LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND

Treibhausgasneutrale Szenarien T45

Webinar Verkehr 21.11.2022

Prof. Dr. Martin Wietschel, Dr. Till Gnann (Fraunhofer ISI)

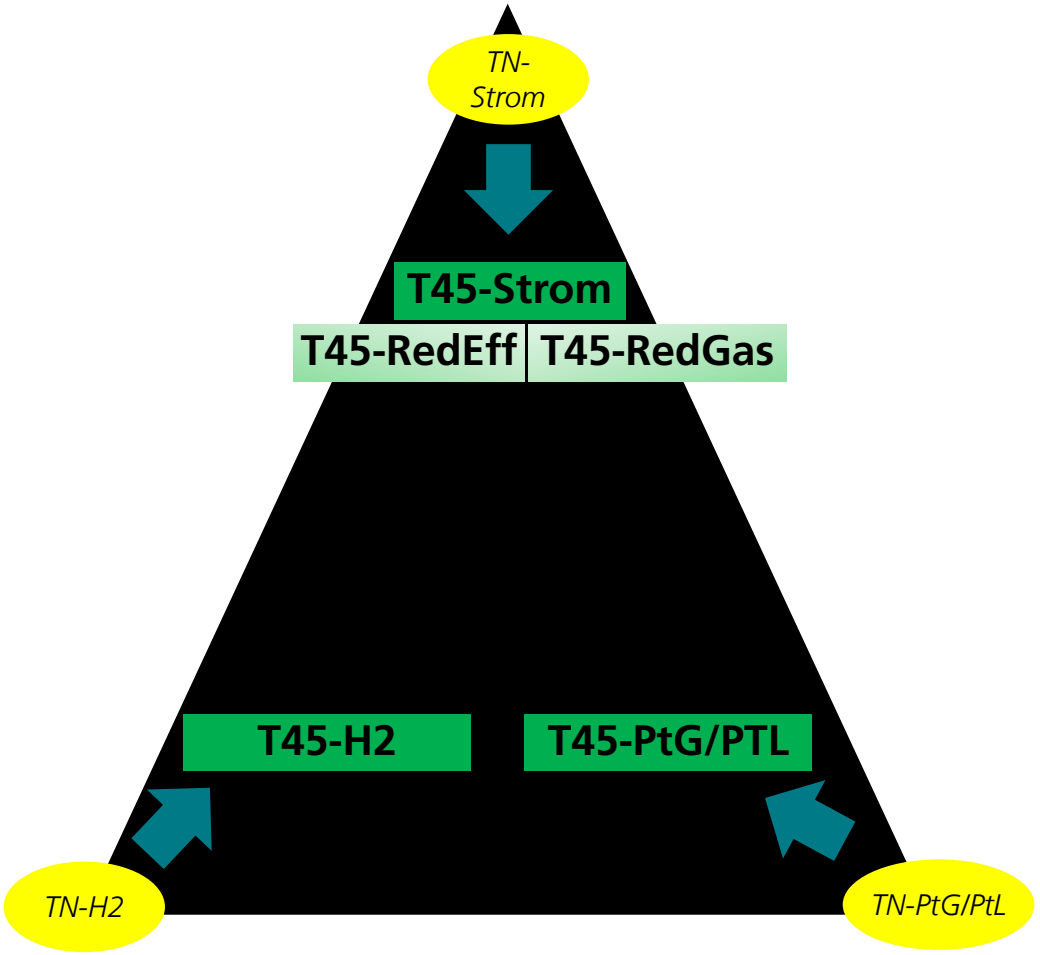
Autoren:
Dr. Till Gnann, Daniel Speth, Dr. Michael Krail, Prof. Martin Wietschel

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

Agenda

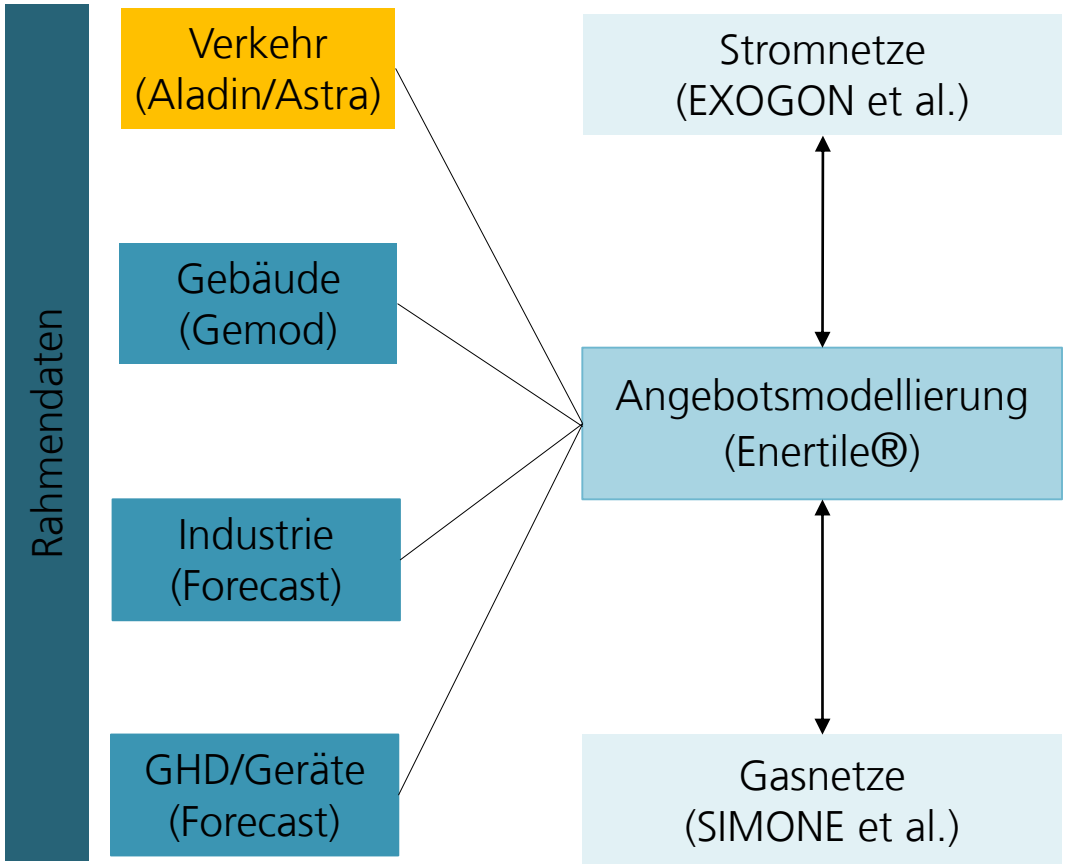
- Einführung
  - **Einordnung Langfristszenarien**
  - Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträgern
  - Allgemeine Annahmen und Rahmenparameter
  - Pkw: Annahmen und Ergebnisse
  - Nfz: Annahmen und Ergebnisse
  - Weitere Verkehrsträger
- Variationsrechnungen: *T45-RedEff* und *T45-RedGas*
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Rückfragen und Diskussion*

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

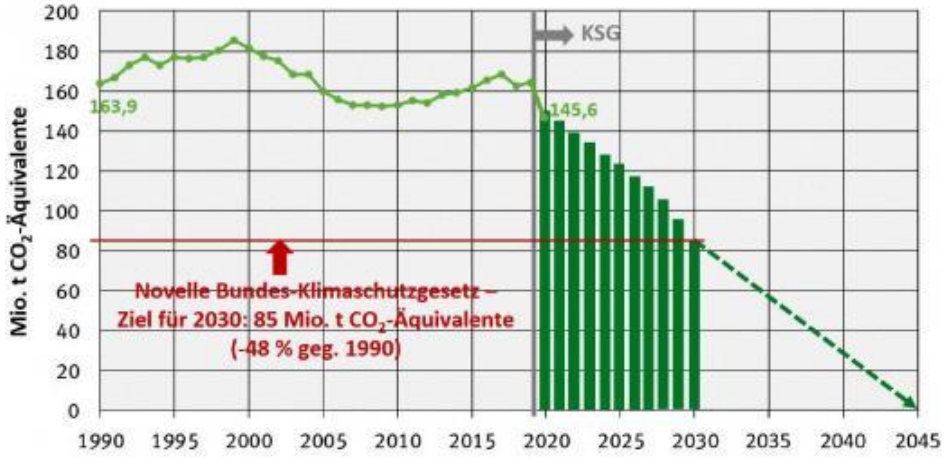


- **Vorgehensweise**
  - Detaillierte Modelle berechnen Energienachfrage
  - Energienachfrage wird **regionalisiert**
  - Potentiale Erneuerbarer Energien werden in hoher räumlicher und **zeitlicher** (stundenscharf) Auflösung berechnet
  - Bereitstellung der Energie wird optimiert und mit Netzmodellen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

Einordnung: Sektorziele im Verkehr sind, auch angesichts der historischen Entwicklung, sehr ambitioniert

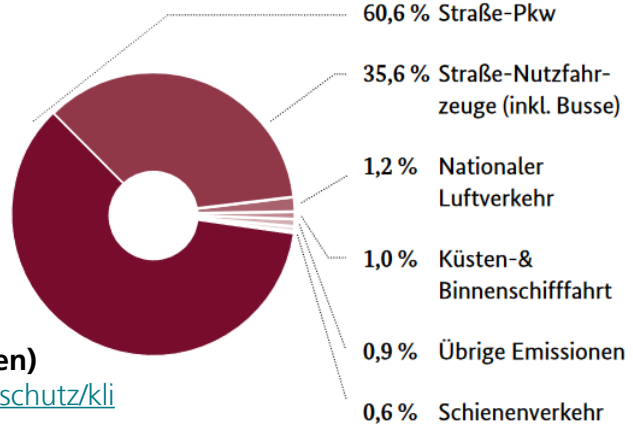
Ziele des Verkehrssektors:

- **Pkw 2030**: 15 Mio. BEV
- **Lkw 2030**: Ein Drittel elektrische Fahrleistung bei schweren Nutzfahrzeugen
- **CO_2-Minderung Verkehr 2030**: -48% CO_2 2030 vs. 1990 → 85 Mt CO_2 2030
- **CO_2-frei 2045**



Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland und Ziele nach Klimaschutzgesetz; Quelle: Umweltbundesamt und Bundesregierung

- **Fokus** der Emissionsminderung bei **Pkw und Lkw**, da Hauptemittenten
- **Energiebedarf** wird **inkl. Hochsee- und int. Luftverkehr** angegeben



Emissionsquellen Verkehr 2017 (ohne CO_2 aus Biokraftstoffen)
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutz_zahlen_2019_fs_verkehr_de_bf.pdf

BEV: Battery Electric Vehicles (reine Batteriefahrzeuge)

Agenda

- Einführung
  - Einordnung Langfristszenarien
  - **Methodik und Modelle**
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträgern
  - Allgemeine Annahmen und Rahmenparameter
  - Pkw: Annahmen und Ergebnisse
  - Nfz: Annahmen und Ergebnisse
  - Weitere Verkehrsträger
- Variationsrechnungen: *T45-RedEff* und *T45-RedGas*
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Rückfragen und Diskussion*

Modellierung: Modellkopplung verbindet agentenbasierte mikroskopische Analyse mit makroskopischen Einflüssen

Fahrzeugflotten und Antriebstechnologien

ALADIN
ALternative Automobiles Diffusion and INfrastructure

Nutzerscharfe Analyse

Nutzerverhalten

Fahrprofile

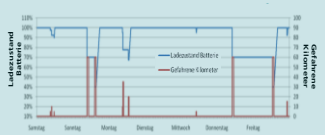
- Alle Fahrten mind. einer Woche: Entfernung, Dauer, Zweck, Ankunft & Abf.-Zeit
- Halter: Geschl., Garage, Einkommen, Wohnort, Alter
- Fzg.-Größe, Marke, Alter

Nutzerakzeptanz

- Zahlungsbereitschaft nach Nutzergruppe (innov., early adopter, majority, laggard)
- Begrenzte Ladeinfrastruktur
- Begrenztes Modellangebot

Modellschritte

Individuelle EV-Simulation



Für jeden Nutzer *i* :

- Ersetzbarkeit BEV
- Elektr. Fahranteil PHEV

Individuelle Nutzenmaximierung

Für jeden Nutzer *i* und Antriebstechnologie *p*:

$$\max_p \left(-\mathrm{TCO}_{ip} + \text{willingness-to-pay-more}_{ip} + -\text{limited choice}_{ip} - \text{home charging cost}_{ip} \right)$$

- Nutzen-optimales Fahrzeug für jeden Nutzer

Parameter

Fahrzeugspezifisch

- *Technisch*: Batteriegröße, DoD, elek./konv. Verbrauch
- *Ökon.*: Fzg.-Preise, Steuern, Wartungskosten, Restwerte
- *Politik*: Subvention, Steuern

Fahrzeugunabhängig

- Kraftstoff/Strom/Batterie-Preise
- Kosten für Heim-Ladung
- Zukünftige EV Verfügbarkeit

Aggregiert

Differenzierung

- *3 Nutzergruppen:* privat, reine Flotten, Dienstwagen
- *3 Fzg.-Größen*: S, M, L, (LNF)
- *6 Technologien*: Benzin, Diesel, BEV, PHEV, FCEV, NGV

Bestandsmodell

Projektion von:

- Fahrzeugbestand
- Primärladepunkte
- Verläufe in Nutzergruppen

Fahrzeugmarkt

- Neuzulassungen nach Nutzergruppen und Fahrzeuggrößen
- Bestands-/Marktparameter
- Zukünftiges EV-Angebot

Verkehrsnachfrage

AsTra model

Modellschritte

Verkehrsaufkommen

- Bottom-Up Schätzung auf Grundlage makroskopischer Daten
- Verkehrserzeugung anhand von Fahrtzwecken in 39 NUTS2-Regionen

Verkehrsverteilung

- Erstellung einer Quell-Ziel-Matrix je Wegzweck
- Kalibierung anhand des Bundes-Verkehrswegeplans

Verkehrsmittelwahl

- Discrete Choice Ansatz zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für jedes Verkehrsmittel
- Ergebnis: Verkehrsmittel, Verkehrsleistung, Neuzulassungen, Bestände

Parameter

Soziographisch

- Bevölkerung
- Ökonomie
- Wertschöpfung
- Beschäftigung
- Arbeitsplätze
- Politikmaßnahmen

Verkehrsdaten

- Verkehrsverhalten (Mobilität in Deutschland, Mobilitätspanel)
- Zonencharakteristika
- Motorisierung der Bevölkerung

Verkehrsmittel

- Individualverkehr
- Öffentlicher Verkehr (Bus und Schiene)
- Nicht motorisierter Verkehr (Rad- und Fußverkehr)

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

Modellierung: Regionalisierung der Fahrzeugneuzulassungen erfolgt über Regression

Nationaler Bedarf

Deutschlandweiter Endenergiebedarf im Verkehrssektor

- Endenergiebedarf Pkw
- Endenergiebedarf Nfz
- Endenergiebedarf Bus, Bahn, Schiff, Flugverkehr

Methodischer Ansatz Regionalisierung

Zulassungsbezirke[1]

Fahrzeuge tanken/laden primär in ihrem Heimatbezirk

1. Regressionsanalyse

   Reg. Bestand ~ Reg. Entwicklung
   - Bevölkerung
   - Fläche
   - Einkommen
   - Beschäftigung

2. Zukünftige Anteilsschätzung anhand Raumordnungs-prognose bis 2050

Zulassungsbezirke + Verkehrsaufkommen

~20% der Lkw legen Strecken zurück, die die Reichweite eines Tank- bzw. Ladevorgangs überschreiten[2]

80% Zulassungsbezirke

1. Regressionsanalyse
2. Zukünftige Anteilsschätzung anhand Raumordnungs-prognose bis 2050

20% Verkehrsaufkommen

1. Ermittlung regionales Verkehrsaufkommen anhand Autobahnstraßen-verkehrszählung[3]
2. Nutzung des lokalen Verkehrsaufkommens als Verteilschlüssel

Verkehrsaufkommen

Fahrzeuge tanken/laden an Knotenpunkte (z.B. Flughäfen)

1. Ermittlung des regionalen Verkehrsaufkommens, das durch eine Infrastruktur (Schiene, Hafen, Flughafen) bedient wird
2. Nutzung des lokalen Verkehrsaufkommens als Verteilschlüssel

Regionaler Bedarf

Regionaler Endenergiebedarf im Verkehrssektor auf NUTS3-Ebene

Aggregation über alle Verkehrsträger

[1]Speth et al (2020): Future regional distribution of electric vehicles in Germany. EVS33. https://doi.org/10.5281/zenodo.4026722
[2]KID (2010): Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland. WVI Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH
[3]BASt (2017): Manuelle Straßenverkehrszählung 2015. Ergebnisse auf Bundesautobahnen.

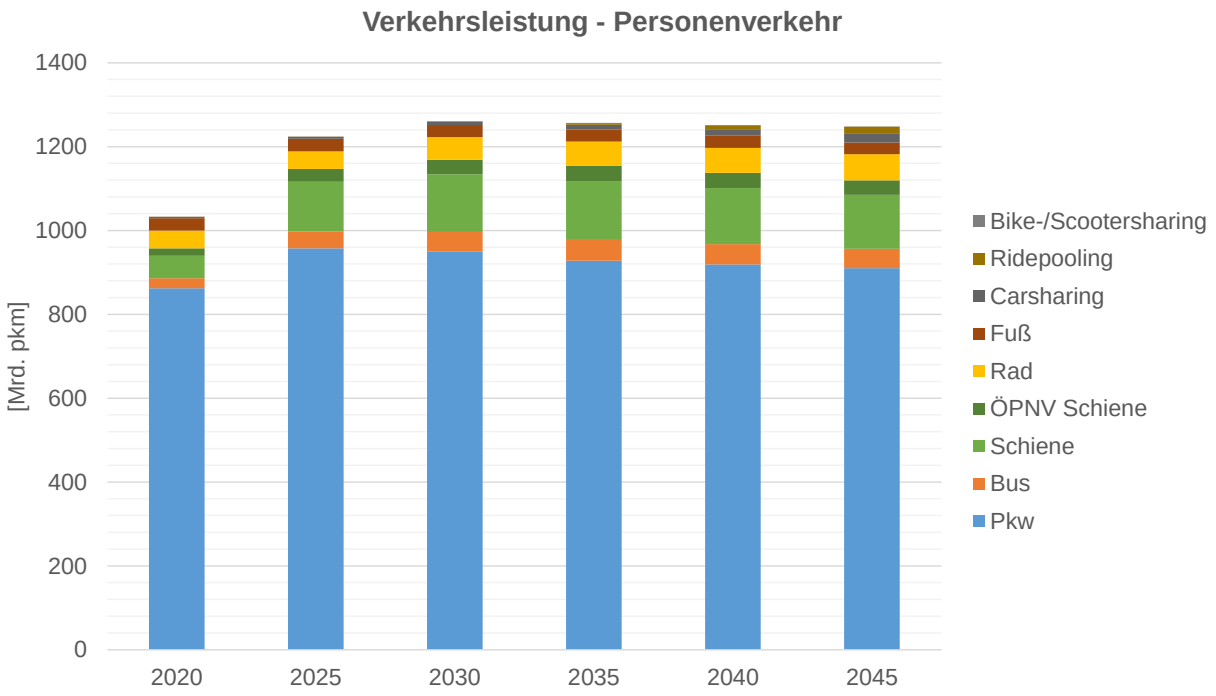
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Agenda

- Einführung
  - Einordnung Langfristszenarien
  - Methodik und Modelle
- **Verkehrsnachfrage**
- Ergebnisse nach Verkehrsträgern
  - Allgemeine Annahmen und Rahmenparameter
  - Pkw: Annahmen und Ergebnisse
  - Nfz: Annahmen und Ergebnisse
  - Weitere Verkehrsträger
- Variationsrechnungen: *T45-RedEff* und *T45-RedGas*
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Rückfragen und Diskussion*

Ergebnisse: Der Personenverkehrs in den T45-Szenarien stagniert ab 2030

- Maßnahmen mit spürbaren Wirkungen
  - CO_2-Abgabe, Anhebung Energiesteuer Diesel, Infrastrukturmaßnahmen Schiene + ÖPNV (z.B. Deutschlandtakt, Erhöhung GVFG/REG Mittel)
- Zusammensetzung der Fahrzeugflotten mit großer Wirkung (TCO-bedingt)
  - stark steigender Anteil EVs lässt Wirkung einiger Maßnahmen ab 2030 geringer werden
  - MIV für Nutzer von EVs billiger, weswegen der Anteil des MIV nach 2030 nicht mehr stark zurückgeht
- Geteilte Mobilitätsformen bleiben < 5%
- Verstetigung der Corona-Wirkungen:
  - Home Office + virtuelle Meetings reduzieren Aufkommen bei Pendelwege/Geschäftsreisen (-11 bis -17%)
  - Gleichzeitig Anstieg privater/touristischer Wege



Modal Split der Verkehrsleistung

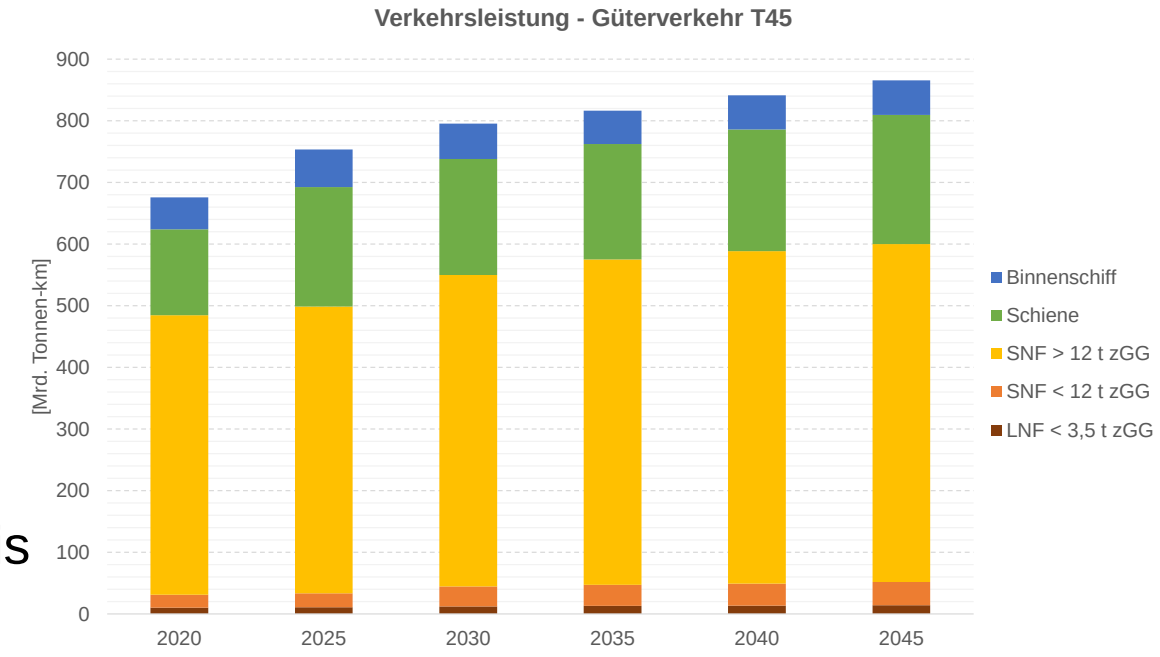
Modal Split	2020	2030	2045
Pkw	83.6%	75.4%	72.9%
Bus	2.3%	3.6%	3.7%
Schiene	5.2%	10.9%	10.3%
ÖPNV Schiene	1.7%	2.7%	2.8%
Rad	4.1%	4.3%	5.0%
Fuß	2.8%	2.3%	2.2%
Carsharing	0.3%	0.6%	1.7%
Ridepooling	0.0%	0.1%	1.4%
Bike-/Scootersharing	0.0%	0.03%	0.1%

Quelle: Fraunhofer ISI 2022

ÖPNV: Öffentlicher Personennahverkehr; GVFG/REG: Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz-Regionalisierungsmittel; TCO: Total Cost of Ownership; MIV: Motorisierter Individualverkehr; EV: Elektrofahrzeuge (Electric Vehicles)

Ergebnisse: Der Güterverkehrs in T45-Szenarien steigt bis 2045 moderat an

- Maßnahmen mit spürbaren Wirkungen
  - CO_2-Abgabe, Anhebung Energiesteuer Diesel, CO_2-differenzierte Lkw-Maut, Ausbau Schiene
- Antriebsstruktur Fahrzeugflotten auch im Güterverkehr entscheidend (TCO-bedingt)
  - Schnellere Elektrifizierung bei LNF und SNF < 12 t bewirkt leichten Shift von schweren zu leichten Nfz
- Zunahme der gesamten Verkehrsleistung bis 2045 um 28%
  - Verkehrsleistung Lkw steigt um 24% bis 2045 ggü. 2020
  - Verkehrsleistung Schiene steigt um 50%
  - Binnenschiff nur mit marginaler Zunahme auf Grund von Änderungen bei Güterarten (Rückgang Volumen bei Schüttgütern wie z.B. Kohle)



Modal Split der Verkehrsleistung

Modal Split	2020	2030	2045
LNF < 3,5 t zGG	1.5%	1.5%	1.6%
SNF < 12 t zGG	3.1%	4.1%	4.4%
SNF > 12 t zGG	67.1%	63.5%	63.3%
Schiene	20.6%	23.6%	24.2%
Binnenschiff	7.7%	7.2%	6.5%

Quelle: Fraunhofer ISI 2022

LNF: Leichte Nutzfahrzeuge; SNF: Schwere Nutzfahrzeuge; zGG: zulässiges Gesamtgewicht

Agenda

- Einführung
  - Einordnung Langfristszenarien
  - Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträgern
  - **Allgemeine Annahmen und Rahmenparameter**
  - Pkw: Annahmen und Ergebnisse
  - Nfz: Annahmen und Ergebnisse
  - Weitere Verkehrsträger
- Variationsrechnungen: *T45-RedEff* und *T45-RedGas*
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Rückfragen und Diskussion*

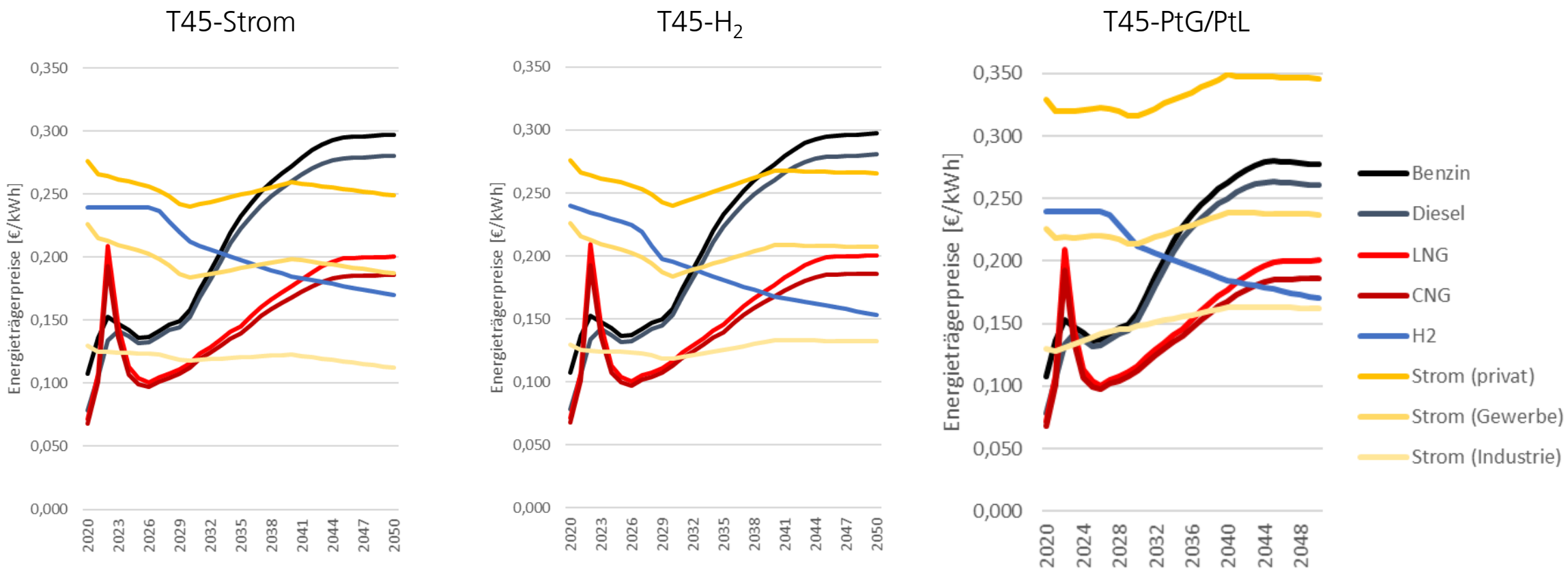
Szenariodefinition: Stellhebel stellen Maßnahmen zur Ausgestaltung dar, weniger eine Handlungsempfehlung

- **T45-Strom:** Der verstärkte Einsatz elektrischer Energie wird durch günstige Batteriepreise sowie günstige Stromtarife für Elektrofahrzeuge erreicht. Zeitgleich wird die Investition für konventionelle Fahrzeuge zusätzlich erhöht.
- **T45-H_2:** Wasserstofftechnologien für mobile Anwendungen stehen mittelfristig günstig zur Verfügung. Zeitgleich werden Investitionen für konventionelle Fahrzeuge erhöht. H_2 als Kraftstoff wird gefördert.
- **T45-PtG/PtL:** PtX und BtX stehen in großer Menge zur Verfügung und werden im Verkehrssektor mit dem Ziel der Treibhausgasminderung gefördert.

Parameter	TN-Strom & T45-Strom	TN-H2 & T45-H2	TN-PtG/PtL & T45-PtG/PtL
Preis BZ 2045	72 €/kW_{el}	54 €/kW_{el}	80 €/kW_{el}
Preis Batterie	Absinken auf 85 €/kWh bis 2045	Stagnation bei 100 €/kWh ab 2030	Stagnation bei 120 €/kWh ab 2030
Energiepreisreduktion auf verschiedene Energieträger	-5 €ct/kWh auf Strom (PV, gesteuertes Laden)	-2 €ct/kWh auf H_2	-2 €ct/kWh auf PtG/PtL
Infrastrukturaufbau Lkw	Großflächiger bedarfsgerechter Aufbau von Schnelllade- und Oberleitungs-Infrastruktur	Großflächiger bedarfsgerechter Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur	Kein großer Aufbau einer Infrastruktur für alternative Antriebe

PtX: Kombination aus Power-to-Gas (PtG) und Power-to-Liquid (PtL); BtX: Kombination aus Biogas und Biomass-to-Liquid (BtL); PV: Photovoltaik

Szenariodefinition: Synfuel-Beimischung und CO_2-Abgabe führen zu steigenden Preisen für konventionelle Kraftstoffe



LNG: Liquefied Natural Gas; CNG: Compressed Natural Gas; H2: Wasserstoff

Szenariodefinition: Die Szenarien unterscheiden sich bei Batterie- und Brennstoffzellenpreisen

- **T45-Strom:** Deutlich fallende Batteriepreise unterstützen die Verbreitung der Elektromobilität
- **T45-PtG/PtL:** Batteriepreise fallen moderater als im Szenario TN-Strom; ab 2030 werden keine Preisreduktionen bei Batterie und Brennstoffzelle unterstellt
- **T45-H_2:** Bis 2030 wird verstärkt auf Batterietechnologie gesetzt, anschließend stehen günstige Brennstoffzellenfahrzeuge in großer Stückzahl zur Verfügung, so dass die Preise bis 2045 deutlicher sinken als in den anderen Szenarien

Batteriepreise im Verkehr exkl. MwSt.

		Einheit	2020	2030	2045
T45-Strom	BEV	EUR/kWh	240	100	85
	PHEV	EUR/kWh	264	110	93
T45-PtG/PtL	BEV	EUR/kWh	240	120	120
	PHEV	EUR/kWh	264	132	132
T45-H_2	BEV	EUR/kWh	240	100	100
	PHEV	EUR/kWh	264	110	110

Brennstoffzellenpreise im Verkehr exkl. MwSt.

	Einheit	2020	2030	2045
T45-Strom	EUR/kW	234	80	72
T45-PtG/PtL	EUR/kW	234	80	80
T45-H_2	EUR/kW	234	78	54

Quellen: Lutsey (2017): Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. In: Energies 10 (9), S. 1314. DOI: 10.3390/en10091314.
Zapf et al. (2019): Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden
Mottschall et al. (2019): Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050 - Abschlussbericht. Abschlussbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Öko-Institut. Dessau-Roßlau.

Agenda

- Einführung
  - Einordnung Langfristszenarien
  - Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträgern
  - Allgemeine Annahmen und Rahmenparameter
  - **Pkw: Annahmen und Ergebnisse**
  - Nfz: Annahmen und Ergebnisse
  - Weitere Verkehrsträger
- Variationsrechnungen: *T45-RedEff* und *T45-RedGas*
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Rückfragen und Diskussion*

Annahmen: Deutliche Anpassungen der politischen Rahmenbedingungen beschleunigen den Flottenumbau

Techno-ökonomische Annahmen (z.B. zu Fahrzeuginvestitionen, etc.) analog zu TN-Szenarien

Anpassungen über neue/verlängerte Politikmaßnahmen

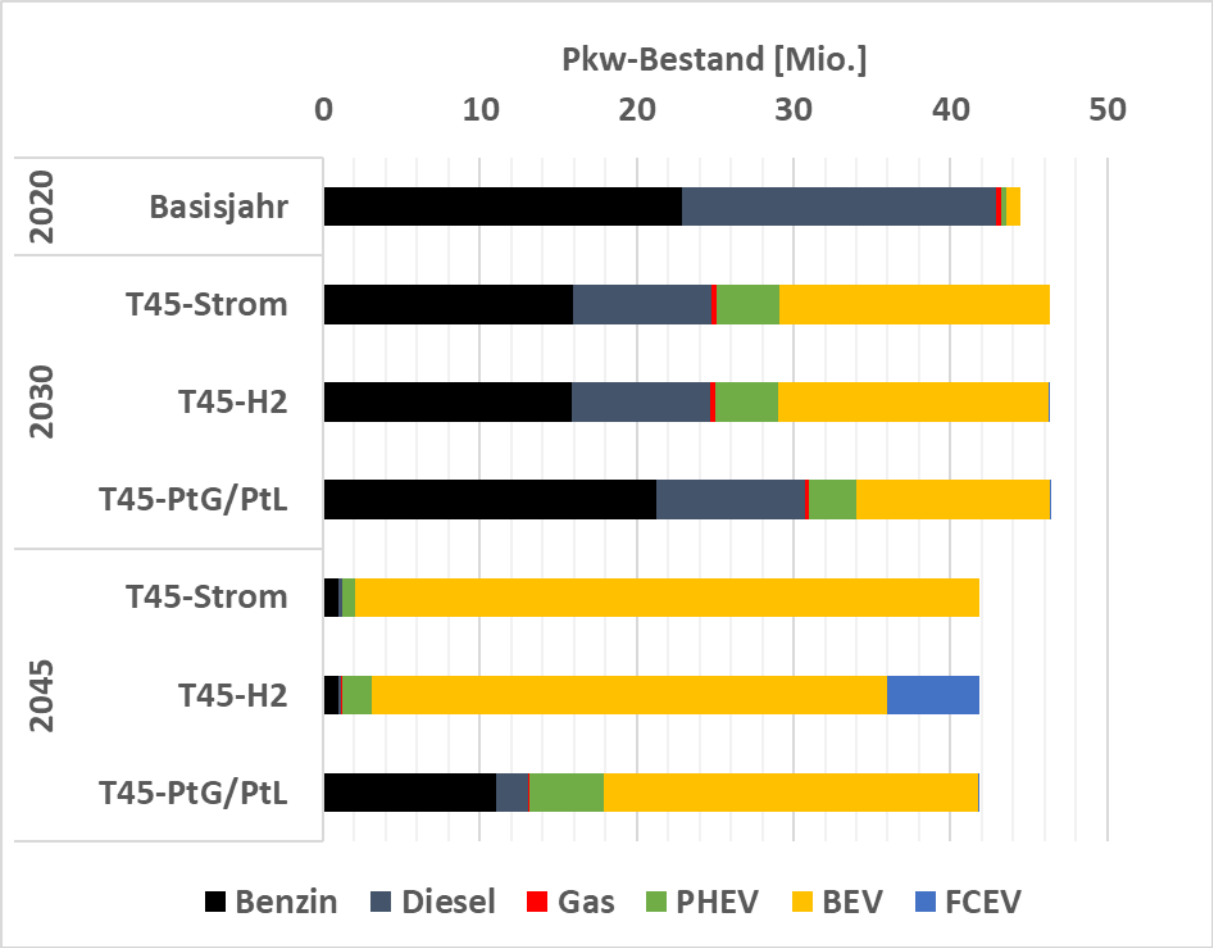
- **Energiesteuer Diesel angehoben** basierend auf CO_2-Gehalt [ETD, Fit-for-55] → 2022 auf 59,63€ct pro Liter und ab 2023 auf 72,21€ct pro Liter
- Reduktion **EEG-Umlage auf 0€ct/kWh** ab 2023 [Koalitionsvertrag]
- **Verlängerung Innovationsprämie und Umweltprämie** bis 2025 mit Auflagen für PHEV (mind. 50% el. FA) [Koalitionsvertrag]
- Verlängerung **Dienstwagenbesteuerung** E-Pkw bis 2030 mit Auflagen für PHEV (mind. 50% el. FA) [Koalitionsvertrag]
- **Flottengrenzwertverschärfung** [Fit-for-55] → in beschränkte Verfügbarkeit aufgenommen
- **Restwertverfall für Verbrenner** als Konsequenz von Einfuhrbeschränkungen und Auflagen für Verbrenner startend ab 2025 und absinkend auf 0 bis 2035

Verhaltensanpassungen

- **Reduktion des Verkehrsaufkommens** aufgrund von reduzierten Dienstreisen (17-24%), Homeoffice (11-17%), geteilte Fahrzeugnutzung *(1,5 (2022)...5-10%(2050))* → untere Werte für weitere Rechnungen angenommen

ETD: Energy Taxation Directive
el. FA: elektrischer Fahranteil

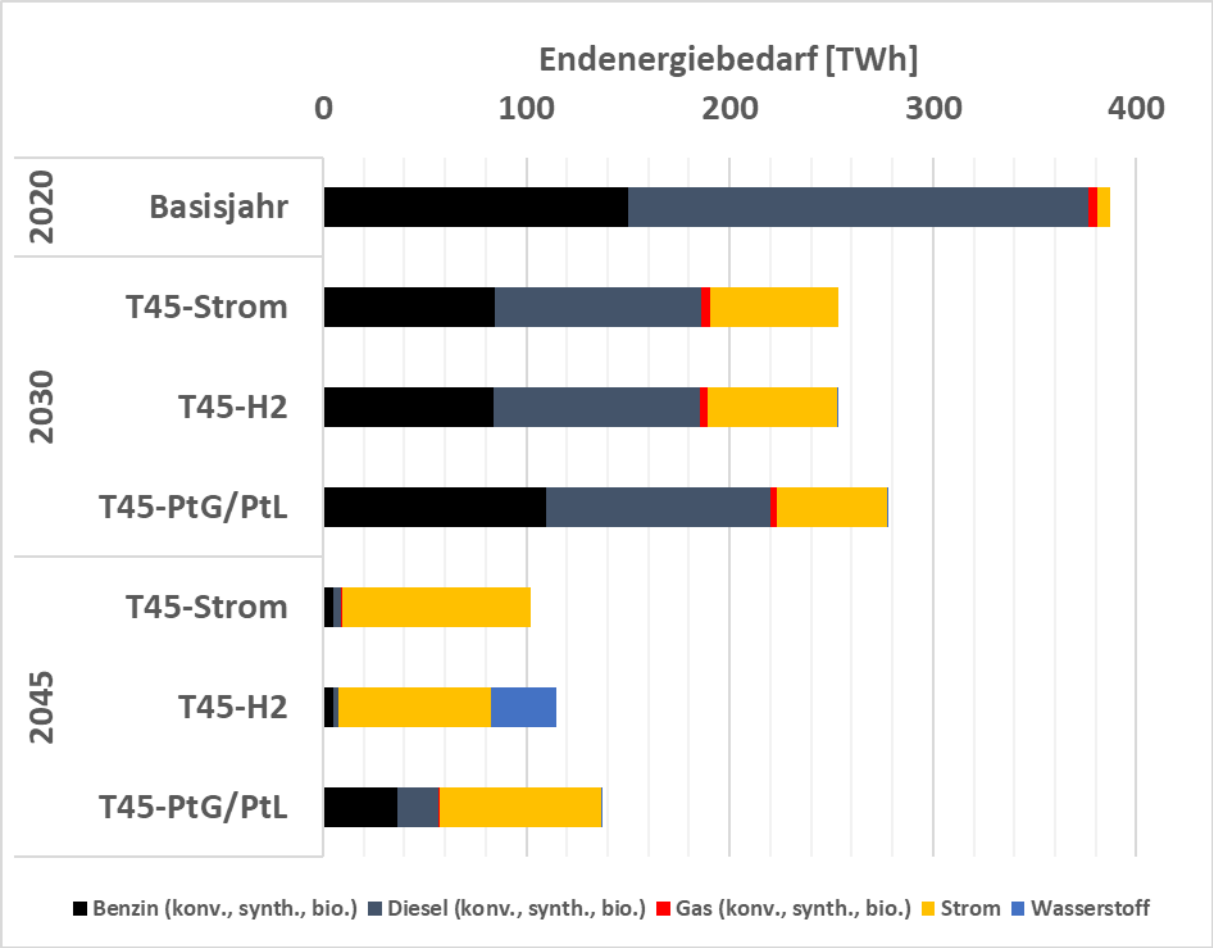
Ergebnisse: In allen Szenarien spielen Elektrofahrzeuge im Pkw-Segment eine entscheidende Rolle



- Starke Durchdringung von reinen Elektrofahrzeugen (BEV) in allen Szenarien bis 2030:
  - T45-Strom: 17 Mio. BEV und 4 Mio. PHEV
  - T45-H_2: 17 Mio. BEV und 4 Mio. PHEV
  - T45-PtG/PtL: 12 Mio. BEV und 3 Mio. PHEV
  - → Deutlich ambitionierter als TN-Szenarien (TN-Strom: 11 Mio. EV)
  - → Übererfüllung des Ziels von 15 Mio. EV notwendig, um Treibhausgasminderungsziel zu erreichen
- Moderate Differenzierung der Szenarien bis 2045:
  - BEV dominieren in allen Szenarien
    - T45-Strom: 40 Mio. BEV und 1 Mio. PHEV
    - T45-H_2: 33 Mio. BEV und 1 Mio. PHEV
    - T45-PtG/PtL: 24 Mio. BEV und 4 Mio. PHEV
  - FCEV-Infrastruktur steht nur im Szenario T45-H_2 zur Verfügung
    - T45-H_2: 6 Mio. FCEV
    - T45-Strom und T45-PtG/PtL: FCEV in minimalen Stückzahlen → Realisierung wäre sehr unwahrscheinlich
  - Kleine Restbestände an Verbrennern in den Szenarien T45-Strom und T45-H_2 nur mit Verbot vermeidbar; 13 Mio. Fahrzeuge im Szenario T45-PtG/PtL

BEV: Battery Electric Vehicle, PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle, FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle

Ergebnisse: Der Endenergiebedarf nimmt deutlich ab, Unterschiede durch Effizienz der Antriebsalternativen



- Deutliche Reduktion des Gesamtenergiebedarfs:

Szenario	2030	2045
T45-Strom	254 TWh (-35%)	102 TWh (-74%)
T45-H_2	253 TWh (-35%)	115 TWh (-70%)
T45-PtG/PtL	277 TWh (-28%)	138 TWh (-64%)

- Strom in allen Szenarien von hoher Bedeutung:

Szenario	2030	2045
T45-Strom	63 TWh	93 TWh
T45-H_2	63 TWh	75 TWh
T45-PtG/PtL	54 TWh	80 TWh

- Einige (Rest-) Mengen biogener oder synthetischer kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe werden benötigt:

Szenario	2030	2045
T45-Strom	190 TWh	9 TWh
T45-H_2	189 TWh	8 TWh
T45-PtG/PtL	223 TWh	57 TWh

Agenda

- Einführung
  - Einordnung Langfristszenarien
  - Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträgern
  - Allgemeine Annahmen und Rahmenparameter
  - Pkw: Annahmen und Ergebnisse
  - **Nfz: Annahmen und Ergebnisse**
  - Weitere Verkehrsträger
- Variationsrechnungen: *T45-RedEff* und *T45-RedGas*
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Rückfragen und Diskussion*

Annahmen: Deutliche Anpassungen der politischen Rahmenbedingungen beschleunigen den Flottenumbau

Techno-ökonomische Annahmen (z.B. zu Fahrzeuginvestitionen, etc.) analog zu TN-Szenarien

Anpassungen über neue/verlängerte Politikmaßnahmen

- **Energiesteuer Diesel** anheben basierend auf CO_2-Gehalt [ETD, Fit-for-55] → 2022 auf 59,63€ct pro Liter und ab 2023 auf 72,21€ct pro Liter
- Reduktion **EEG-Umlage auf 0€ct/kWh** ab 2023 [Koalitionsvertrag]
- **Subvention der Mehrkosten** beim Kauf für elektrifizierte Nutzfahrzeuge inklusive FCEV mit 80% bis 2030 [KsNI]
- **Verlängerung der Mautbefreiung** für elektrifizierte Nutzfahrzeuge inklusive PHEV und FCEV bis 2030

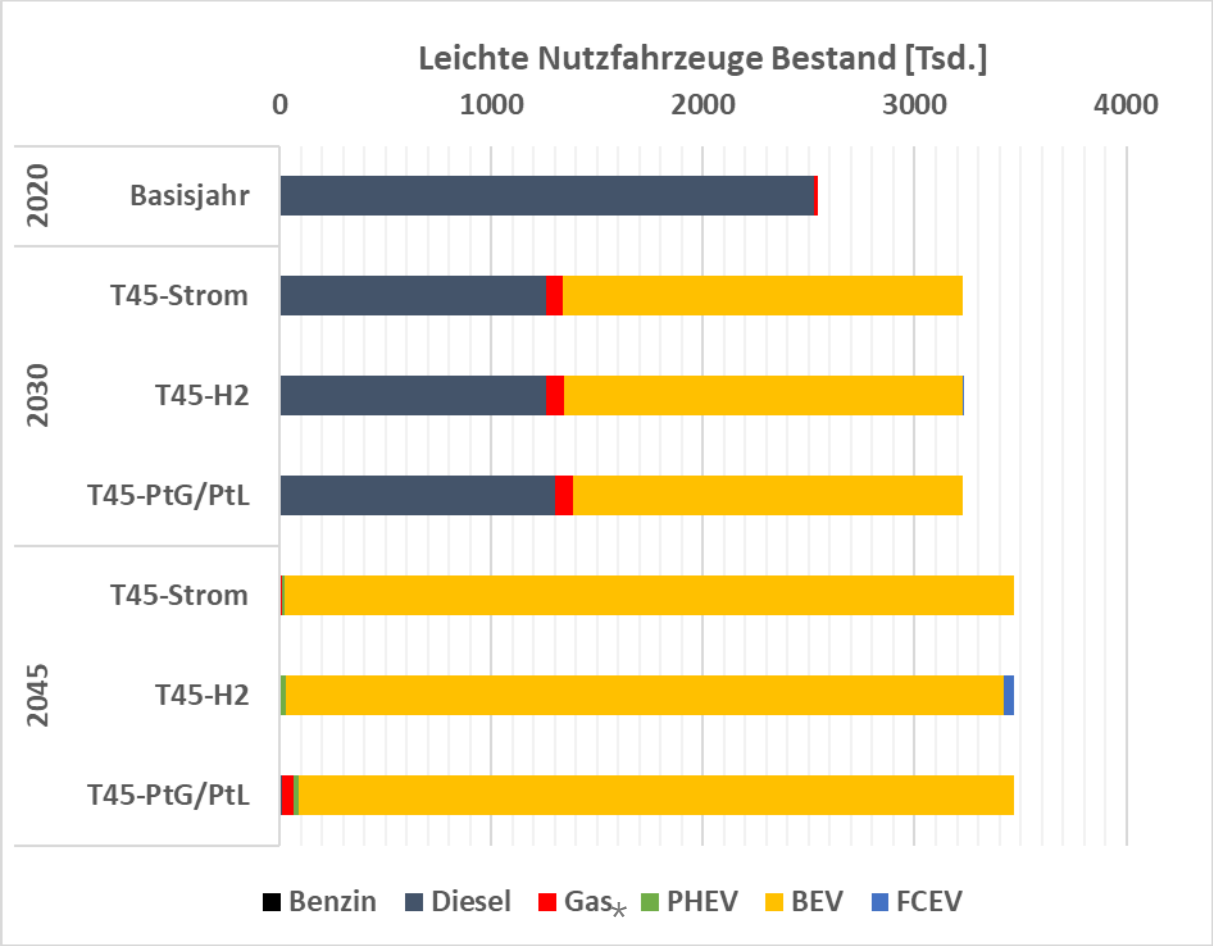
Infrastruktur

- T45-Strom: Aufbau von **Oberleitung und MCS-Infrastruktur**, so dass langfristig jedes Fahrzeug, falls notwendig, einmal täglich geladen werden kann und die Reichweite damit verdoppelt wird; **keine Wasserstofftankstelleninfrastruktur**
- T45-H_2: **Wasserstofftankstellen** erlauben ab 2030 uneingeschränkten Betrieb auf der Langstrecke, **keine öffentliche Ladeinfrastruktur**
- T45-PtG/PtL: **keine** zusätzliche öffentliche Tank- oder Ladeinfrastruktur

Anm.: Die Annahmen bleiben hier bewusst je Szenario partiell hinter dem aktuellen Vorschlag für die Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR) zurück, der den zeitgleichen Aufbau von Wasserstofftankstellen und öffentlicher Ladeinfrastruktur vorsieht. Ziel ist es, eine möglichst breite Bandbreite an Szenarien zu zeigen.

ETD: Energy Taxation Directive; PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle, FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle; MCS: Megawatt Charging

Ergebnisse: Leichte Nutzfahrzeuge sind, aufgrund der hohen aber regelmäßigen Fahrleistung, stark elektrifiziert



- Batterieelektrische Fahrzeuge dominieren in allen Szenarien:

Bestand (NZL)	2020	2030	2045
T45-Strom	0% (0%)	59% (91%)	100% (100%)
T45-H_2	0% (0%)	58% (90%)	98% (98%)
T45-PtG/PtL	0% (0%)	57% (90%)	98% (99%)

- Wasserstoff, der im Szenario T45-H_2 zur Verfügung stehen würde, wird kaum genutzt
- Bereits 2030 kann die Hälfte der Fahrleistung elektrisch erbracht werden (inkl. Brennstoffzelle):

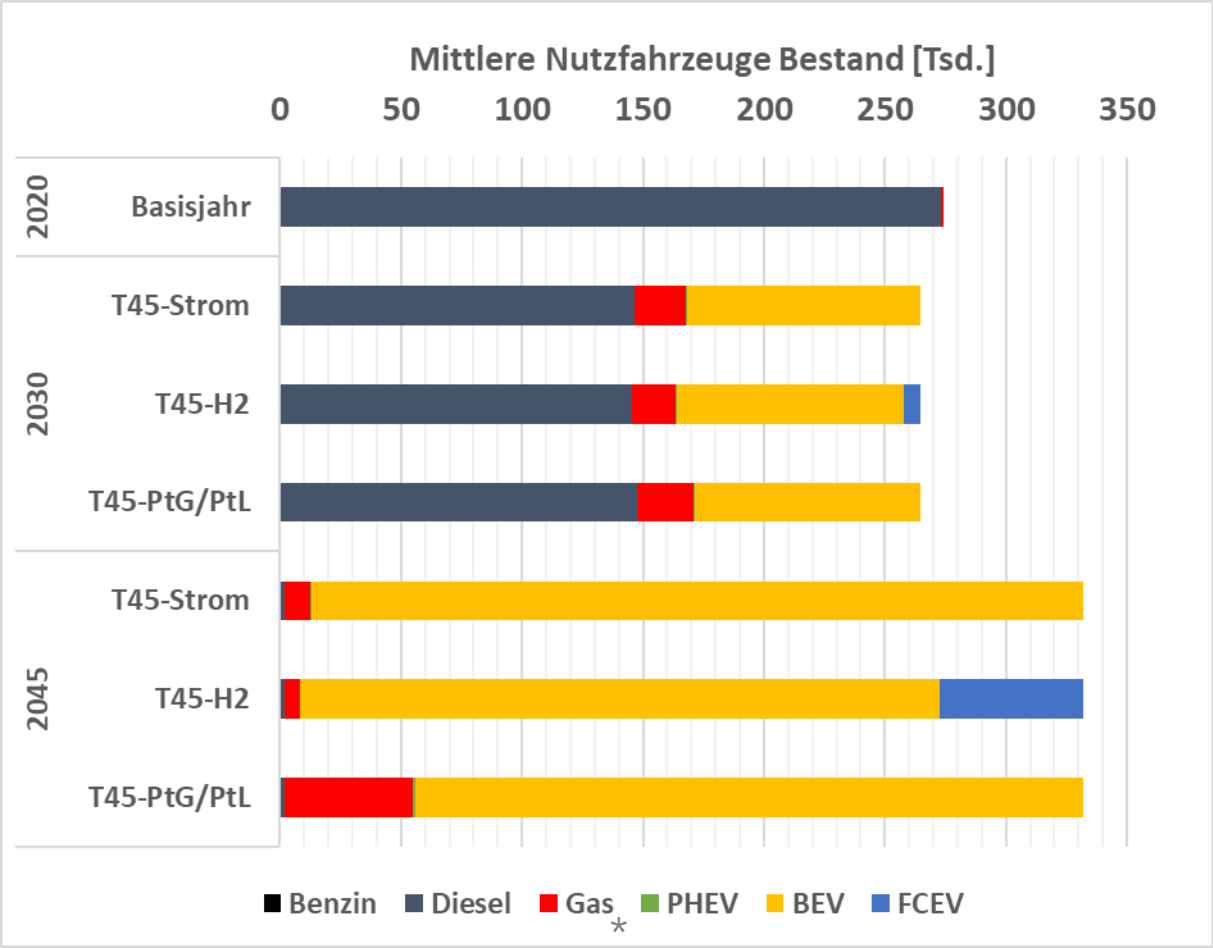
	2020	2030	2045
T45-Strom	0%	55%	100%
T45-H_2	0%	54%	100%
T45-PtG/PtL	0%	53%	98%

- Anteil Gasfahrzeuge 2030 könnte aufgrund der aktuellen Weltlage geringer ausfallen/wegfallen.

BEV: Battery Electric Vehicle, PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle, FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle

*Gas ist gemäß der Annahmen langfristig günstiger als Diesel. Höhere Investitionen und zu Beginn geringere Effizienz können bei hoher Laufleistung ausgeglichen werden. Das Szenario T45-RedGas beschreibt ein Szenario ohne relevanten Gaseinsatz im Verkehr.

Ergebnisse: Mittlere Nutzfahrzeuge werden ebenfalls in allen Szenarien zu erheblichen Teilen elektrifiziert



- Batterieelektrische Fahrzeuge dominieren in allen Szenarien:

Bestand (NZL)	2020	2030	2045
T45-Strom	0% (0%)	37% (85%)	96% (98%)
T45-H_2	0% (0%)	35% (73%)	80% (70%)
T45-PtG/PtL	0% (0%)	35% (73%)	83% (87%)

- Wasserstoff wird im Szenario T45-H_2 langfristig für schwer zu elektrifizierende Fahrzeuge genutzt und erreicht 2045 einen Bestandsanteil von 18 %
- Bereits 2030 ist etwas ein Drittel der Fahrleistung elektrifiziert (inkl. Brennstoffzelle):

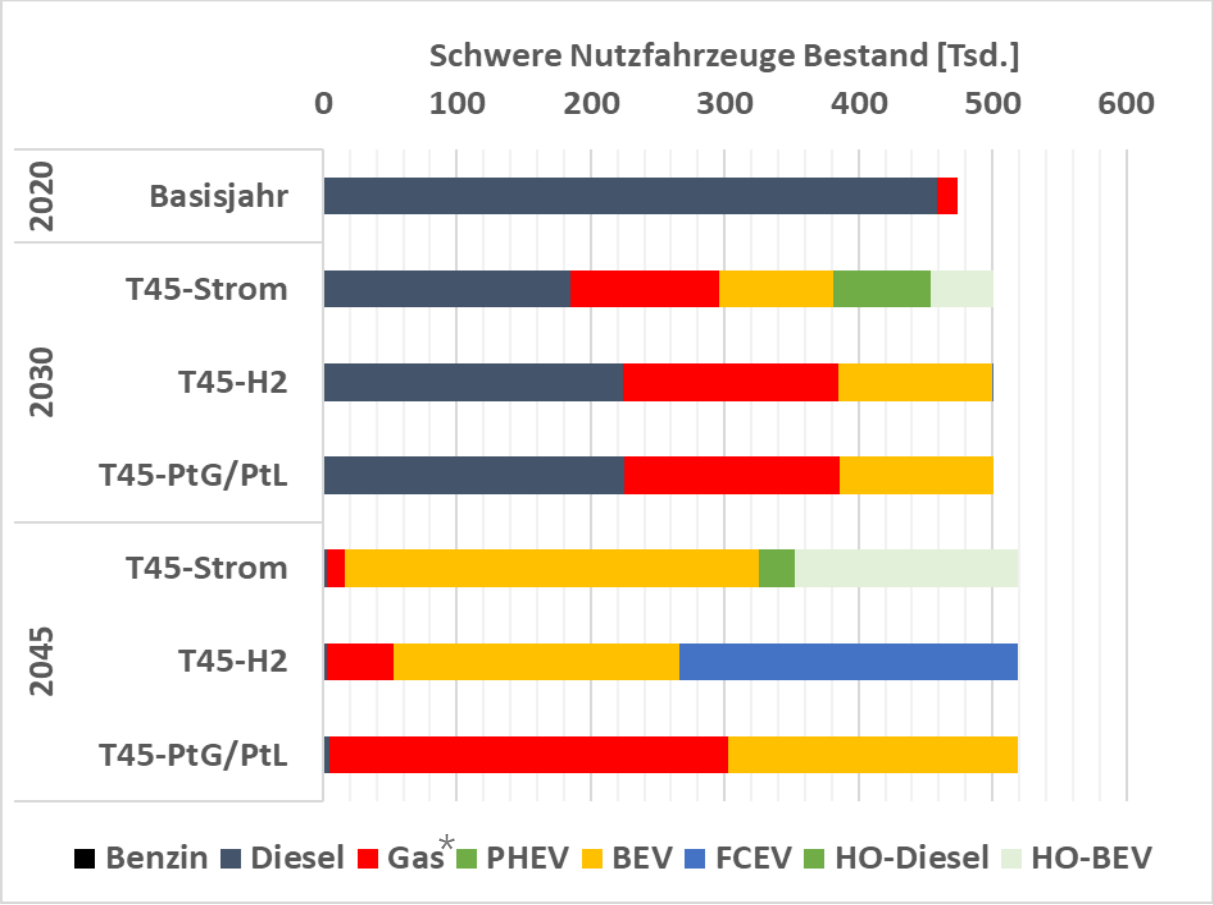
	2020	2030	2045
T45-Strom	0 %	32%	96%
T45-H_2	0 %	34%	97%
T45-PtG/PtL	0 %	30%	80%

- Anteil Gasfahrzeuge 2030 könnte aufgrund der aktuellen Weltlage geringer ausfallen/wegfallen.

BEV: Battery Electric Vehicle, PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle, FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle

*Gas ist gemäß der Annahmen langfristig günstiger als Diesel. Höhere Investitionen und zu Beginn geringere Effizienz können bei hoher Laufleistung ausgeglichen werden. Das Szenario T45-RedGas beschreibt ein Szenario ohne relevanten Gaseinsatz im Verkehr.

Ergebnisse: Bei schweren Nutzfahrzeugen entscheidet die verfügbare Infrastruktur maßgeblich die Antriebswahl



BEV: Battery Electric Vehicle, PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle, FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle, HO-Diesel: Hybrid-Oberleitungs-Lkw mit Diesel; HO-BEV: Hybrid-Oberleitungs-Lkw mit Batterie

- Batterieelektrische Fahrzeuge (inkl. HO-BEV) stellen in allen Szenarien für große Teile der Flotte die kosteneffizienteste Lösung dar, falls die Reichweite / Infrastruktur ausreichend ist:

Bestand (NZL)	2020	2030	2045
T45-Strom	0% (0%)	26% (54%)	92% (99%)
T45-H_2	0% (0%)	23% (40%)	41% (35%)
T45-PtG/PtL	0% (0%)	23% (39%)	42% (47%)

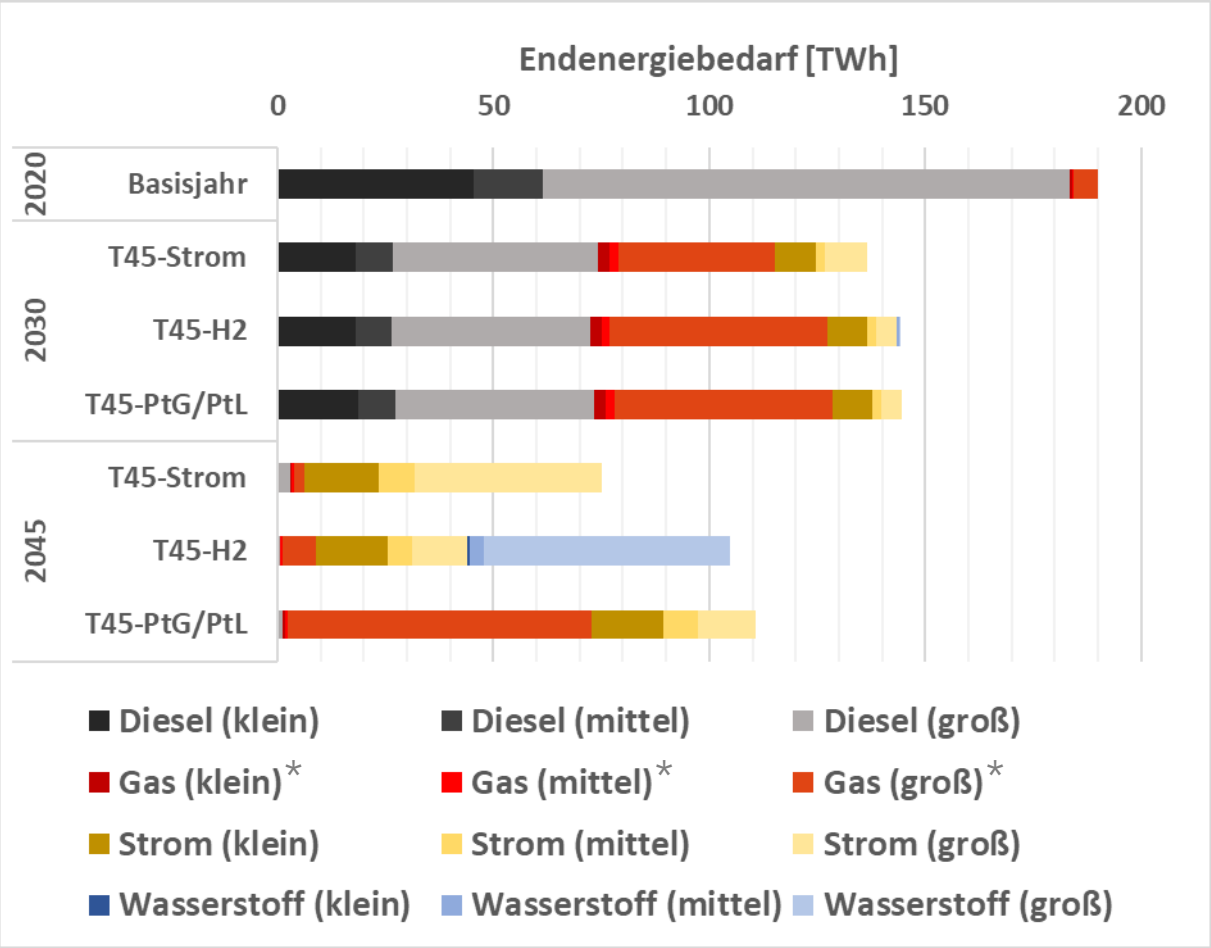
- Wasserstoff wird im Szenario T45-H_2 langfristig für Strecken außerhalb der Reichweite des BEV genutzt und stellt 2045 die Hälfte der Flotte.
- Das Ziel, bis 2030 ein Drittel der Fahrleistung zu elektrifizieren, wird in allen Szenarien verfehlt:

	2020	2030	2045
T45-Strom	0%	20% (34% - 2032)	94%
T45-H_2	0%	11% (34% - 2038)	91%
T45-PtG/PtL	0%	11% (-)	30%

- Anteil Gasfahrzeuge 2030 könnte aufgrund der aktuellen Weltlage geringer ausfallen/wegfallen.

*Gas ist gemäß der Annahmen langfristig günstiger als Diesel. Höhere Investitionen und zu Beginn geringere Effizienz können bei hoher Laufleistung ausgeglichen werden. Das Szenario T45-RedGas beschreibt ein Szenario ohne relevanten Gaseinsatz im Verkehr.

Ergebnisse: Der Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge variiert zwischen den Szenarien, abhängig von den Antriebsalternativen



- Reduktion des Gesamtenergiebedarfs:

Szenario	2030	2045
T45-Strom	136 TWh (-28%)	75 TWh (-60%)
T45-H_2	144 TWh (-24%)	104 TWh (-45%)
T45-PtG/PtL	145 TWh (-24%)	112 TWh (-41%)

- Strom in allen Szenarien von hoher Bedeutung:

Szenario	2030	2045
T45-Strom	21 TWh	69 TWh
T45-H_2	16 TWh	35 TWh
T45-PtG/PtL	16 TWh	36 TWh

- Einige (Rest-) Mengen biogener oder synthetischer kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe werden benötigt:

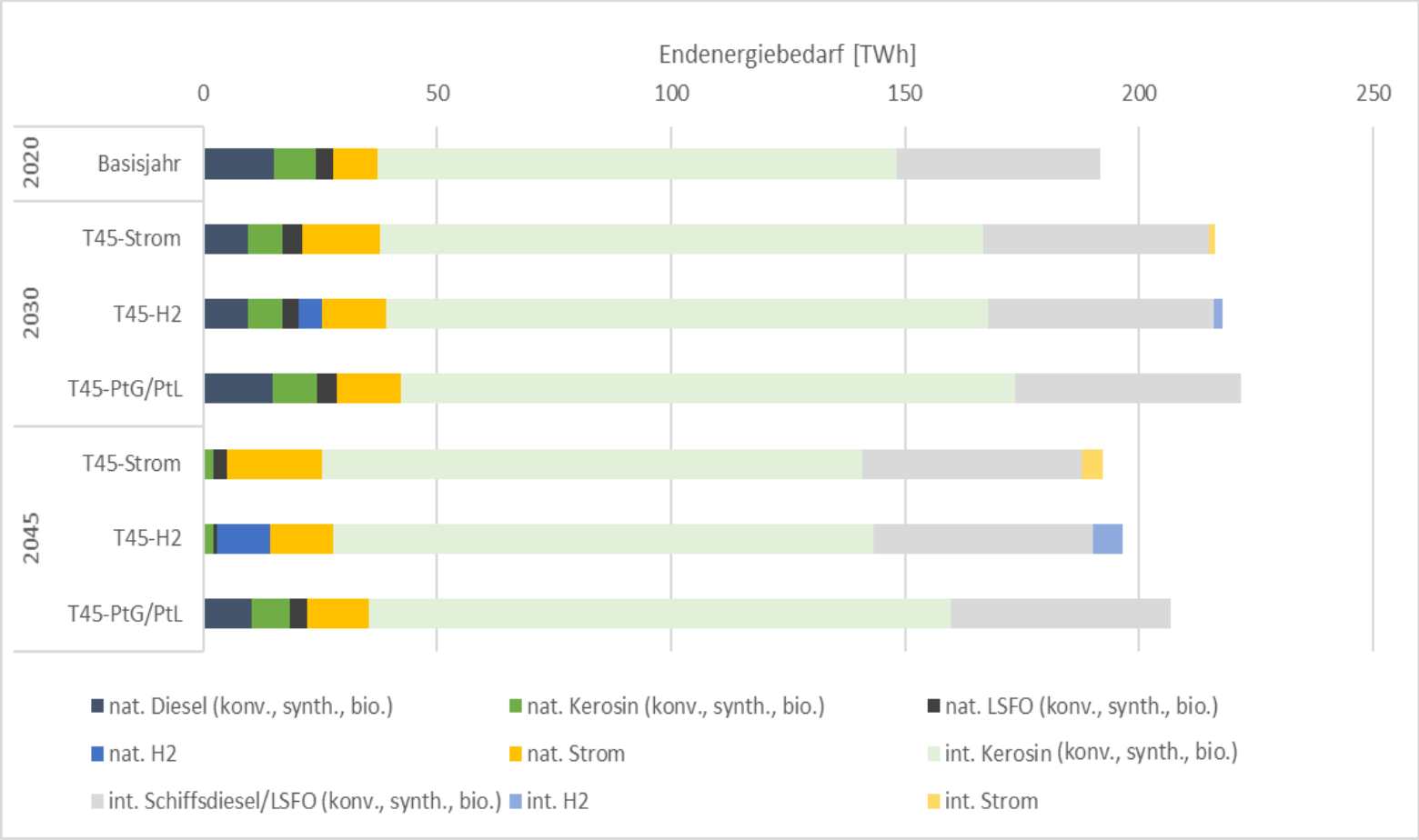
Szenario	2030	2045
T45-Strom	115 TWh	6 TWh
T45-H_2	127 TWh	9 TWh
T45-PtG/PtL	129 TWh	76 TWh

*Gas ist gemäß der Annahmen langfristig günstiger als Diesel. Höhere Investitionen und zu Beginn geringere Effizienz können bei hoher Laufleistung ausgeglichen werden. Das Szenario T45-RedGas beschreibt ein Szenario ohne relevanten Gaseinsatz im Verkehr.

Agenda

- Einführung
  - Einordnung Langfristszenarien
  - Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträgern
  - Allgemeine Annahmen und Rahmenparameter
  - Pkw: Annahmen und Ergebnisse
  - Nfz: Annahmen und Ergebnisse
  - **Weitere Verkehrsträger**
- Variationsrechnungen: *T45-RedEff* und *T45-RedGas*
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Rückfragen und Diskussion*

Ergebnisse: Bei den weiteren Verkehrsträgern gibt es kaum Änderungen zwischen den T45- und TN-Szenarien



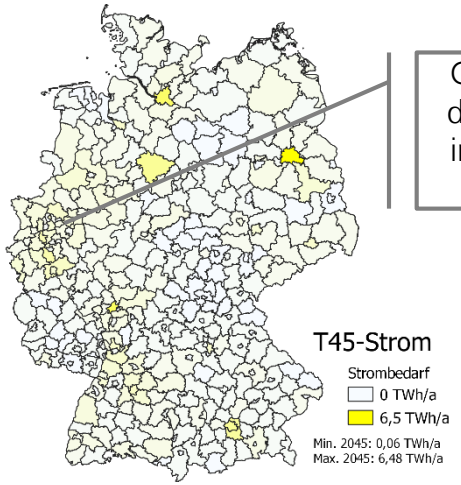
Endenergiebedarf der Verkehrsträger Bus, Bahn, Binnenschiff-, Hochseeschiff- und Luftverkehr

- **Bus- und Schienenverkehr** mit früherer Nachfrage nach alternativen Antrieben als in TN-Szenarien und **CO_2-frei 2045**
- **Innereuropäischer Luftverkehr** (bis 1000km) bis **2045** mit **alternativen Antrieben** in **T45-Strom** und **T45-H_2**

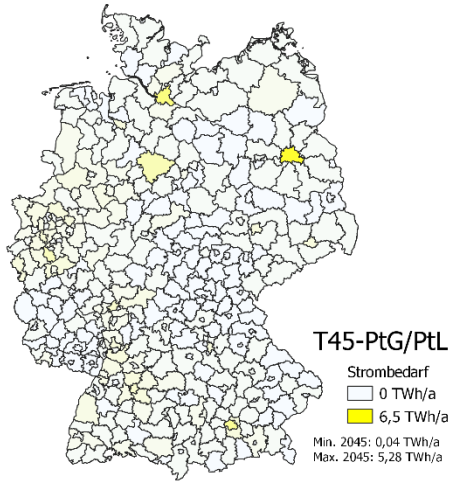
→ Für Emissionsbilanzierung relevanter Teil fast vollständig dekarbonisiert bis 2045

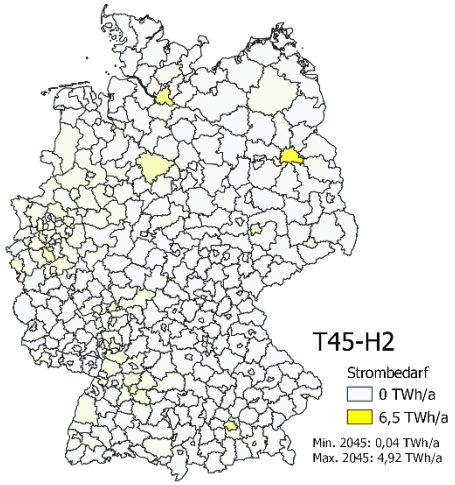
→ ABER: Bestandserneuerung bei Schiffen und Flugzeugen zu langsam und bis 2045 nicht mehr möglich ohne Verpflichtungen zu Neubeschaffung (25-50 Jahre Nutzungsdauer)

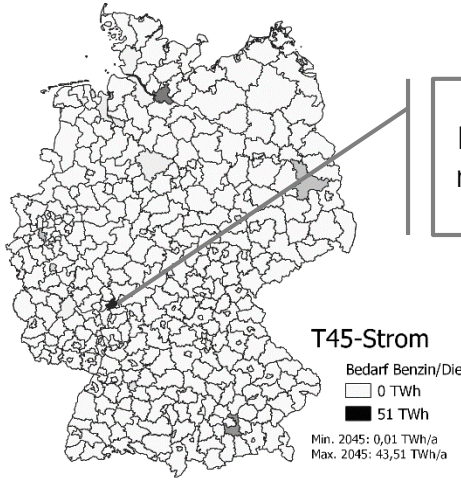
Ergebnisse: Hoher Energiebedarf in dicht besiedelten Gebieten; Kraftstoffe langfristig vor allem an (Flug-) Häfen



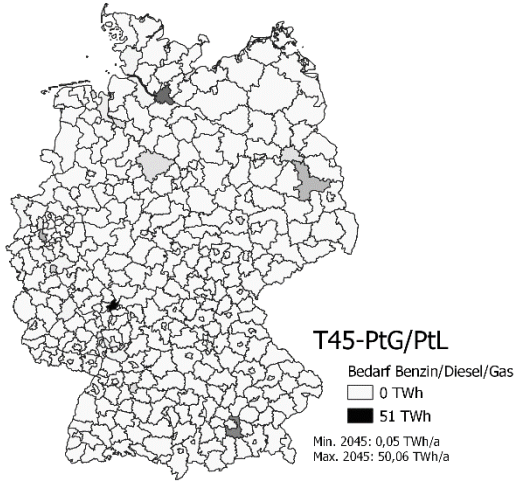
Generelle Zunahme der Stromnachfrage in dicht besiedelten Regionen

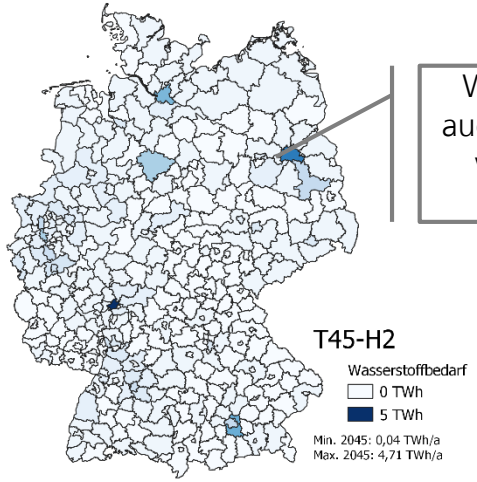






Flughafen Frankfurt bis 2045 mit Nachfrage PtL-Kraftstoffe





Wasserstoffbedarf auch in Großstädten, v.a. wegen Lkw-Lieferverkehr

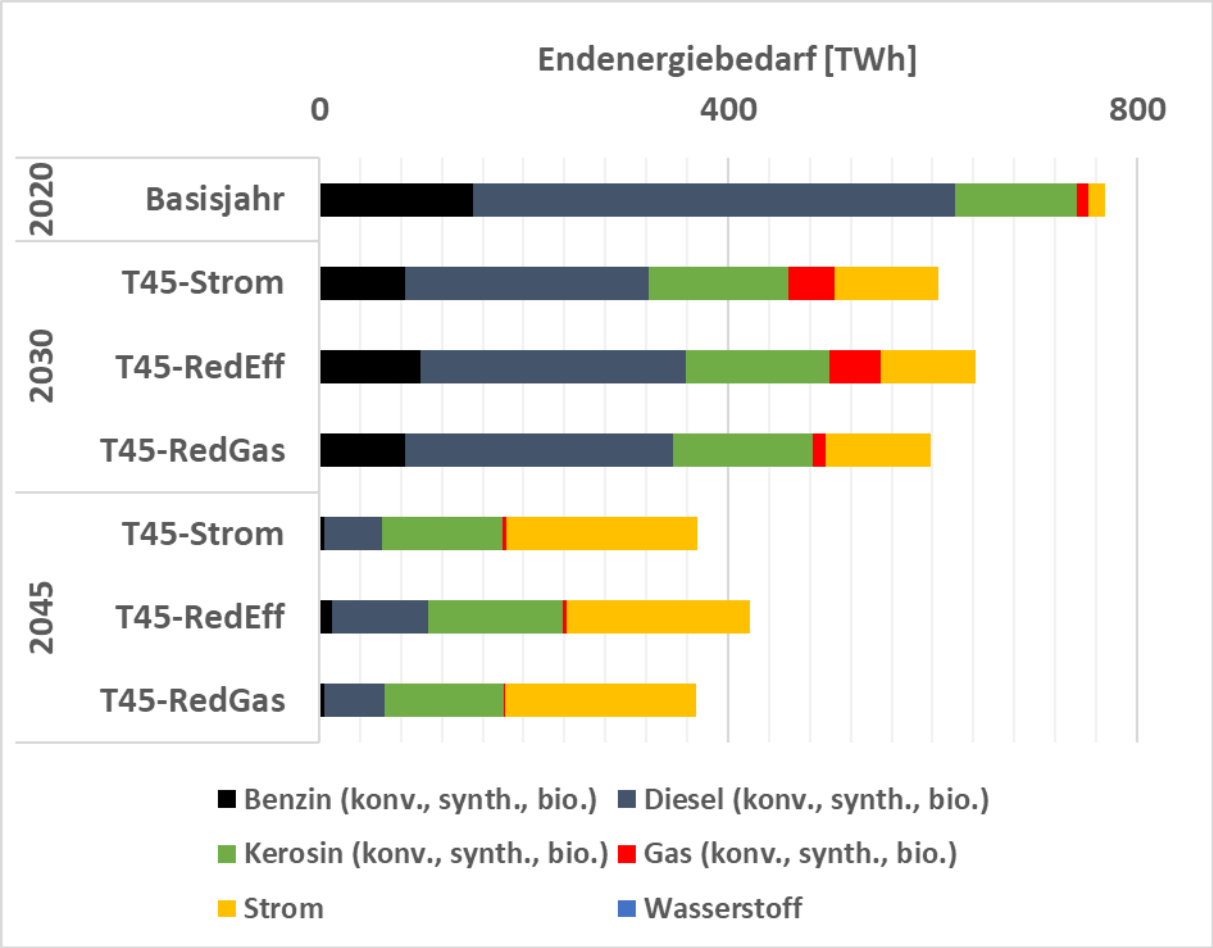
Kartenquelle: © GeoBasis-DE / BKG 2020

Stromnachfrage
Wasserstoffnachfrage
Benzin/Diesel-Nachfrage

Agenda

- Einführung
  - Einordnung Langfristszenarien
  - Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträgern
  - Allgemeine Annahmen und Rahmenparameter
  - Pkw: Annahmen und Ergebnisse
  - Nfz: Annahmen und Ergebnisse
  - Weitere Verkehrsträger
- **Variationsrechnungen: *T45-RedEff* und *T45-RedGas***
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Rückfragen und Diskussion*

Ergebnisse: T45-RedEff weist einen deutlich höheren Endenergiebedarf aus, T45-RedGas reduziert den Gasbedarf

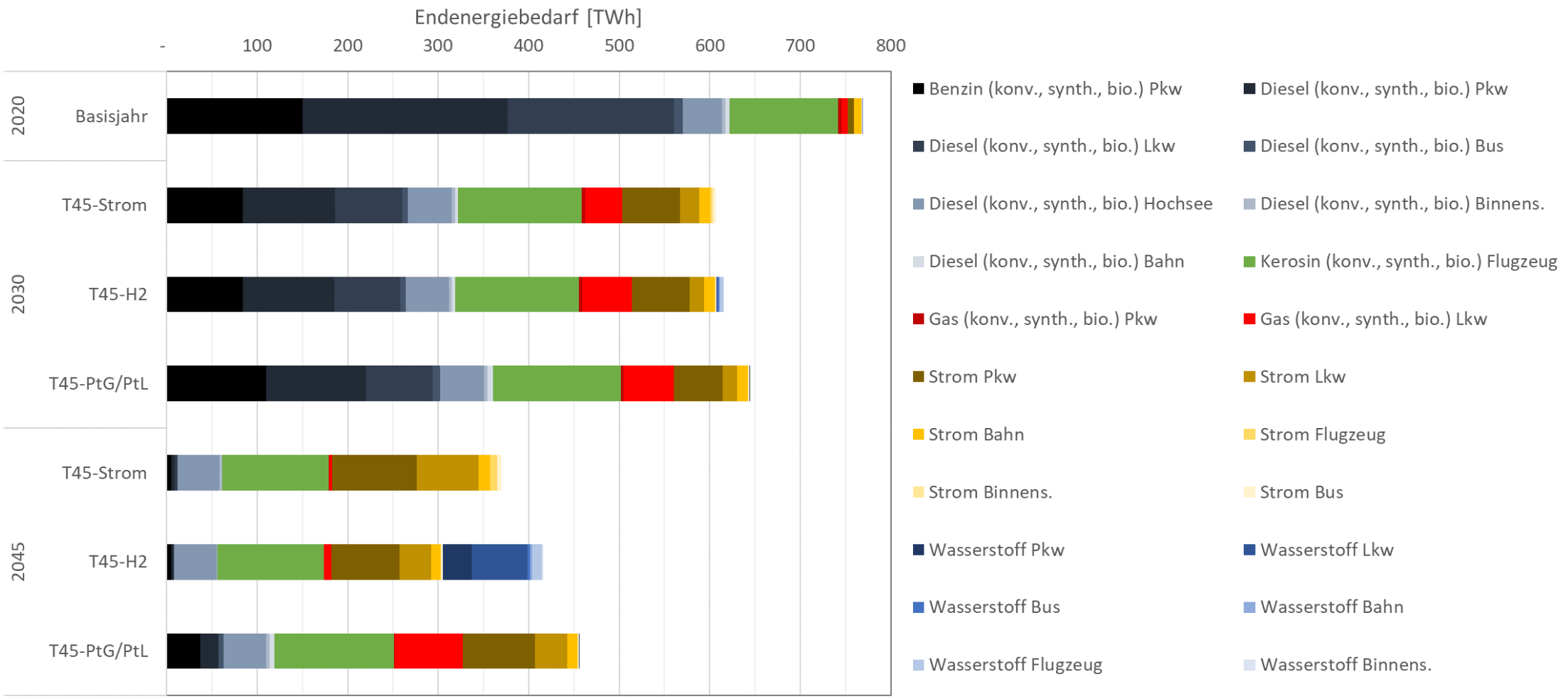


- Szenario T45-RedEff:
  - Situation: Modellierung sieht durchaus ambitionierte Effizienzsteigerungen vor
  - Anpassung: T45-RedEff basiert auf T45-Strom, halbiert jedoch die Effizienzsteigerungen
  - Ergebnis: Energienachfrage im Verkehr steigt im Vergleich zu T45-Strom um 6% (2030) bzw. 14% (2045) an
  - Ergebnis: Besonders deutliche Anstiege insbesondere bei Diesel- und Kerosinkraftstoffen für die Schifffahrt und den Luftverkehr
  - Ergebnis: Stromnachfrage bleibt weitgehend konstant
- Szenario T45-RedGas:
  - Situation: Gas spielt heute im Verkehr eine untergeordnete Rolle. Der angenommene Rückgang des Gaspreises führt in den Hauptszenarien dazu, dass Gas für Lkw als Brückentechnologie nutzt. Es ist unsicher, ob Kund:innen die Fahrzeuge noch nutzen möchten
  - Anpassung: Gas-Nutzfahrzeuge werden bis 2030 sukzessive von den Herstellern aus dem Sortiment genommen, der Infrastrukturausbau gestoppt
  - Ergebnis: Erdgas wird nicht als Brückentechnologie eingesetzt (2030: -72% ggü T45-Strom)

Agenda

- Einführung
  - Einordnung Langfristszenarien
  - Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträgern
  - Allgemeine Annahmen und Rahmenparameter
  - Pkw: Annahmen und Ergebnisse
  - Nfz: Annahmen und Ergebnisse
  - Weitere Verkehrsträger
- Variationsrechnungen: *T45-RedEff* und *T45-RedGas*
- **Zusammenfassung und zentrale Botschaften**
- *Rückfragen und Diskussion*

Zusammenfassung: Die T45-Szenarien auf einen Blick zeigen die Variationen vor allem im Lkw-Bereich



Zusammenfassung: Die Ziele im Verkehr werden nur teilweise erreicht

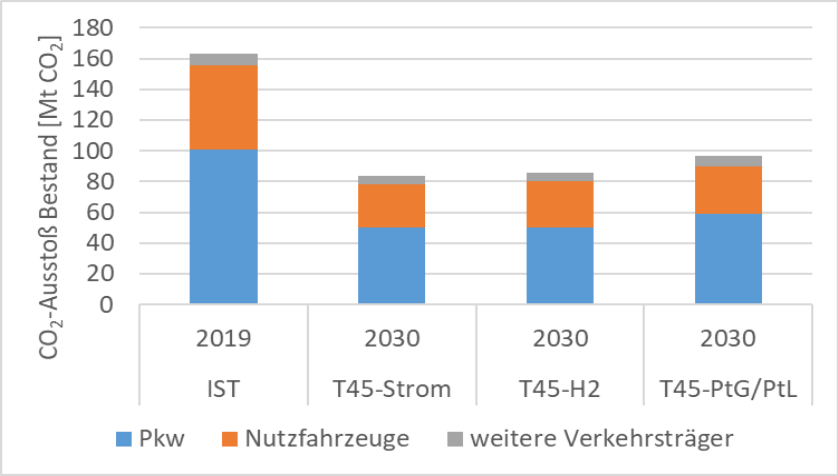
✔ **Pkw 2030:** 15 Mio. BEV, v.a. wegen Prämie und Flottengrenzwerten

✘ **Lkw 2030:** 33% elektrische Fahrleistung schwere Nutzfahrzeuge (2032 in T45-Strom erreicht)

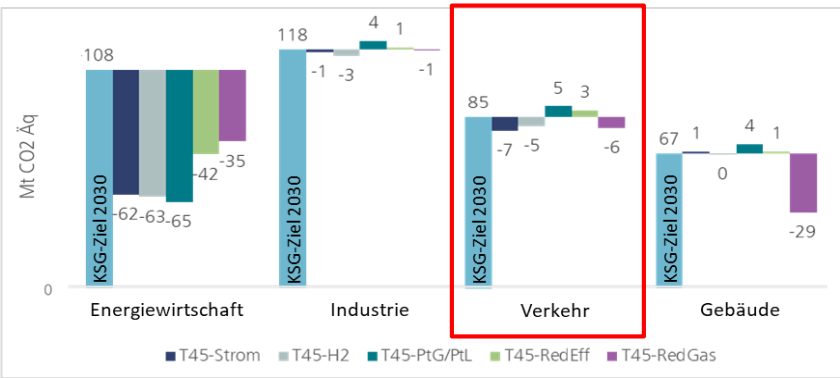
✔ **CO_2-Minderung Verkehr 2030:** -48% CO_2 2030 vs. 1990 / 85Mt CO_2

	Jahr	Pkw	Nfz	Weitere	Gesamt (ohne Beimischung)	Gesamt (mit Beimischung)
IST	2019	100	55	7	163	163
T45-Strom	2030	50	28	6	84	78
T45-H_2	2030	50	30	5	85	80
T45-PtG/PtL	2030	59	31	7	97	90

✘ **CO_2-frei 2045:** kleine Restmengen Flüssigkraftstoffe in Pkw und Lkw, wenn bspw. für Pkw kein Verbrennerverbot beim Verkauf ab 2031 oder im Bestand ab 2045
→ ggfs. über Zusatzmengen aus Produktion von Flugkraftstoffen
(17 TWh in T45-H2, 19 TWh in T45-Strom, 155 TWh in T45-PtG/PtL)



CO_2-Bilanz Verkehr 2030 ohne Anrechnung von PtL/PtG-Kraftstoffen (nach KSG)



CO_2-Bilanz 2030 mit Anrechnung von PtL/PtG-Kraftstoffen (nach KSG)

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

Einordnung der Ergebnisse: Es sind noch große Anstrengungen notwendig

- Im Vergleich zu den TN-Szenarien...
  - ...sind die T45-Szenarien wegen der Sektorziele deutlich ambitionierter und zeigen eine schnellere Durchdringung, vor allem bis 2030.
  - ...ist eine stärkere Elektrifizierung im Pkw- & Lkw-Bereich klar erkennbar.
  - ...ist bei den größeren Verkehrsträgern kaum Veränderung zu sehen.

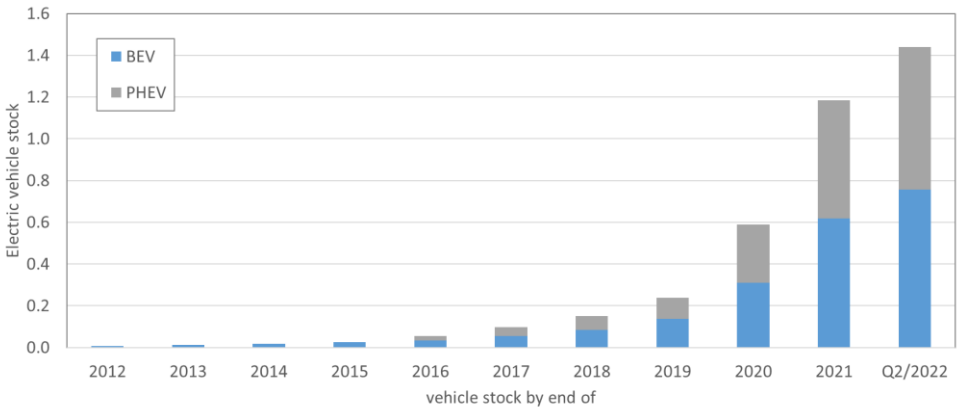
- Im Vergleich zum aktuellen Markthochlauf...
  - ...~~sind wir bei Pkw noch nicht auf Kurs~~ dürfen wir bei Pkw nicht locker lassen.

Modellergebnisse T45-Strom	
CAGR 2030-2020	**44%**
CAGR 2045-2030	**6%**
CAGR 2045-2020	**20%**

Reale Wachstumsraten (BEV+PHEV)	
CAGR* 2016-2012	67%
CAGR 2021-2016	85%
CAGR 2021-2012	77%

  - ...ist auch bei allen anderen Verkehrsträgern noch viel zu tun!

Zahlen korrigiert



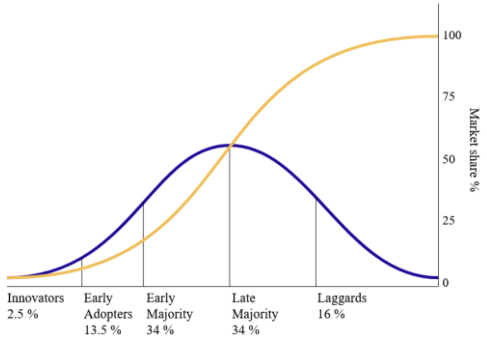
Bestand an Elektrofahrzeugen zum Jahresende
Quelle: Kraftfahrtbundesamt (KBA): FZ27

* Compound Annual Growth Rate: CAGR = ((Endwert/Anfangswert)$^{1/Dauer}$-1)*100

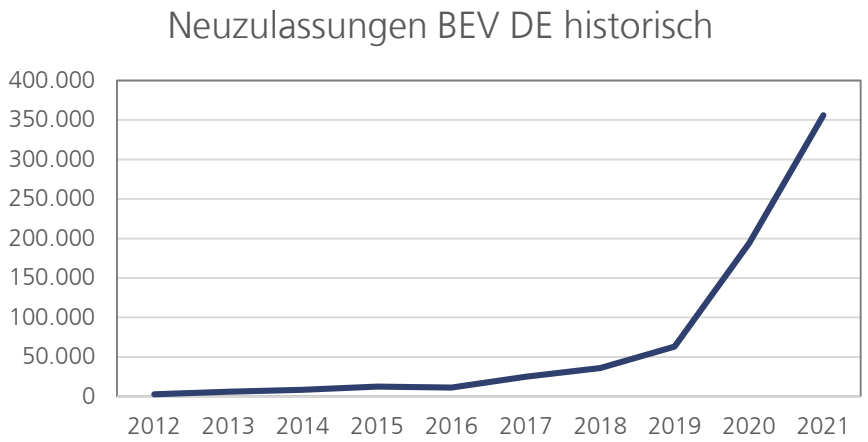
Einordnung der Ergebnisse: Es sind noch große Anstrengungen notwendig.

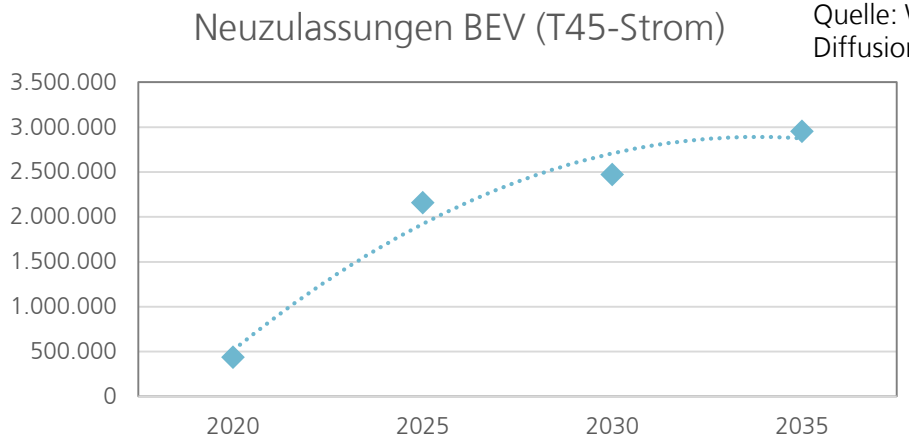
Ergänzung zur Korrektur auf der vorherigen Folie – nicht im Webinar enthalten.

- CAGR* unterstellt Wachstum mittels Potenzgesetz
- Sättigung kann nicht berücksichtigt werden (siehe Abbildung)
- Daher keine gute Abbildung nach 2025 für Neuzulassungen reiner Batteriefahrzeuge



Quelle: Wikipedia nach Rogers(1962): Diffusion of Innovations





- Neuzulassungen historisch 2021 vs. 2016: 99% p.a. *(im Bestand: 78%)*
- Wachstum T45-Strom Neuzulassungen 2025 vs. 2020 (CAGR*): 38% p.a. *(im Bestand: 56%)*

* Compound Annual Growth Rate: CAGR = ((Endwert/Anfangswert)$^{1/Dauer}$-1)*100

Schlussfolgerungen und Erkenntnisse

- **Verkehrsnachfrage**: Rückgang des motorisierten Individualverkehrs und Fußverkehrs zu Gunsten des ÖPNV (14% bis 2045) und geteilten Mobilitätsangeboten (~3% bis 2045).
- **Pkw**: **Tendenz** und Politikmaßnahmen **klar in Richtung BEV**, bei Langstreckenfahrzeugen können kleinere Anteile weiterer Kraftstoffe eingesetzt werden.
- **Lkw**: Noch keine eindeutige Tendenz, aber eine **Vielzahl an Fahrzeugen** werden **rein elektrisch** genutzt werden. Nur große Langstrecken-Lkw auch mit anderen Antriebsarten denkbar (u.a. bei hohen Transportgewichten). Infrastruktur ist sehr entscheidend!
- **Weitere Verkehrsträger**: Kaum weitere Verbesserungen ggü. TN-Szenarien im Schiffs- und Luftverkehr möglich (Haltedauern), bei **Bahn & Bus** ist Treibhausgasneutralität **2045 machbar**.
- **Sektorziele**:
  - Vor allem **im Lkw bis 2030 sehr ambitioniert**, bei Pkw wurden schon zahlreiche wichtige Weichen gestellt (Flottengrenzwerte & Maßnahmen im Koalitionsvertrag).
  - Für Nullemissionen 2045 **sind letzte Verbrenner-Pkw & -Lkw** (Spezialfahrzeuge) im **Bestand 2045** nur mit Verboten zu eliminieren, ggfs. sind kleine Mengen aus der Synfuel-Produktion für Flug- und Schiffsverkehr nutzbar.

ÖPNV: Öffentlicher Personennahverkehr; BEV: Battery Electric Vehicle

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Dr. Till Gnann

Projektleiter im Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme

+49 721 6809-460

till.gnann@isi.fraunhofer.de

Prof. Dr. Martin Wietschel

Leiter des Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme

+49 721 6809-254

martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Daniel Speth

Wissenschaftler im Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme

+49 721 6809-243

daniel.speth@isi.fraunhofer.de

Dr. Michael Krail

Stellv. Leiter des Competence Center Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme

+49 721 6809-429

michael.krail@isi.fraunhofer.de