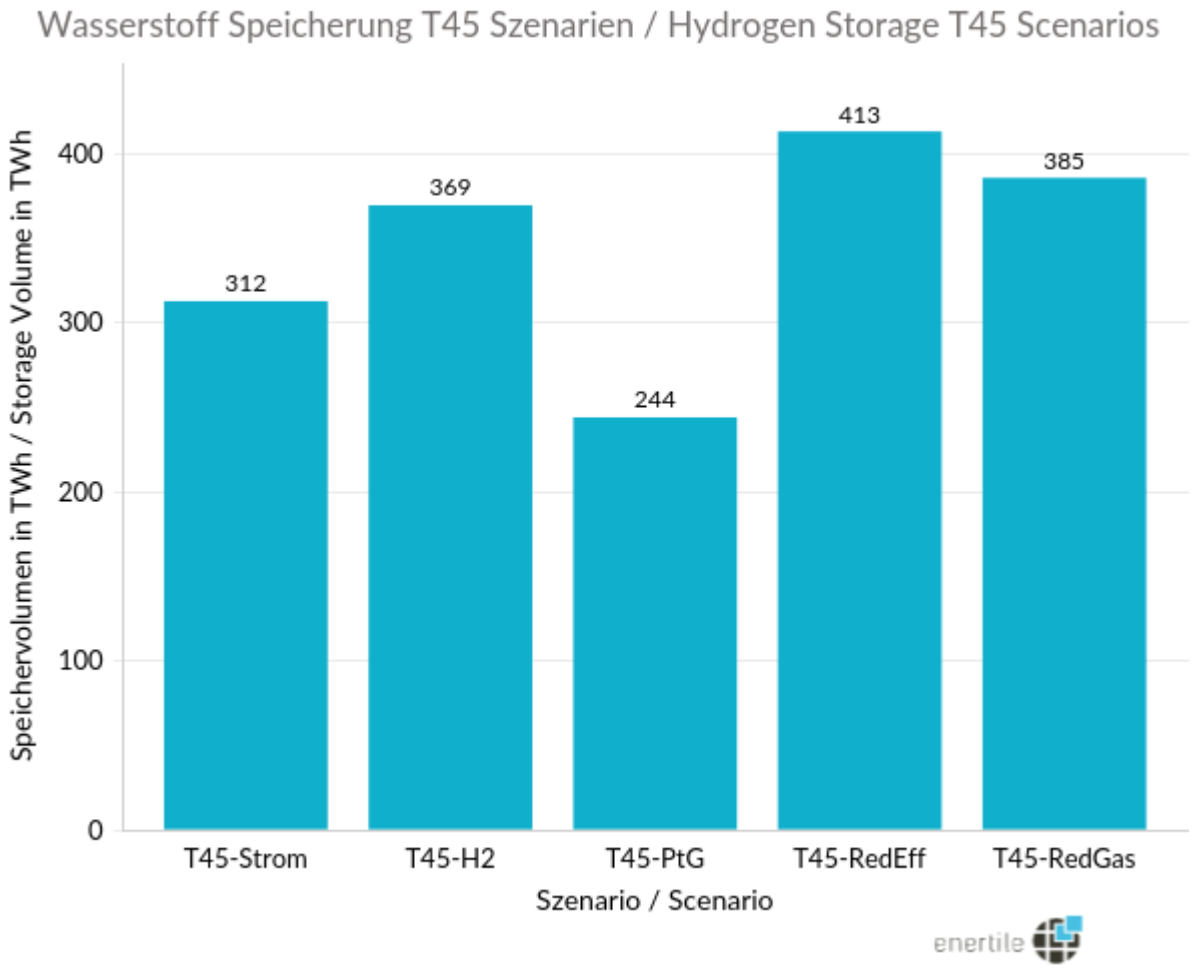
Dispatch Wasserstoffspeicher 2045 Deutschland
Wasserstoffspeicher als zentrale saisonale Speicher



Hinweis: Restriktion im Modell Speicherfüllstand 50% zu Beginn eines Jahres

- **Ergebnisse**
  - Wasserstoffspeicher fungieren als zentraler saisonaler Energiespeicher
  - Je stärker die Restriktionen im Energiesystem, desto höher ist der Bedarf
  - Speicherbedarf besteht schon ab 2030
- **Einordung**
  - Bestehendes Salzkavernenpotenzial in DE zur Umrüstung beträgt ca. 35-50 TWh
  - Es besteht Neubaubedarf
- **Schlussfolgerungen**
  - Ausbaubedarf von H_2-Kavernenspeichern bis 2045
  - Der Ausbau sollte frühzeitig angegangen werden

Wasserstoff-Speicherung in 2045
Wasserstoffspeicher sind für Europa wichtig

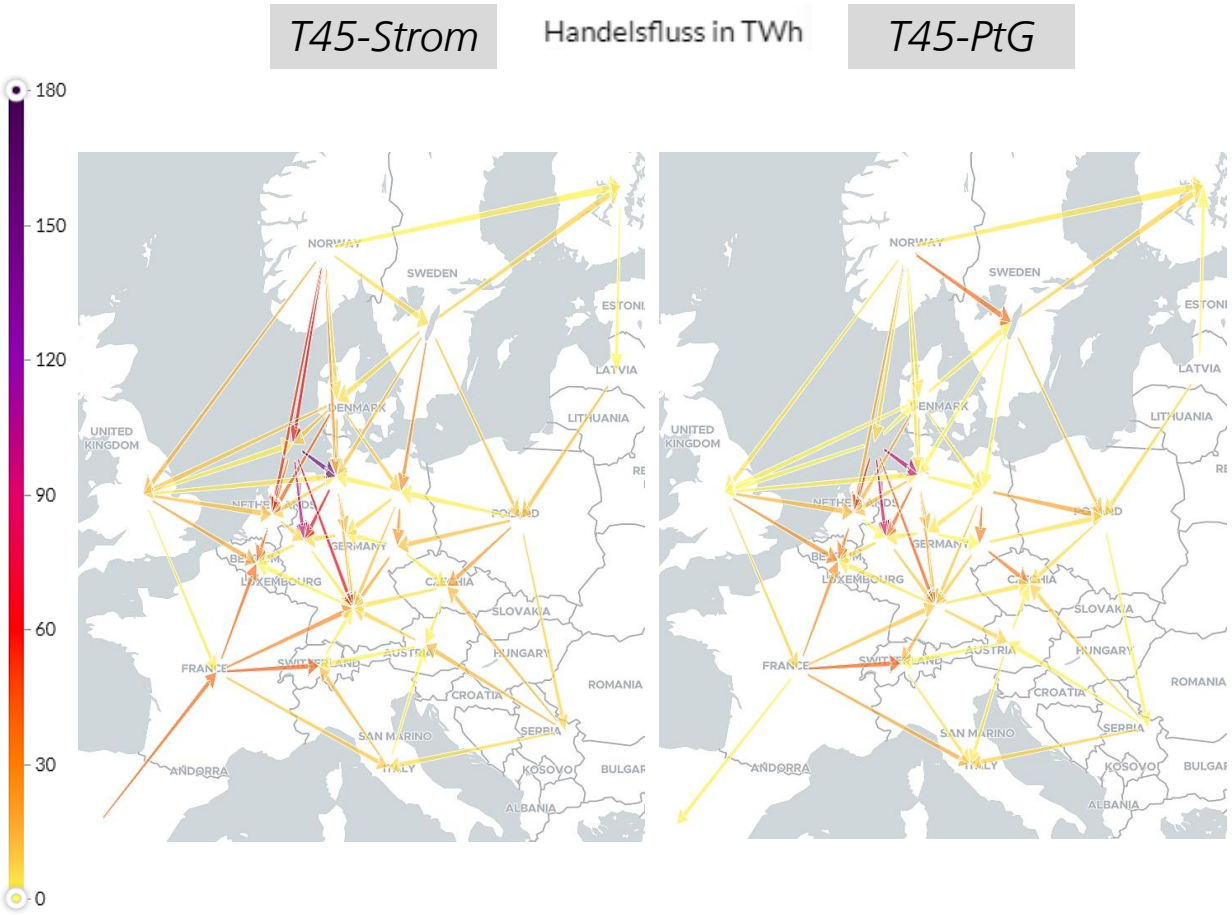


- **Ergebnisse**
  - Speicher sind in Deutschland im Norden konzentriert
  - Es besteht in Europa deutlicher Speicherbedarf
  - Speicherbedarf besteht schon ab 2030
- **Einordung**
  - Ausbau wurde nur in Regionen mit potentiellen Kavernenspeichern zugelassen
  - Es besteht Neubaubedarf
- **Schlussfolgerungen**
  - Neue H_2-Kavernen benötigt
  - Speicherbedarf steigt mit den Anforderungen an das H_2-System

Agenda

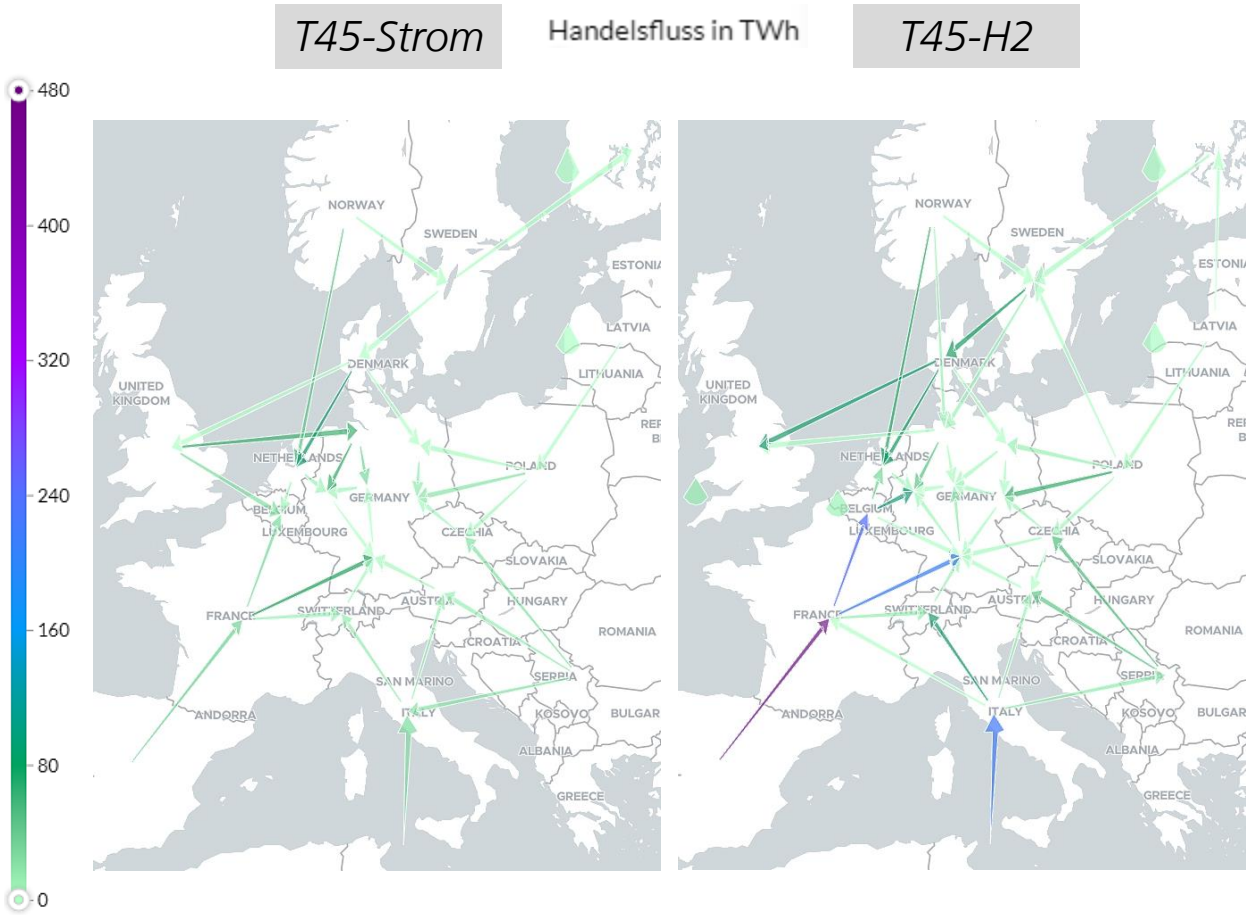
- Vorbemerkungen & Konzept der Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Netze
- Gesamtbild
- Zusammenfassung & Diskussion

Stromhandel 2045
Stromhandel bedeutend für den Ausgleich der Erneuerbaren



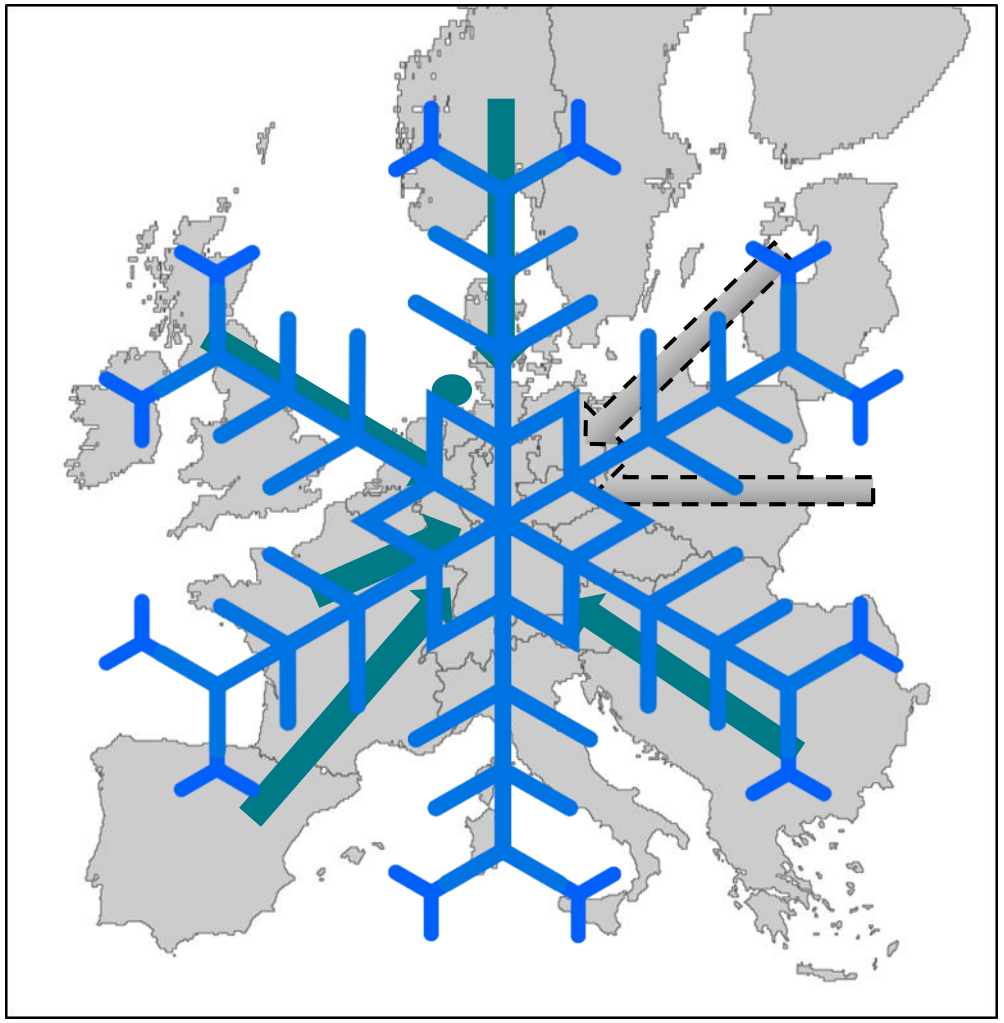
- **Ergebnisse**
  - Starke Transportachsen von Nord nach Süd in Deutschland
  - Starke Transportachsen in Richtung Zentraleuropa
- **Einordnung**
  - Die Größe der Transportachsen wird stark durch die nationalen Ausbauten der Erneuerbaren Energien geprägt
  - Dieser Ausbau der Erneuerbaren und der Transportachsen ist für Deutschland nur begrenzt beinflussbar
- **Schlussfolgerung**
  - Ausbau der europäischen Transportachsen ist zentral für die Energiewende

H_2-Handel 2045
Ein robustes H_2-Netz in Europa ist zentral



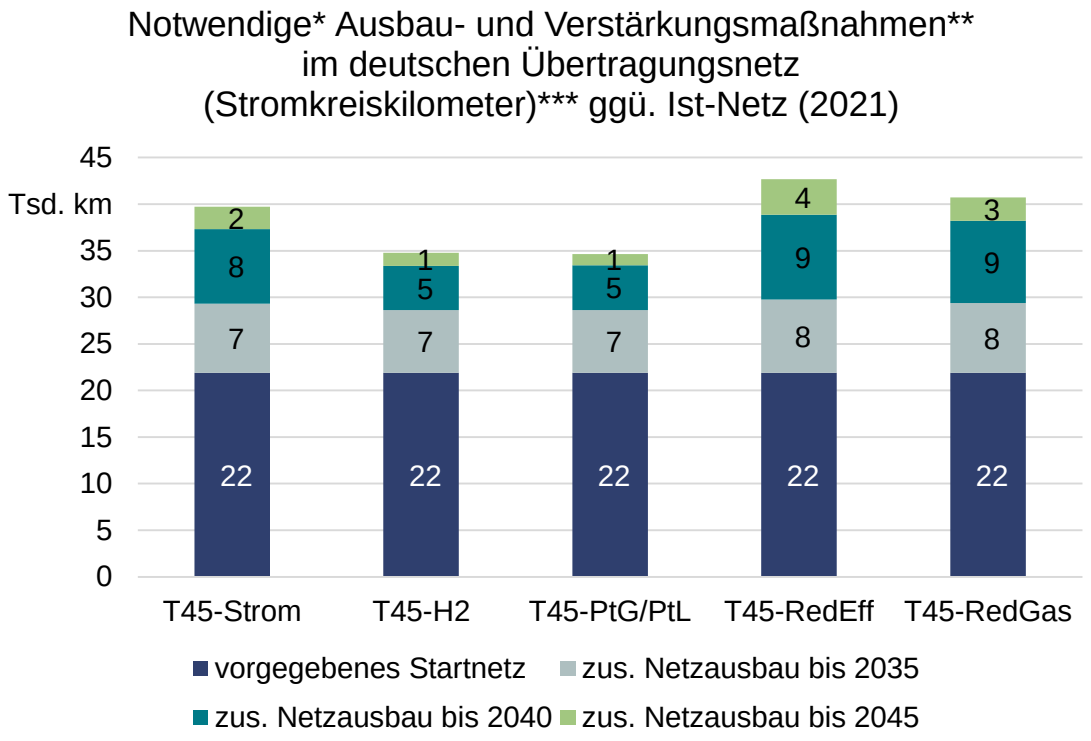
- **Ergebnisse**
  - In allen Szenarien entsteht in Europa ein europäisches Wasserstoffnetz
    - Starke Netzanbindungen aus den Rändern nach Zentraleuropa
    - Nord-Süd Achse in Deutschland
    - Sehr ähnliche Wasserstoffnetzstruktur, Unterschiede nur beim Handelsvolumen
    - Italien bezieht Wasserstoff aus MENA Region: nur sehr geringe Schiffsimporte von reinem Wasserstoff in Europa
    - Derivate kommen überwiegend aus anderen Regionen der Welt
- **Einordung**
  - Der Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Transportachsen ist zentral für die Entwicklung der H_2-Exportregionen
- **Schlussfolgerung**
  - Eine europäische Wasserstoffinfrastruktur ist zentral und sollte auf verschiedene „Exportregionen“ ausgelegt werden

Transportachsen für den Energieimport nach Deutschland
Resiliente Energietransportachsen sinnvoll



- **Folgende Regionen können Strom und Wasserstoff konkurrenzfähig zu Schiffsimporten von H_2 bereitstellen**
  - Skandinavien
  - Britische Inseln
  - Frankreich
  - Iberische Halbinsel
  - Südosteuropa
- **Unsicherheiten bestehen**
  - Akzeptanz des lokalen Ausbaus Erneuerbarer Energien
  - Akzeptanz des Ausbaus der Transportachsen
- **Transportinfrastrukturen in Deutschland/Europa brauchen Flexibilität**
  - Strom
  - Wasserstoff

Kurzübersicht – Übertragungsnetz Strom
Weiterer Übertragungsnetzausbau erforderlich



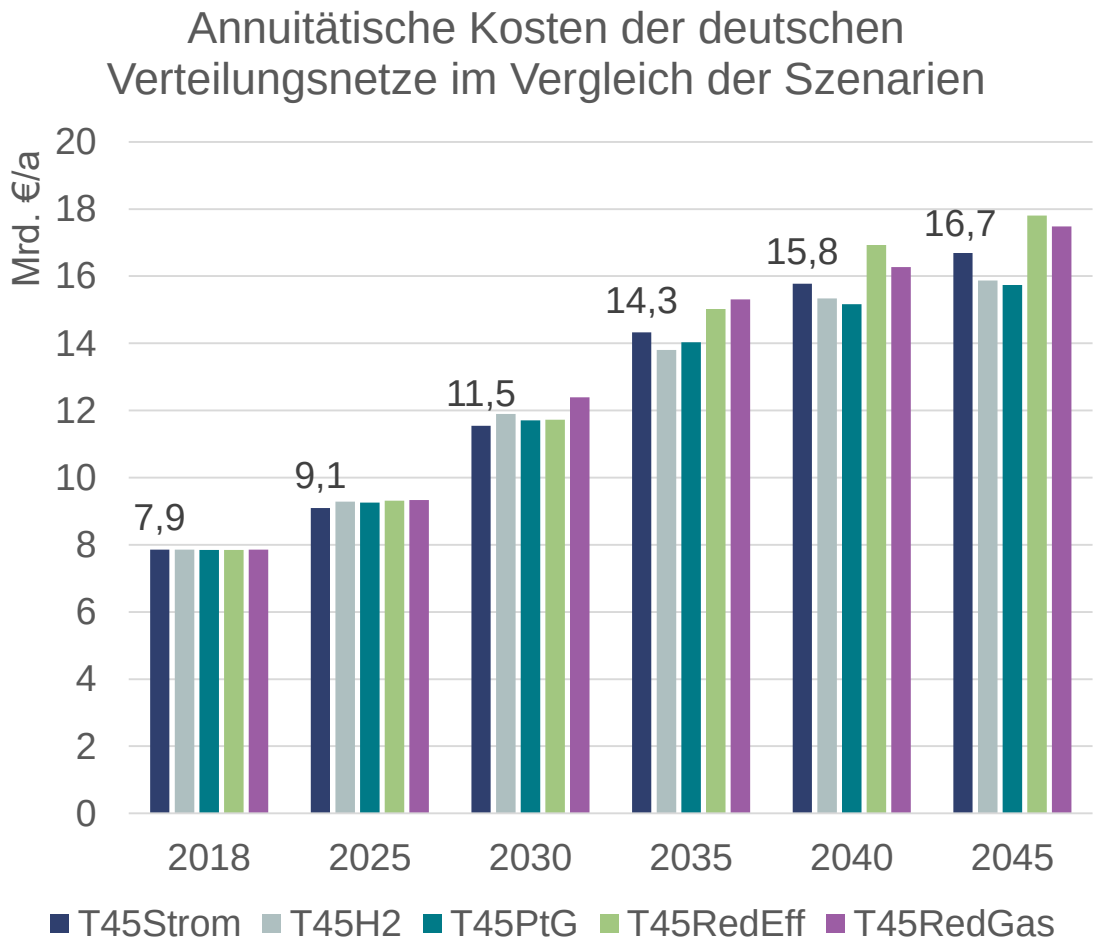
* Die Ermittlung des Netzausbaus erfolgt in dieser Studie primär im Hinblick auf das Ziel der Ermittlung kostenoptimierter Szenarien sowie zum Vergleich der Szenarien in Bezug auf die Anforderungen an das Übertragungsnetz. Die durchgeführten Berechnungen ersetzen keine detaillierte Netzausbauplanung.

**Zusätzlich zu den hier dargestellten Ausbau- und Verstärkungsmaßnahmen bei Stromleitungen erfolgt in den Szenarien zusätzlich ein Zubau / Einsatz von Phasenschiebertransformatoren und Netzboostern.

***dargestellt sind Stromkreis-km, nicht Trassen-km

- **Ergebnisse**
  - Über den bereits geplanten Ausbau hinaus muss das deutsche Übertragungsnetz bis 2045 weiter deutlich verstärkt und ausgebaut werden
  - Die zusätzlich erforderlichen Maßnahmen übersteigen den bisher geplanten Ausbau (Startnetz: bestätigter NEP2035(V2021)) um 60% bis 100%
- **Einordnung**
  - Der hauptsächliche Teil der Ausbau- und Verstärkungsmaßnahmen erfolgt in allen Szenarien bis 2035
- **Schlussfolgerungen**
  - Der Ausbau des Stromübertragungsnetzes ist ein wichtiger Baustein in allen untersuchten Szenarien
  - In allen Szenarien ist erheblicher zusätzlicher Ausbau bereits bis 2035 erforderlich (ca. 1/3 zusätzlich zu Planungen nach bestätigtem NEP)

Kurzübersicht – Verteilungsnetze Strom
Die Kosten der Verteilungsnetze steigen deutlich an

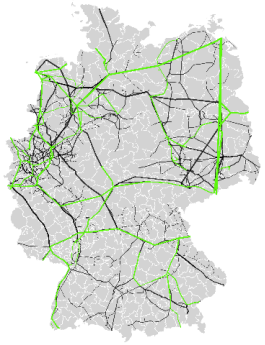


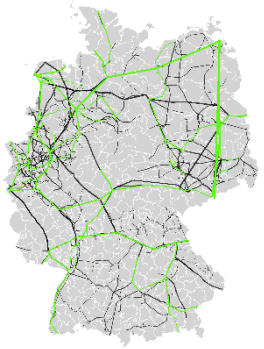
- **Ergebnisse**
  - In allen betrachteten Szenarien steigen die annuitätischen Kosten der Verteilungsnetze wegen des notwendigen Ausbaus deutlich an
  - Bis 2045 kommt es in allen Szenarien grob zu einer Verdopplung der Verteilungsnetzkosten
- **Einordnung**
  - Die Zunahme der Netzkosten ist nicht gleichbedeutend mit einem entsprechenden Anstieg der Netzentgelte, da auch der Stromverbrauch deutlich steigt
  - Ein großer Teil des Ausbaus ist bis 2035 erforderlich
  - Annuitätische Netzkosten bewerten den jeweiligen Netzbestand auf Tagesneuwertbasis. Zusätzliche Kosten aus einem vorzeitigen Ersatz bestehender Betriebsmittel kommen darin nicht zum Ausdruck
- **Schlussfolgerung**
  - In den Verteilungsnetzen entsteht flächendeckend und bereits kurzfristig ein sehr erheblicher Investitionsbedarf

Kurzübersicht – Fernleitungsnetz Gas
Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur ist zentral

2022	2045 T45-Strom	2045 T45-H2

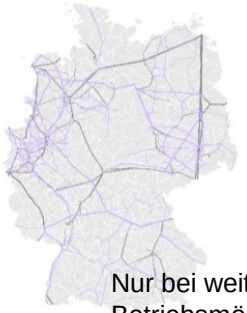
H2

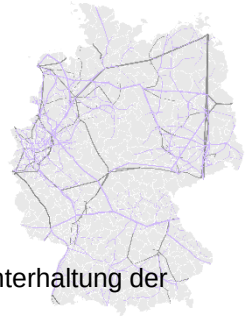




	7.500 km Betriebskosten : 500 Mio. €/a Stilllegungs-finanzierung: 158 Mio. €/a	8.100 km Betriebskosten : 1000 Mio. €/a Stilllegungs-finanzierung: 155 Mio. €/a

CH 4



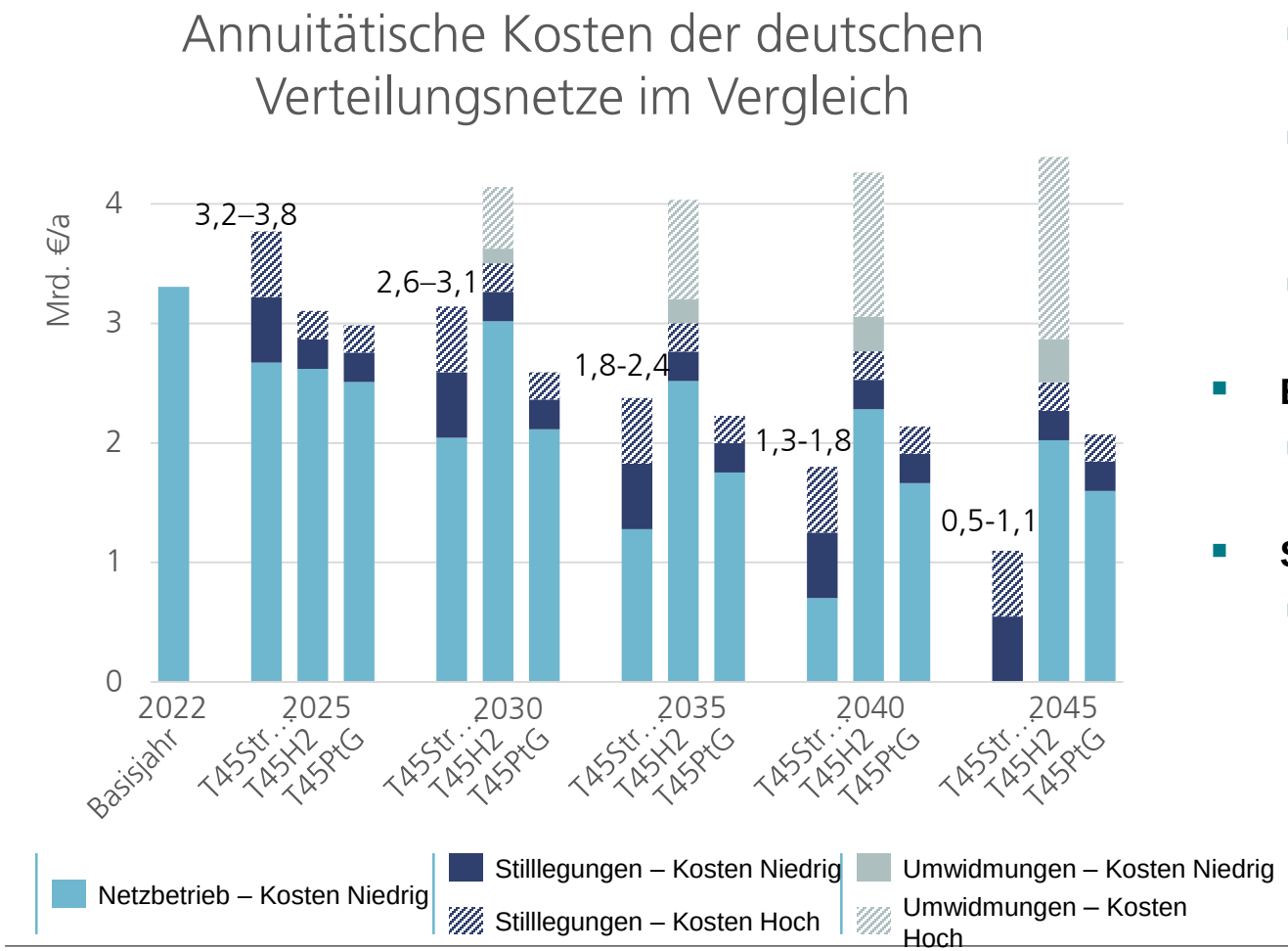


Nur bei weiterer Aufrechterhaltung der Betriebsmöglichkeit

- **Ergebnisse**
  - Unterschiedliche Netztopologien für H2 und CH4 je nach Szenario
  - Ausbau des Wasserstoffnetzes in mehreren Stufen bei kontinuierlicher Reduktion der Erdgasinfrastruktur
  - Etwas ausgedehnteres Wasserstoffnetz 2045 im T45-H2
- **Einordnung**
  - Das Wasserstoffnetz wird hauptsächlich aus der bestehenden Erdgas-Infrastruktur umgewidmet
  - Beachtung separater Transportaufgaben für H2 und CH4
  - Verknüpfung des Strom- und Wasserstoffnetzes über Elektrolyse- und Rückverstromungs-Standorte
  - Umfang des Wasserstoffnetzes v.a. bedingt durch Standorte für Elektrolyse & H2-Nachfrage und Handelsflüsse
- **Schlussfolgerungen**
  - Umstellung i.W. auf Basis vorhandener Netzinfrastruktur möglich und zügig anzugehen
  - Europäische Koordination unter Berücksichtigung von Erzeugungs-, Import- und Nachfrageregionen sinnvoll

Kurzübersicht – Verteilungsnetze Gas

Die Kosten der Verteilungsnetze sinken durch geringere Netzlänge



- **Ergebnisse**
  - In den Szenarien T45-Strom und T45-PtG sinken die annuitätischen Kosten der Verteilungsnetze deutlich
  - Im Szenario T45-H2 kommt es zu einer Kostensteigerung, wenn von hohen Umwidmungskosten ausgegangen wird
  - Vollständige Stilllegung der Verteilungsnetze im Szenario T45-Strom bis 2045
- **Einordnung**
  - Der Nachfragerückgang ist Treiber der Netzentwicklung bei den Verteilungsnetzen
- **Schlussfolgerung**
  - Netzbetrieb als größter Kostenfaktor rückläufig, je nach Szenario deutliche Anteile von Stilllegungs- und/oder Umwidmungskosten

Agenda

- Vorbemerkungen & Konzept der Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Netze
- Gesamtbild
- Zusammenfassung & Diskussion

Sektoranalyse Angebot – Importe 2045 (netto)
Unterschiedliche Hauptenergieträger werden importiert

T45-Strom

Importe:
178 TWh Wasserstoff
123 TWh Strom
0 TWh PtG
219 TWh PtL

➢ 815 TWh Stromäquivalente

T45-H2

Importe:
422 TWh Wasserstoff
102 TWh Strom
0 TWh PtG
193 TWh PtL

➢ 1090 TWh Stromäquivalente

T45-PtG/PtL

Importe:
-27 TWh Wasserstoff
-102 TWh Strom
535 TWh PtG
361 TWh PtL

➢ 1600 TWh Stromäquivalente

T45-RedEff

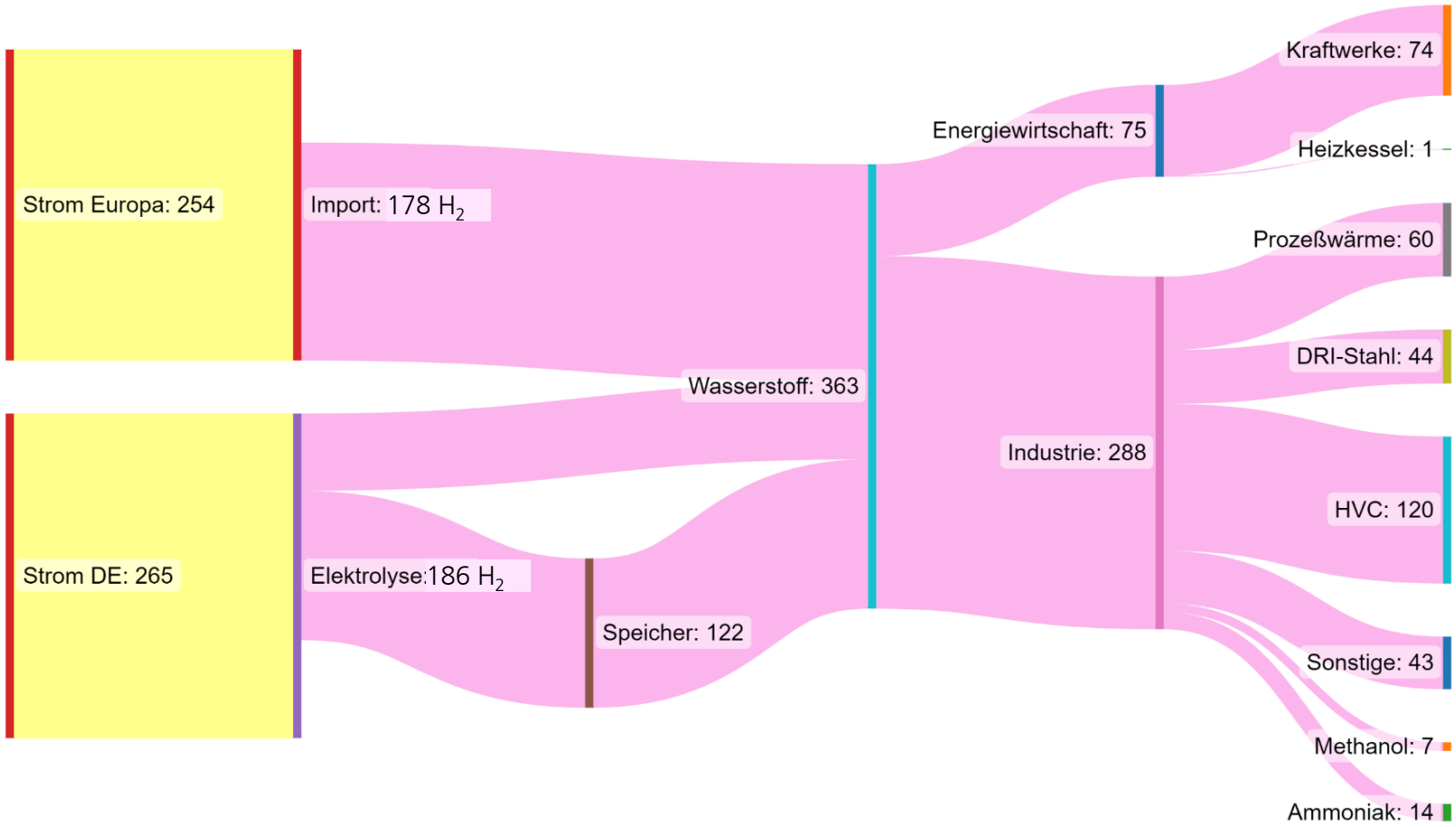
Importe:
328 TWh Wasserstoff
176 TWh Strom
22 TWh PtG
324 TWh PtL

➢ 1335 TWh Stromäquivalente

- **Ergebnisse**
  - Deutschland importiert in allen Szenarien netto Energie
  - Der importierte Hauptenergieträger unterscheidet sich deutlich
  - Der stärkste Import findet im Szenario *T45-PtG/PtL* statt
- **Einordung**
  - Letztlich wird 2045 in allen drei Szenarien Stromerzeugung im Ausland für den deutschen Energiebedarf benötigt
  - Die benötigte Strommenge nimmt bei Wasserstoff und insbesondere PtG/PtL durch Verluste in der Umwandlungskette deutlich zu
  - Die Importabhängigkeit Deutschlands sinkt gegenüber heute deutlich (30-40% in 2045)
- **Schlussfolgerung**
  - Die Diskussion über die Organisation deutscher Energieimporte und den entsprechenden Flächenbedarf sollte angegangen werden

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

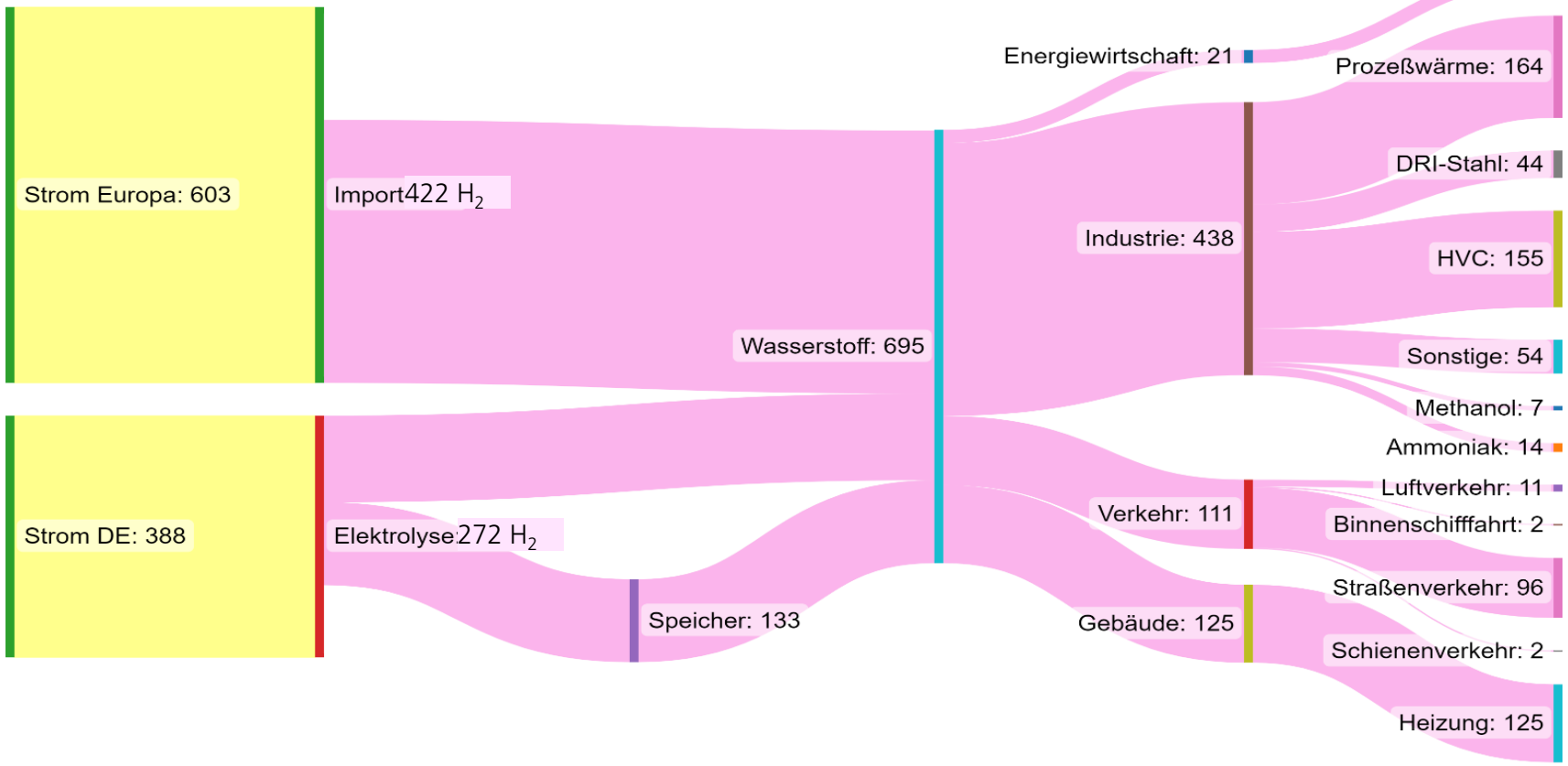
Wasserstoffbilanz *T45-Strom* 2045
Wasserstoffsystem mit großem Strombedarf



- **Ergebnisse**
  - Über Wasserstoff importiert Deutschland indirekt ca. 250 TWh Strom aus Europa
  - Signifikante Wasserstoffmengen durchlaufen Wasserstoffspeicher

Wasserstoffbilanz *T45-H2* 2045
Wasserstoffsystem fällt deutlich größer aus

Einheit TWh

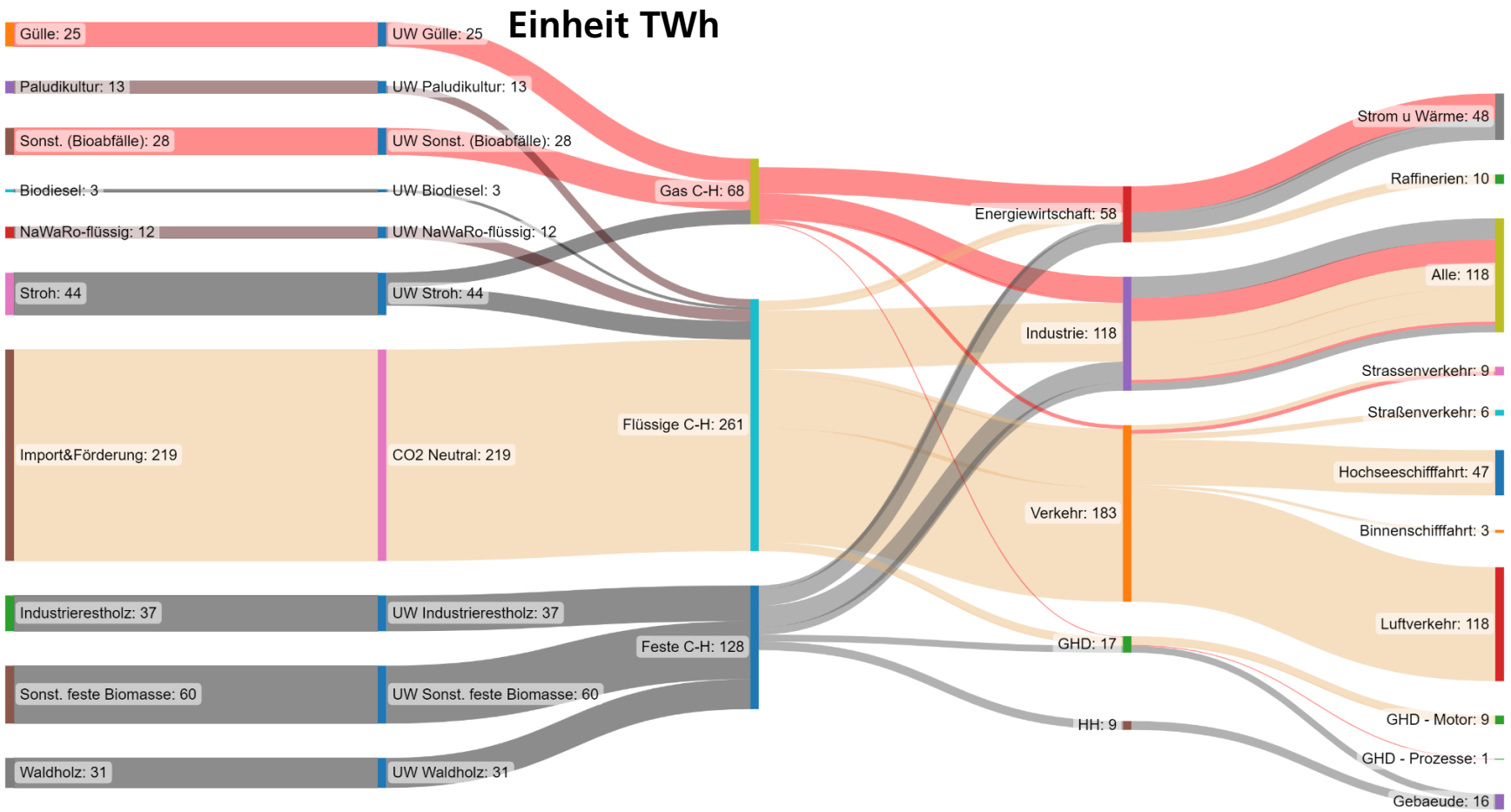


- **Ergebnisse**
  - Über Wasserstoff importiert Deutschland indirekt ca. 600 TWh Strom aus Europa
  - H_2-System fällt deutlich größer aus

Farbgebung: Strom, H_2, Knoten zufällig

Bilanz Kohlenwasserstoffe in 2045: Szenario *T45-Strom*

Schiffe und Flugzeuge benötigen importierte Kraftstoffe



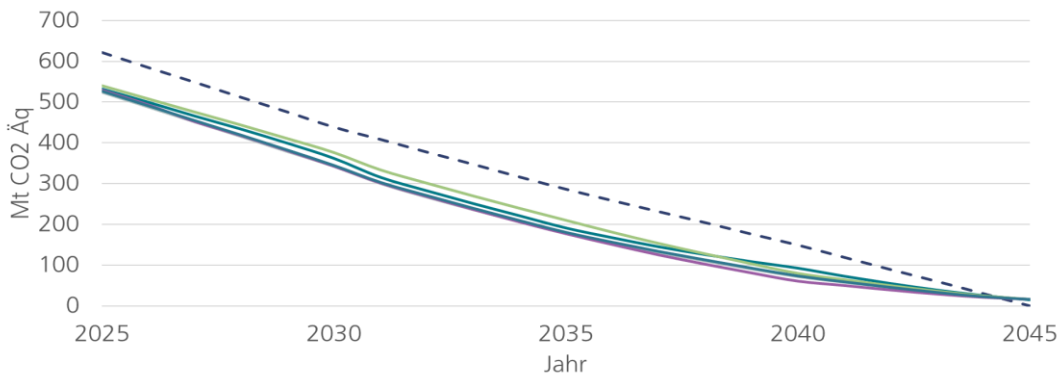
C-H= Kohlenwasserstoffe

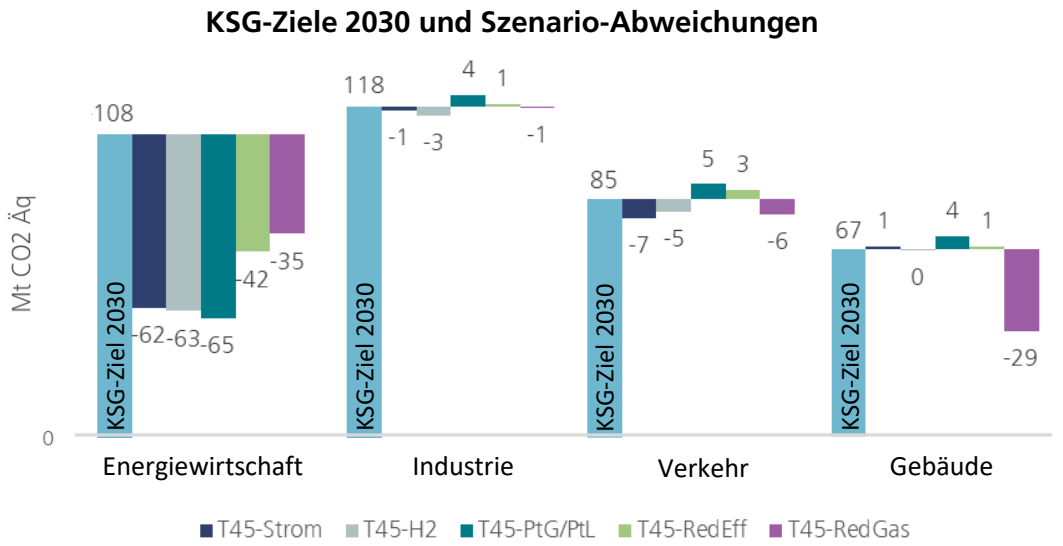
UW= Umwandlung

- **Ergebnisse**
  - Schiffsverkehr; Flugverkehr und Industrie benötigen flüssige Kohlenwasserstoffe

Farbgebung: Gas C-H, Flüssige C-H, Feste C-H, Flüsse nach Brennstoffkategorie, Knoten zufällig

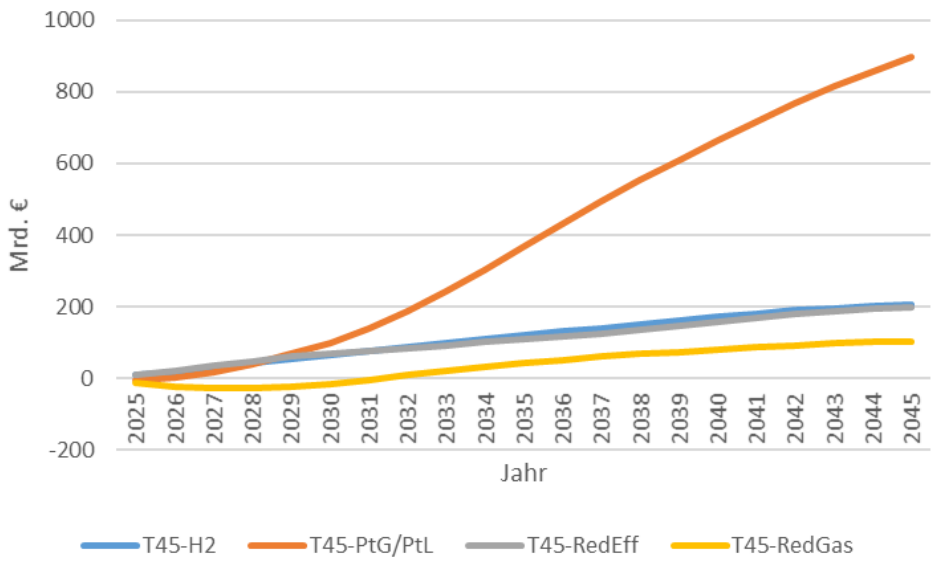
Entwicklung THG-Emissionen Deutschland (KSG)
Szenarien erreichen die Ziele





- **Ergebnisse**
  - Die Emissionsziele werden weitgehend erreicht
  - Beitrag zur Gesamtunterschreitung kommt aus der Energiewirtschaft
  - Im Jahr 2045 sind zusätzliche technische negative Emissionen zwischen 15 und 20 Mt notwendig
- **Einordnung**
  - In der Energiewirtschaft liegen die Emissionen deutlich unterhalb des Sektorziels, weil die Rahmenbedingungen des Sektors nach Festlegung der Klimaziele deutlich angepasst wurden
  - Die Zielerreichung 2030 im Gebäudesektor ist in den Szenarien *T45-H2* und *T45-PtG/PtL* nur mit kaum realisierbarem Ausbau von Hybridwärmepumpen möglich
  - Technische negative Emissionen müssen frühzeitig angegangen werden, um 2045 THG-Neutralität zu erreichen
  - In der Realität ist das Potential für Verschiebung zwischen den Sektoren begrenzt (EU-Zielvorgaben für Non-ETS-Sektoren)
- **Schlussfolgerungen**
  - Ausbau Erneuerbarer Energien ist zentral für die Zielerreichung
  - Negative technische Emissionen werden benötigt

Kurzübersicht – Mehrkosten gegenüber *T45-Strom*
Dekarbonisierung über Strom ist deutlich günstiger

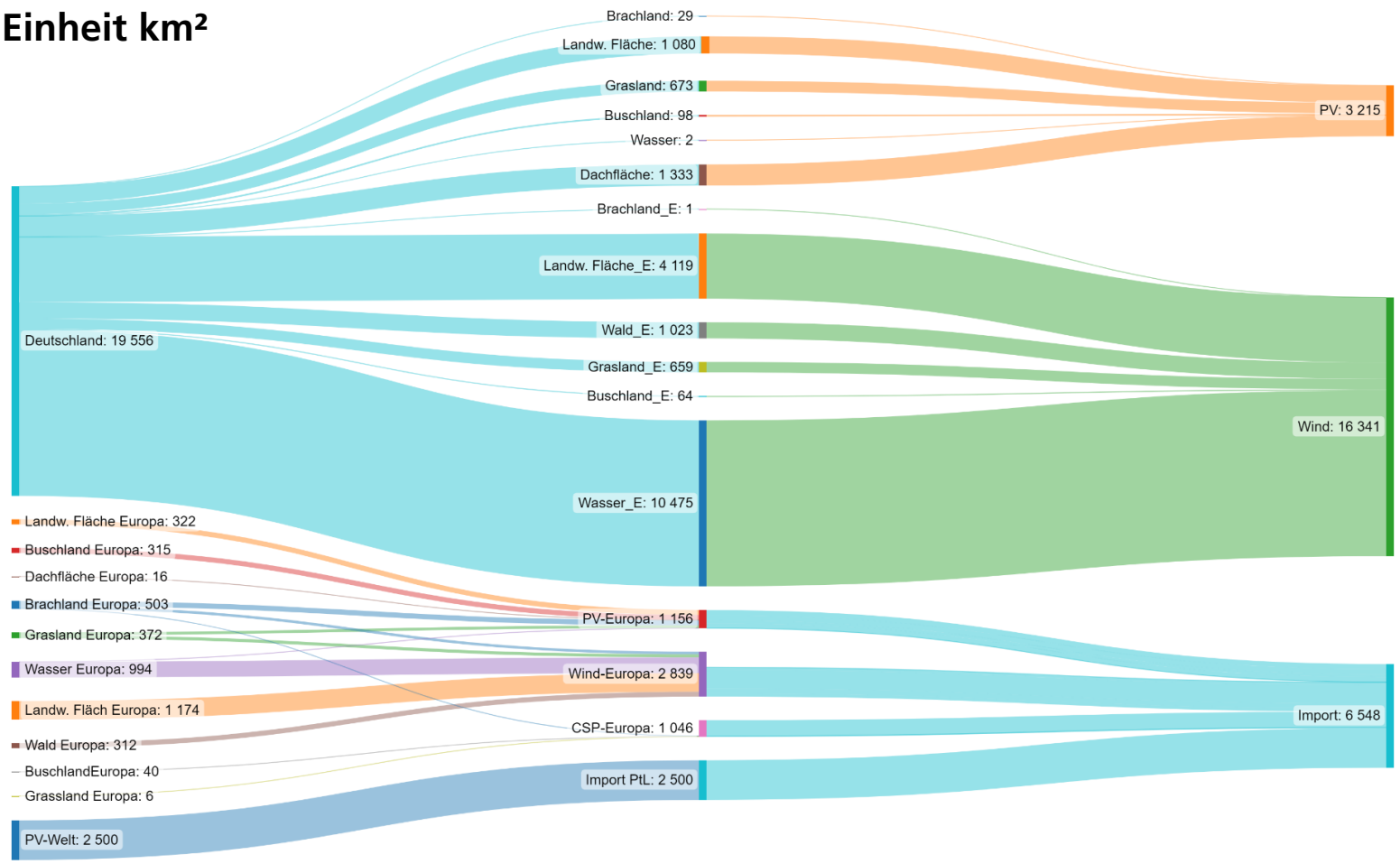


Hinweis: Vorläufige Zahlen

- **Ergebnisse**
  - Energieträgerkosten sind der größte Posten im Vergleich
  - Energieträgerkosten fallen im Szenario *T45-PtG/PtL* am höchsten aus
  - Starke H_2 Nutzung anstelle von Elektrifizierung und reduzierte Effizienz erhöhen Kosten des Energiesystems deutlich
  - Verteilnetze sind der größte Kostenblock bei den Stromnetzen
  - Die Kosten für Gasnetze sind vergleichsweise niedrig
- **Einordnung**
  - Die Brennstoffkosten für PtG sind hier sehr niedrig angesetzt
  - Die Kapitalkosten werden in diesem Projekt aus volkswirtschaftlicher Perspektive nur mit 2% Zinsen belegt
  - Der regulatorische Rahmen bestimmt die Kosten maßgeblich
  - Kostenprojektionen sind unsicher und nicht das zentrale Ergebnis
- **Schlussfolgerungen**
  - Starke PtG-Nutzung führt zu deutlich höheren Kosten
  - Geld fließt entweder stärker in Infrastrukturen oder in Energieträger
  - Neben Kosten müssen jedoch weitere Kriterien insbesondere für die Umsetzung in der Nutzung von Strom oder H_2 beachtet werden

Flächenbilanz Energiesystem DE *T45-Strom* Jahr 2045
Deutscher Flächenfußabdruck deutlich kleiner

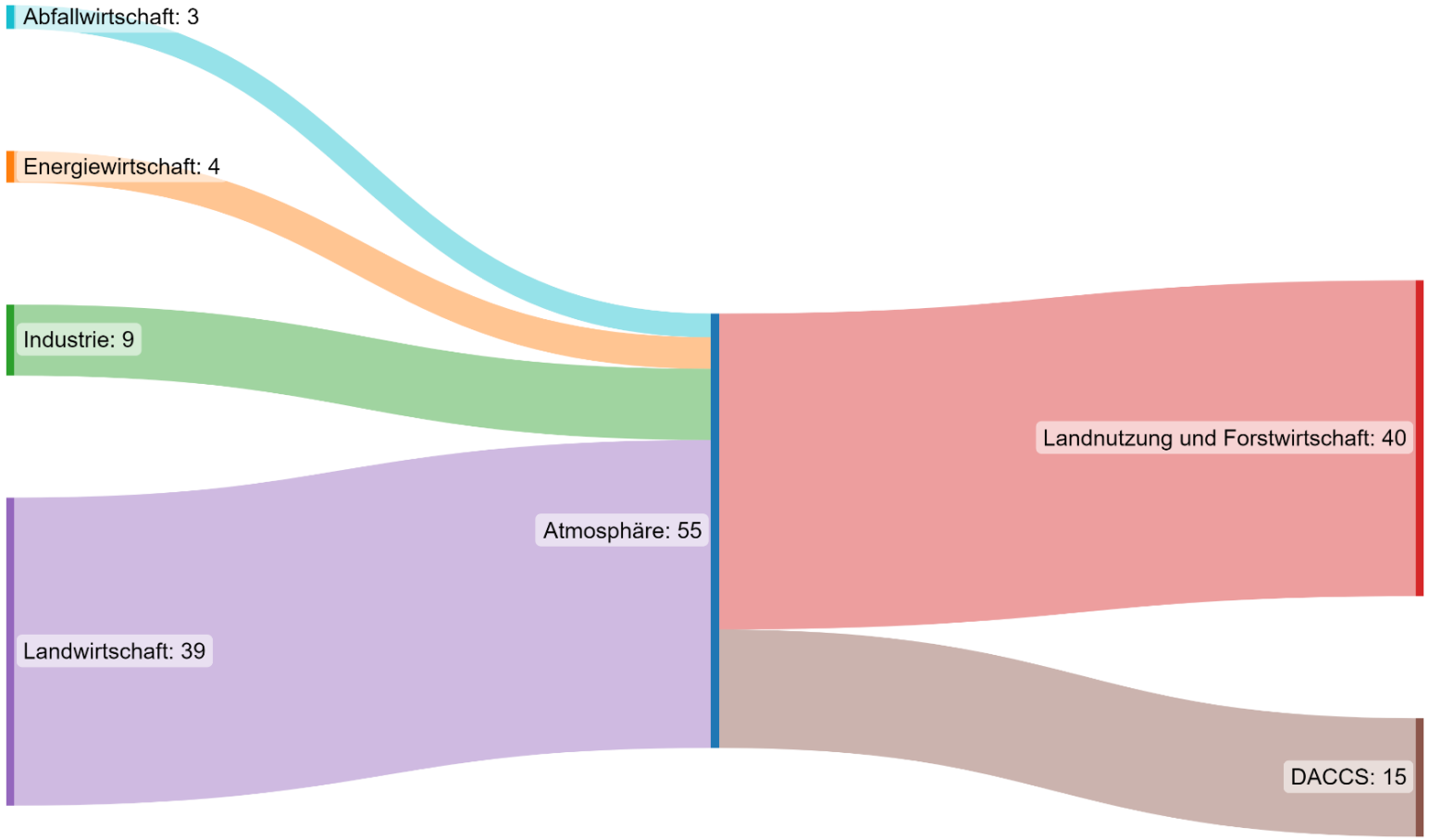
Einheit km²



- **Ergebnisse**
  - Der deutsche Flächenfußabdruck fällt sehr viel kleiner aus als heute.
  - Über Importe von Strom, Wasserstoff und PtL werden signifikante Flächen im Ausland beeinträchtigt.

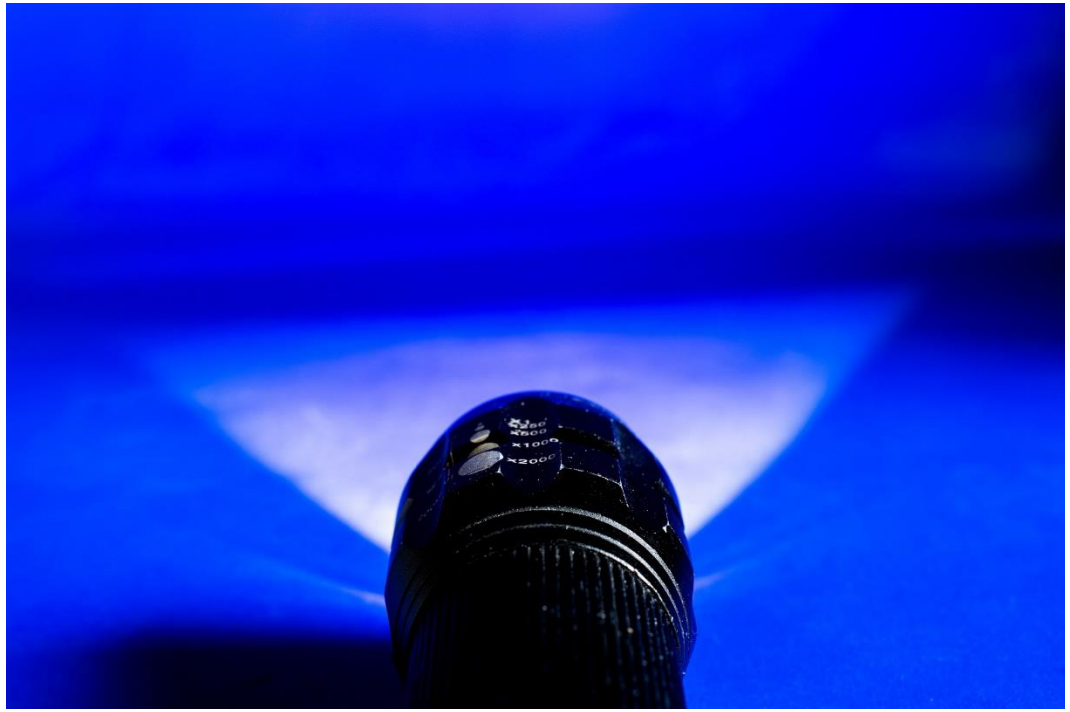
Emissionen 2045: *T45-Strom*
Negative Emissionen benötigt

Einheit Mt



- **Ergebnisse**
  - Landwirtschaft zentral für die Restemissionen
  - Negative Emissionen in der Landnutzung bedeutend
  - Luftabscheidung wird im Mt-Größenordnung benötigt
- **Einordnung**
  - Fleischkonsum zentral für Restemissionen
  - Hohe Waldschäden können LULUCF-Ziel gefährden
- **Schlussfolgerung**
  - Strategie für DACCS sollte zügig entwickelt werden

Agenda



- Vorbemerkungen & Konzept der Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Netze
- Gesamtbild
- Zusammenfassung & Diskussion

Zusammenfassung & zentrale Erkenntnisse 1/2
Effizienz und Elektrifizierung sind der Schlüssel

- Der deutsche Flächenfußabdruck kann in der Energiewende deutlich verkleinert werden
  - Energieeffizienz ist hierfür ein zentraler Baustein
  - Elektrifizierung ist in vielen Fällen die bevorzugte Lösung
- Elektrifizierung ist zentral für die Emissionsreduktion in:
  - Gebäuden
    - Ein möglichst schneller Ausbau der Wärmenetze und der Wärmepumpen ist die dominante Strategie zur Erreichung der Klima-/ und Sektorziele
  - Verkehr
    - In großen Teilen des landgebundenen Verkehrs setzt sich in den Szenarien die Elektrifizierung durch
  - Industrie
    - Direkte Elektrifizierung bietet für große Bereiche der Prozesswärme Effizienzvorteile (HT-Wärmepumpen möglich)
    - Auch darüber hinaus ist Elektrifizierung in allen Szenarien vorhanden (Industrieöfen, Stahlrecycling)
    - Verringerte Ambitionen der Energieeffizienz führen kurzfristig zu gefährdeten Klimazielen und langfristig zu massivem Anstieg des Bedarfs an hochwertigen Energieträgern (*T45-RedEff*)

Zusammenfassung & zentrale Erkenntnisse 2/2
Resilienz für Versorgung und Zielerreichung ist zentral

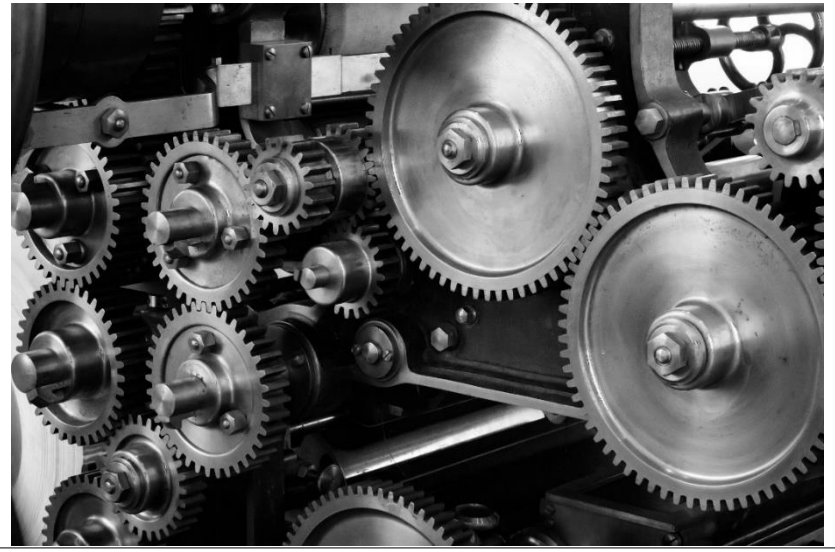
- Wasserstoff zentral für Industrie- und Umwandlungssektor
  - Umwandlungssektor benötigt mittelfristig Wasserstoff als Backup-Option
  - In der Stahlindustrie und chemischen Industrie ist Wasserstoff wichtiger Bestandteil der Dekarbonisierung
  - An den entsprechenden Standorten ist Wasserstoff in der Prozesswärme eine wichtige Option
  - Starke Wasserstoffnutzung erfordert Speicherzugang
- Flug- und Schiffverkehr sind weiterhin auf importierte Kohlenwasserstoffe angewiesen
- Geschwindigkeit im Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Transportnetze ist zentral
- Energietransportnetze müssen robuster werden
  - Ein Großteil der Energieversorgung in Deutschland und Europa wird leitungsgebunden sein
  - Deutschland wird weiterhin Energie importieren und hat nur begrenzten Einfluss auf die tatsächliche Entwicklung der potentiellen Energieexporteure
  - Wasserstoffspeicher sind zentral für den saisonalen Ausgleich und sollten eher großzügig ausgebaut werden
  - Die Dimensionierung von Transportnetzen für Strom- und H_2 sollte Ansprüchen an die Resilienz genügen
- Technische negative Emissionen müssen frühzeitig vorangebracht werden

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

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Webinare

Gesamtüberblick:
15.11.2022 12-14:00 Uhr
Industrie:
16.11.2022 10-11:30 Uhr
Gebäude:
17.11.2022 13-14:30 Uhr
Energieangebot:
22.11.2022 10-12:30 Uhr
Verkehr:
21.11.2022 10-11:30 Uhr
Strom-, Gas- und Wasserstoffnetze:
24.11.2022 10-12:00 Uhr



Ansprechpartner:	
Projektleitung:	Dr. Frank Sensfuß
Energieangebot:	Dr. Christoph Kiefer
Gasnetze:	Prof. Dr. Müller-Kirchenbauer
Gebäude:	Peter Mellwig
Gesamtbilanzen:	Dr. Gerda Deac
Geräte & GHD:	Dr. Heike Brugger
Industrie:	Dr. Tobias Fleiter
Stromnetze:	Dr. Christoph Maurer
Verkehr:	Prof. Dr. Martin Wietschel

www.langfristszenarien.de