LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND

Webinar: Verkehrssektor

08.07.2021

Dr. Michael Krail, Daniel Speth, Prof. Martin Wietschel

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

Agenda

zur internen groben Orientierung, Folie wird final gelöscht

	Beginn	Dauer
■ Einführung	14:00	
▪ Einordnung in Langfristszenarien		5‘
▪ Einführung Verkehrssektor: Methodik und Modelle		5‘
■ Verkehrsnachfrage	14:10	15‘
■ Ergebnisse nach Verkehrsträger	14:25	
▪ Allgemeine Annahmen		5‘
▪ Pkw: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen		10‘
▪ Nfz: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen		10‘
▪ Weitere Verkehrsträger		10‘
■ Zusammenfassung und zentrale Botschaften	15:00	10‘
■ *Diskussion*	*15:10*	20‘

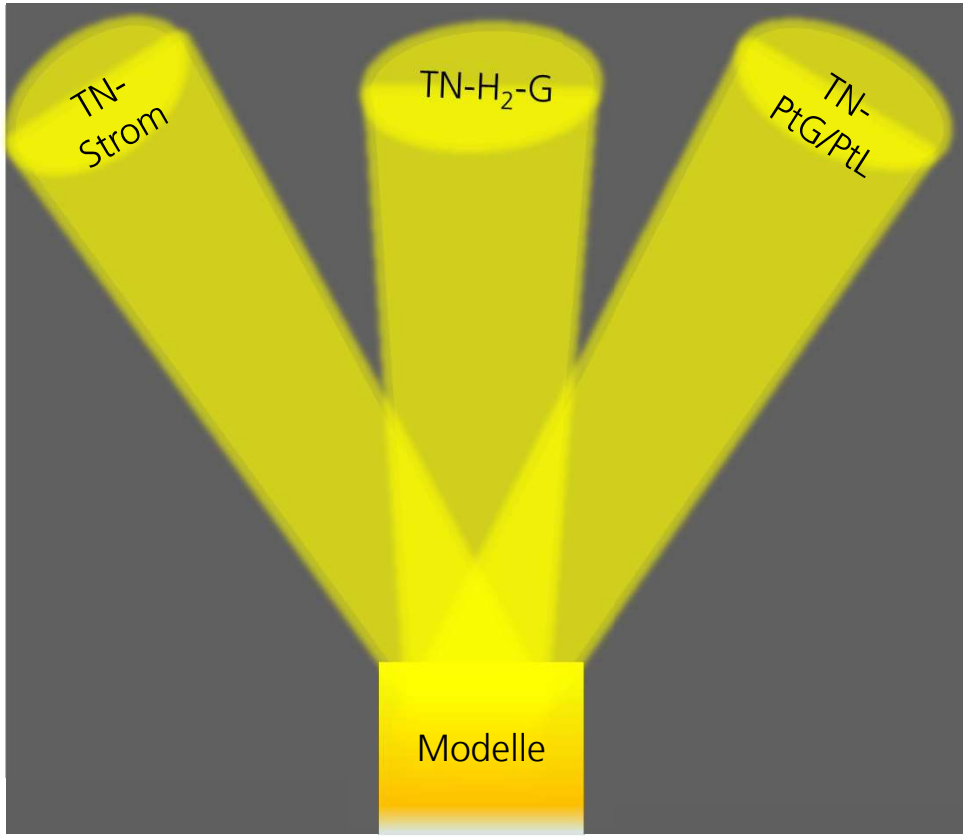
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU Berlin E&R Energy and Resources

Agenda

- Einführung
  - **Einordnung in Langfristszenarien**
  - Einführung Verkehrssektor: Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträger
  - Allgemeine Annahmen
  - Pkw: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Nfz: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Weitere Verkehrsträger
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Diskussion*

Methodik & Szenariodesign

Erkenntnisgewinn durch Vergleich statt einzelnem „Leitszenario“

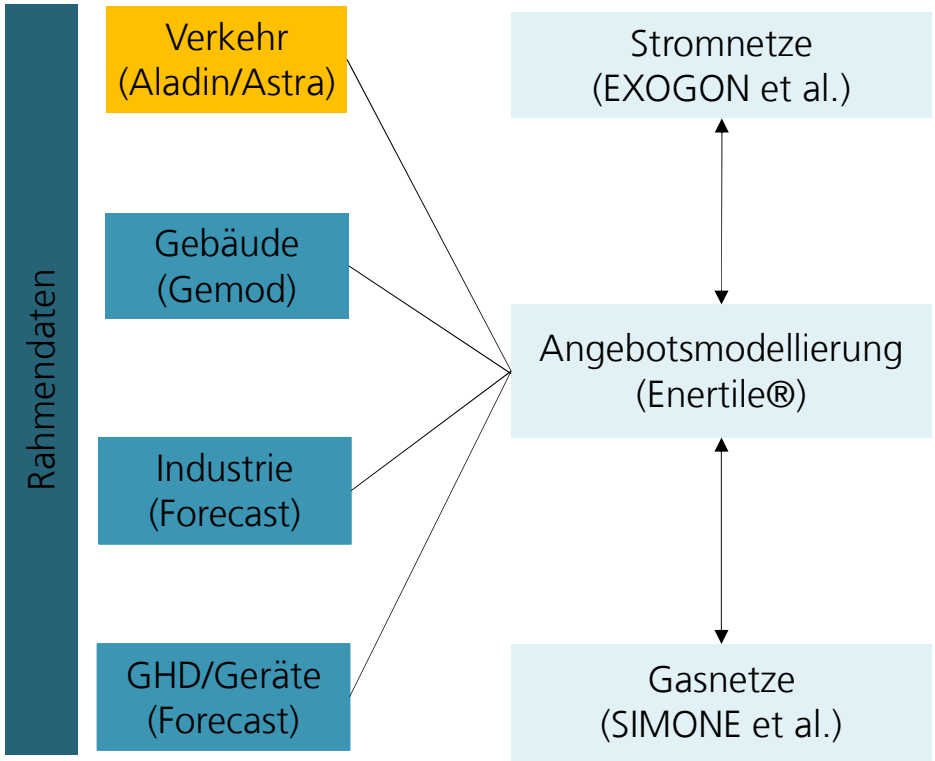


- **Zentrale Fragestellung**
  - Welche techno-ökonomischen Wirkungen haben bestimmte Pfade zur Dekarbonisierung des Energiesystems?
- **Vorgehensweise**
  - Vergleich der Dekarbonisierung des Energiesystems durch
    - sehr starken Stromeinsatz (*Szenario TN-Strom*)
    - sehr starken Einsatz von Wasserstoff (*Szenario TN-H_2-G*)
    - sehr starken Einsatz von synthetischen Kohlenwasserstoffen (*Szenario TN-PtG/PtL*)
  - Modellierung der Transformationspfade bis 2050 mit detaillierten Bottom-up Modellen
- **Mission der Langfristszenarien**
  - Durch ständige methodische Weiterentwicklung und eine Vielzahl von Szenarien den Lösungsraum für ein treibhausgasneutrales Energiesystem immer besser „ausleuchten“
  - Identifikation der Effekte alternativer Transformationspfade

Hinweis im Gesamtprojekt werden >25 Szenarien berechnet

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

Modellsystem
Gekoppelte Modelle erlauben hoch aufgelöste Analysen



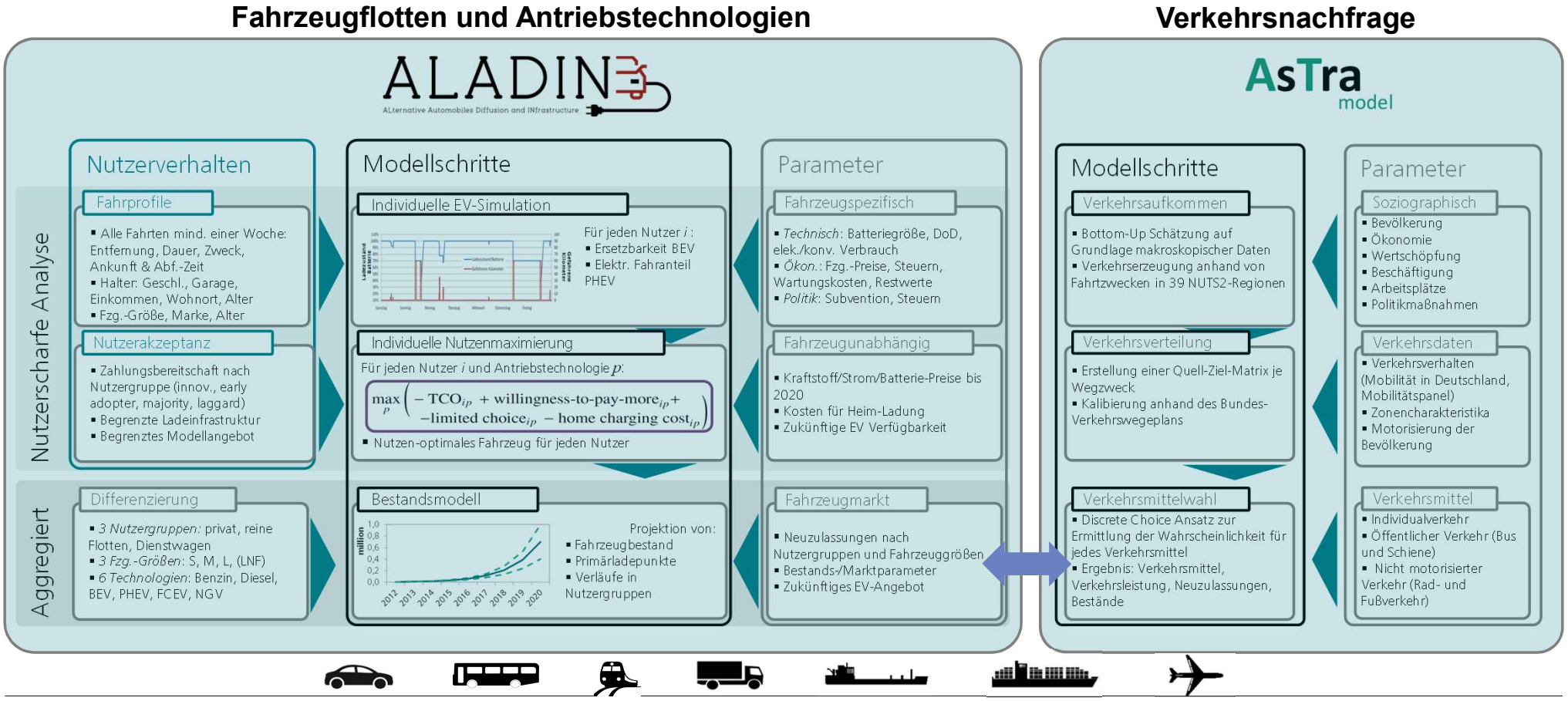
- **Vorgehensweise**
  - Detaillierte Modelle berechnen Energienachfrage
  - Energienachfrage wird **regionalisiert**
  - Potentiale Erneuerbarer Energien werden in hoher räumlicher und **zeitlicher** (stundenscharf) Auflösung berechnet
  - Bereitstellung der Energie wird optimiert und mit Netzmodellen iteriert
  - Auslegung der **Netze** wird berechnet
- **Einordnung**
  - Sehr hohe Auflösung des Energiesystems
    - Beispiel Enertile (Optimierung Angebot)
      - > 130 Millionen Erzeugungsvariablen
      - Größe des Gleichungssystems > 4,4 Mio. Schreibmaschinenseiten
  - Modellkette sehr rechenintensiv und aufwändig

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

Agenda

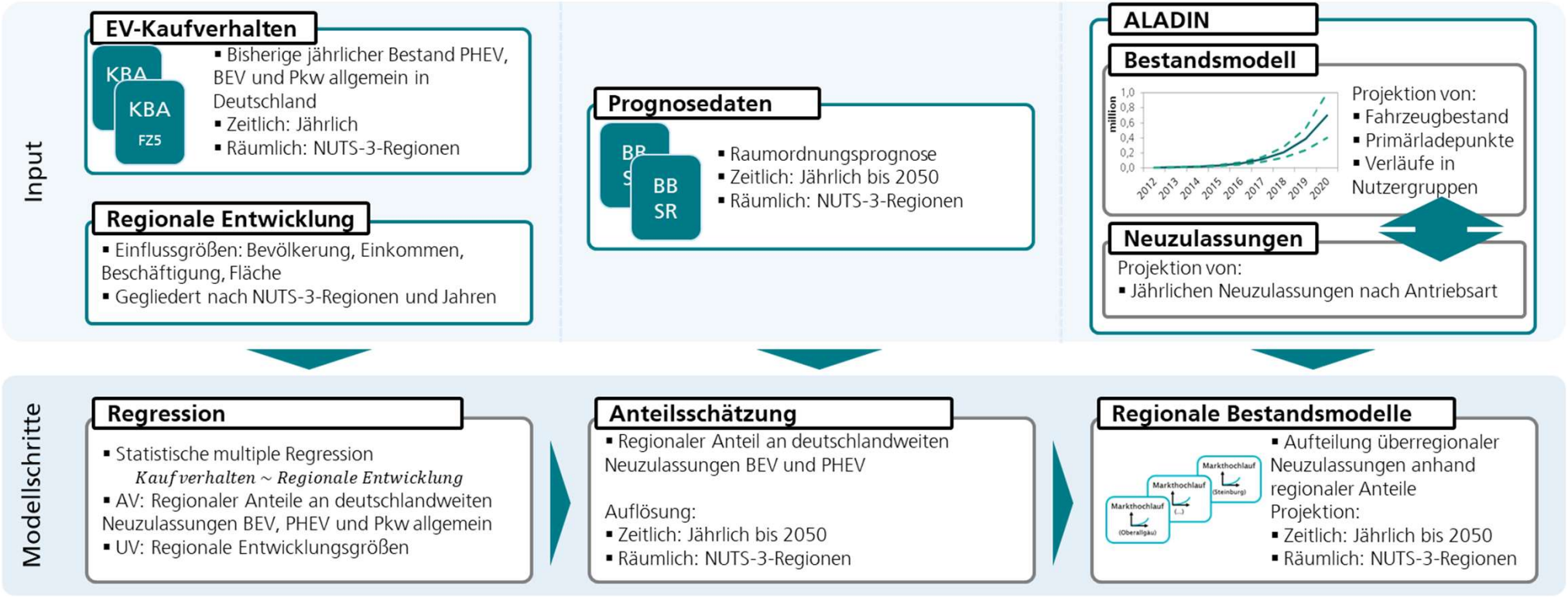
- Einführung
  - Einordnung in Langfristszenarien
  - **Einführung Verkehrssektor: Methodik und Modelle**
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträger
  - Allgemeine Annahmen
  - Pkw: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Nfz: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Weitere Verkehrsträger
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Diskussion*

Modellierung: Modellkopplung verbindet agentenbasierte mikroskopischer Analyse mit makroskopischen Einflüssen



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

Modellierung: Regionalisierung der Fahrzeugneuzulassungen



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

Agenda

- Einführung
  - Einordnung in Langfristszenarien
  - Einführung Verkehrssektor: Methodik und Modelle
- **Verkehrsnachfrage**
- Ergebnisse nach Verkehrsträger
  - Allgemeine Annahmen
  - Pkw: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Nfz: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Weitere Verkehrsträger
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Diskussion*

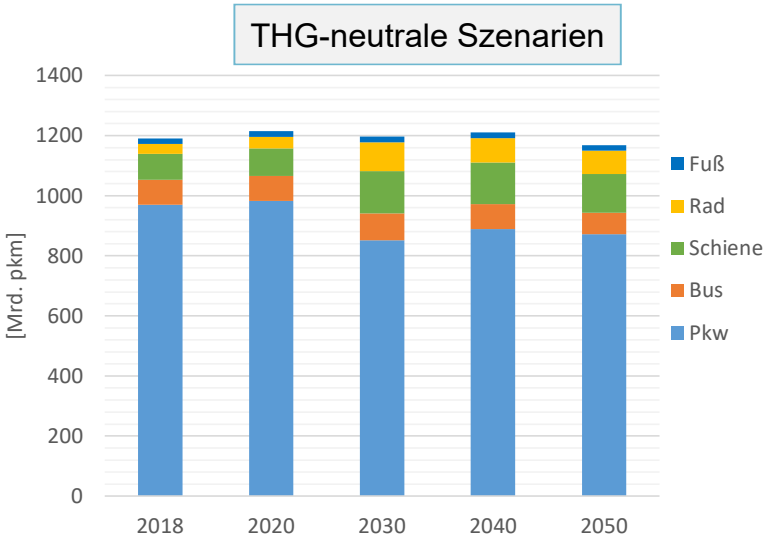
Verkehrsnachfrage: wichtige Annahmen

- Berücksichtigung von beschlossenen Maßnahmen zum **Stichtag 31.12.2019**
- Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030
  - Verbesserung der **Infrastruktur** primär auf der **Schiene** und im Bereich **Radverkehr**
  - Verringerung der **Ticketpreise** sowie **Stärkung des ÖPNV**
  - **Luftverkehrsabgabe** ab 2020
- Sonderregelungen für Elektrofahrzeuge:
  - **Kaufprämie** für Elektrofahrzeuge und **Steuerbegünstigungen** für elektrische Dienstfahrzeuge
- Europäische Maßnahmen:
  - Ausbau des **transeuropäischen Verkehrsnetzes**
  - **Flottengrenzwerte** für Pkw und Lkw bis 2030

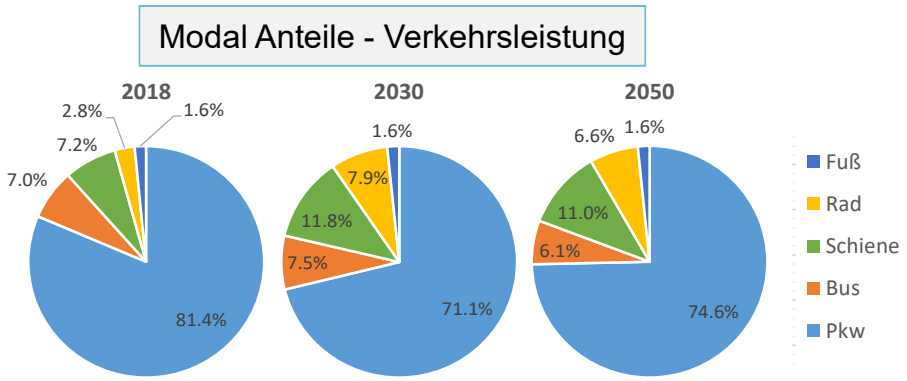
Verkehrsnachfrage: weitere Annahmen

- Verkehrsvermeidung und Effizienzsteigerungen, z.B. durch
  - **Rückgang des Pendlerverkehrs** durch Home Office und von **Dienstfahrten** durch virtuelle Meetings
  - **Höhere Beladungsfaktoren** im Bahnverkehr und bei Binnenschiffen
- Verkehrsverlagerung, z.B. durch
  - **Reduktion** der **Kosten** und der **Kapazität** auf der **Schiene** (z.B. durch Digitalisierung der Schieneninfrastruktur)
  - **Kostensteigerung im MIV** z.B. durch Parkraumbewirtschaftung
  - Steigerung der **Attraktivität des Radverkehrs** durch verbesserte Infrastruktur und stärkeren Anstieg des Anteils an Pedelecs
- Klimaverträglichkeit des Verkehrs steigern, z.B. durch
  - Deutliche **Anhebung des CO_2-Preises** im Verkehr auf 200 €/t 2030 und 500 €/t 2050
  - **Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr** führt zu Verflüssigung des Verkehrs

Personenverkehr: Leichter Rückgang der Verkehrsleistung und deutlicher Modal Shift



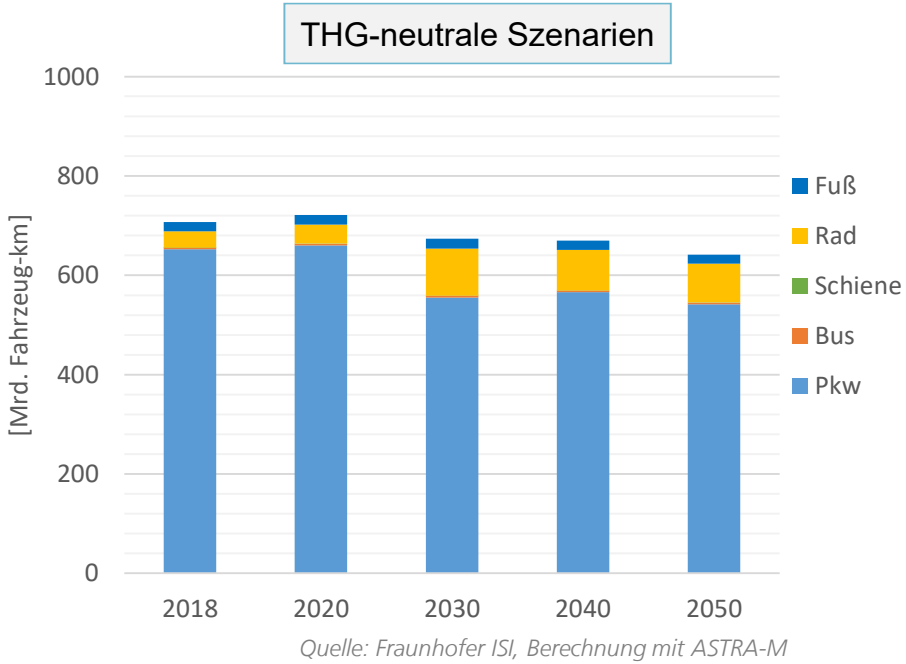
Mode	2018	2020	2030	2040	2050	Einheit
Pkw	969,630	982,052	851,429	889,223	871,758	
Bus	83,846	83,472	89,810	83,031	71,425	
Schiene	85,885	91,819	141,265	137,600	128,467	Mio. Pkm
Rad	32,773	38,362	94,679	81,505	77,643	
Fuß	18,753	19,092	19,518	19,000	18,600	



Quelle: Fraunhofer ISI, Berechnung mit ASTRA-M

- Gleiche Entwicklung in allen THG-neutralen Szenarien
- Deutlicher Rückgang der Pkw-Nutzung (81% ↗ 74%)
- Deutlicher Anstieg im Radverkehr und auf der Schiene

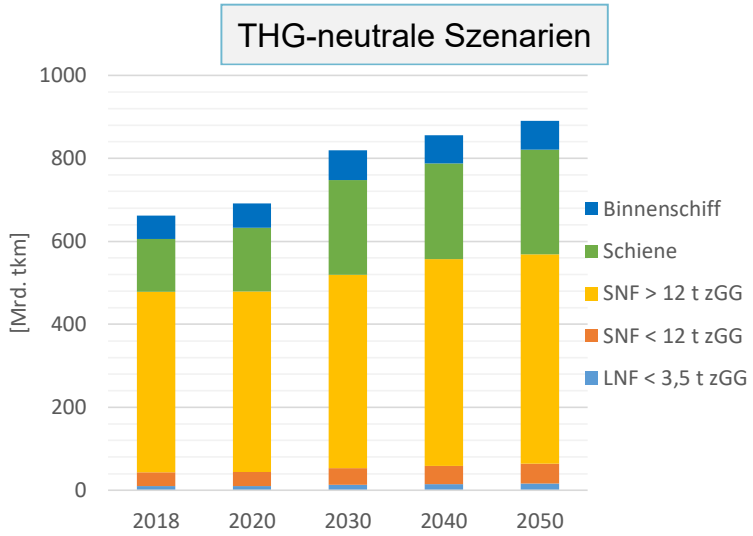
Personenverkehr: Sinkende Fahrleistungen beim Pkw, steigende Fahrleistungen im Umweltverbund



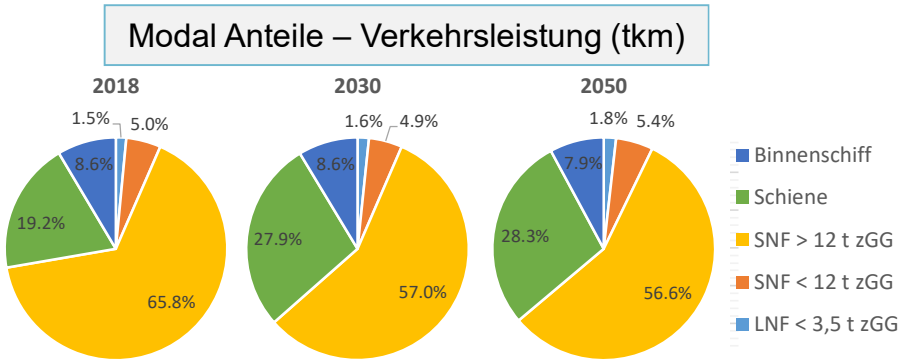
Quelle: Fraunhofer ISI, Berechnung mit ASTRA-M

- Fahrleistungen beim Pkw sinken deutlicher als Verkehrsleistung wegen steigendem Anteil von Carsharing und Ridepooling (Ø Besetzungsgrad steigt von 1,4 auf 1,5)
- Zunehmender Anteil elektrifizierter Pkw führt zu sinkenden Betriebskosten und macht Pkw langfristig wieder attraktiver

Güterverkehr: Verlagerung von der Straße zur Schiene



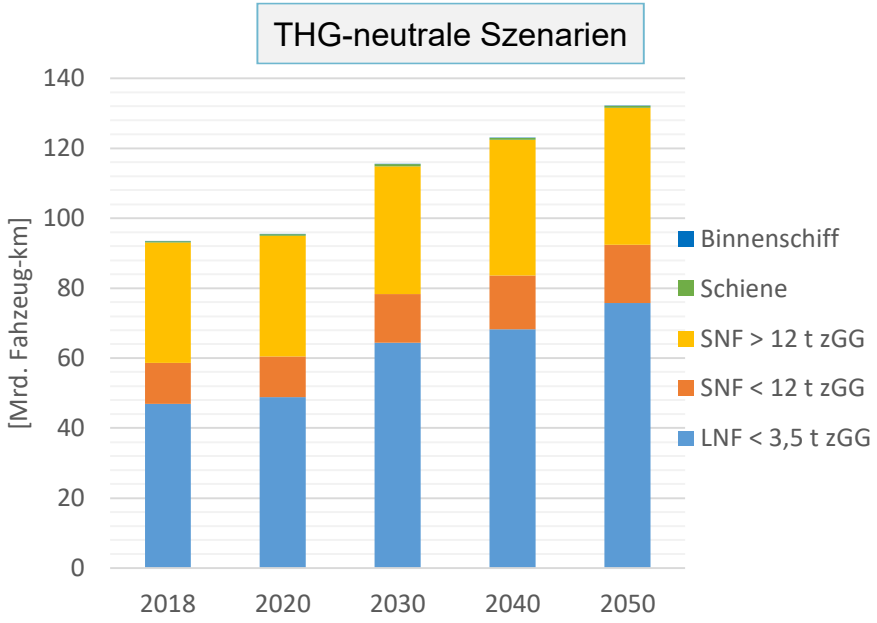
Mode	2018	2020	2030	2040	2050	Einheit
LNF < 3,5 t zGG	10	10	13	14	16	
SNF < 12 t zGG	33	33	40	44	48	
SNF > 12 t zGG	436	436	467	499	505	Mrd. tkm
Schiene	127	153	228	231	252	
Binnenschiff	57	59	71	68	70	



Quelle: Fraunhofer ISI, Berechnung mit ASTRA-M

- Gleiche Entwicklung in allen THG-neutralen Szenarien
- Verlagerung von der Straße auf die Schiene (19% ↗ 28%)
- Rückgang Lkw (72% ↘ 64%)

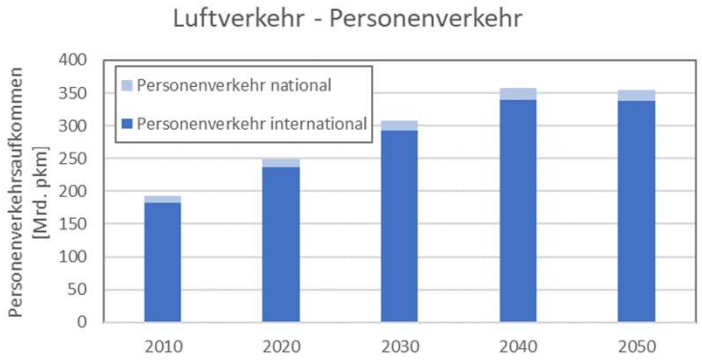
Güterverkehr: Leichte Verschiebungen gleichen sich aus, das gesamte Verkehrsaufkommen bleibt nahezu konstant

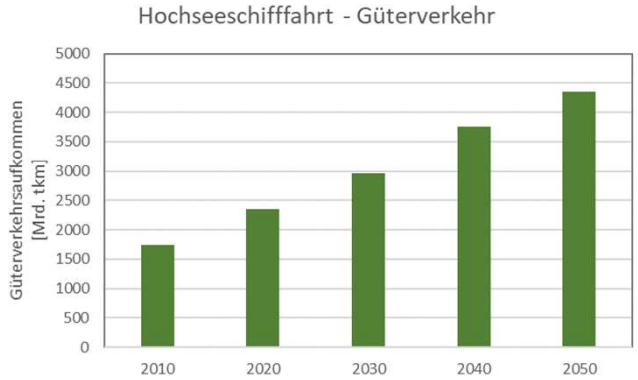


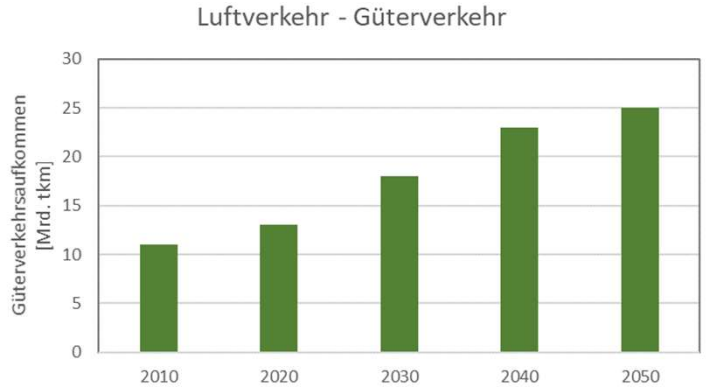
Quelle: Fraunhofer ISI, Berechnung mit ASTRA-M

- Verkehrsleistung/Fahrleistung nimmt am stärksten auf der Schiene und bei Leichten Nutzfahrzeugen zu:
  - Ursache: Verlagerung auf Schiene durch Infrastrukturausbau, längere Züge und reduzierte Trassenpreise
  - Vorteile bei TCO durch alternative Antriebe vor allem bei LNF

Verkehrsnachfrage in Luft- und Seefahrt steigt stark an und stagniert nur in der Personenluftfahrt







- Personenluftfahrt ist primär durch internationale Flugreisen geprägt und stagniert nach 2040
- Der Güterluftverkehr ist aber vergleichsweise wichtig (1t ~ 10 Personen)
- Wachstum v.a. in der Hochseeschifffahrt mit Verdopplung bis 2050 gegenüber 2020

Quelle: Pfluger et al. 2017: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland; Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

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

Agenda

- Einführung
  - Einordnung in Langfristszenarien
  - Einführung Verkehrssektor: Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträger
  - **Allgemeine Annahmen**
  - Pkw: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Nfz: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Weitere Verkehrsträger
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Diskussion*

Szenariendefinition – Stellhebel stellen Maßnahmen zur Ausgestaltung dar, weniger eine Handlungsempfehlung

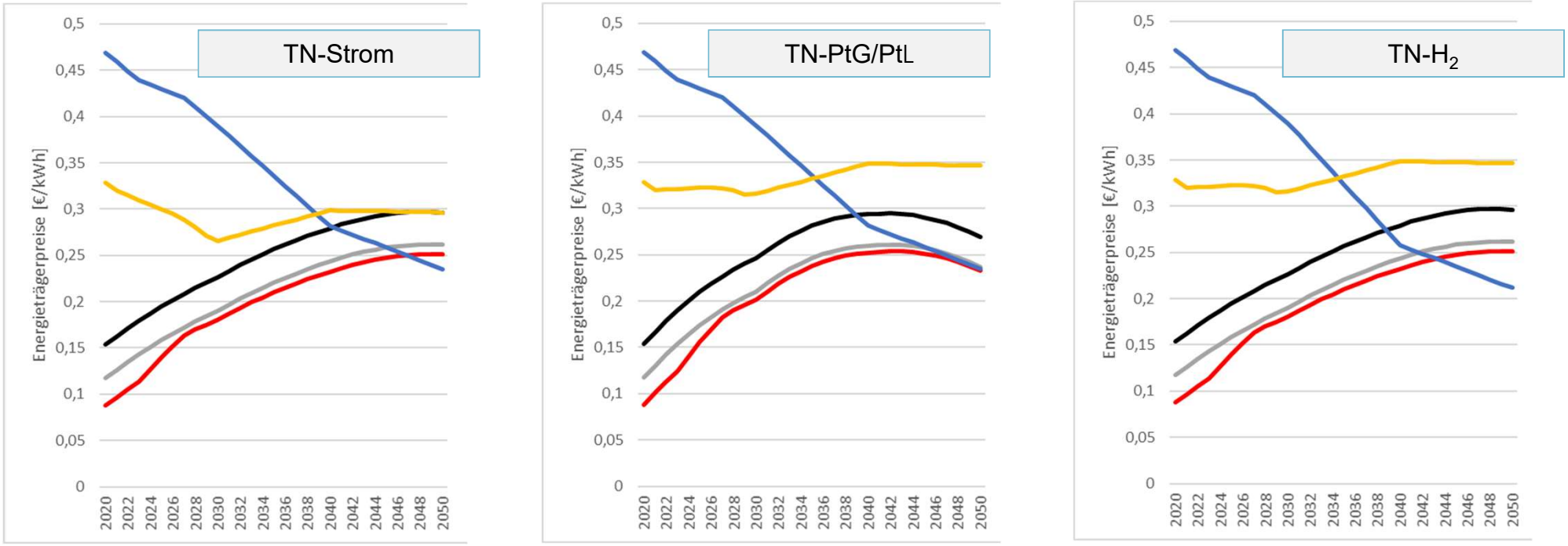
- **TN-Strom:** Der verstärkte Einsatz elektrischer Energie wird durch günstige Batteriepreise sowie günstige Stromtarife für Elektrofahrzeuge (Preisreduktion: 5 ct/kWh in 2030 auf Ladestrom, z.B. durch gesteuertes Laden) erreicht. Zeitgleich wird die Investition für konventionelle Fahrzeuge zusätzlich erhöht (2.500 € in 2050). Ladeinfrastruktur für Lkw wird großflächig (8.000 km) aufgebaut.
- **TN-PtG/PtL:** PtX und BtX stehen in großer Menge zur Verfügung und werden im Verkehrssektor mit dem Ziel der Treibhausgasminderung gefördert (- 2 ct/kWh in 2040)
- **TN-H_2:** Wasserstofftechnologien für mobile Anwendungen stehen mittelfristig günstig zur Verfügung. Zeitgleich werden Preiserhöhungen für konventionelle Fahrzeuge eingesetzt (2.500 € in 2050). H_2 als Kraftstoff wird gefördert (- 2 ct/kWh in 2040).

CO_2-Preis Verkehr [€/t]	2020	2030	2050
TN	25	200	500

Beimischung PtL für Kraftstoffpreis Verkehr	2020	2030	2050
TN-PtG/PtL	0%	20%	100%

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

Beimischung + CO_2-Abgabe führt zu steigenden Diesel-, Benzin-,Gaspreisen; Energiepreis differenziert Szenarien



*Es handelt sich jeweils um Mischpreise konventioneller, biogener und synthetischer Kraftstoffe

Quellen: Sensfuss et al. (2020): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Rahmendaten. Fraunhofer ISI; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU). Karlsruhe, Heidelberg
MWV (2020): Monatliche Verbraucherpreise für Mineralölprodukte 2005-2020 [€-Cent/Liter]. Mineralölwirtschaftsverband (MWV). Eigene Annahmen

Die Szenarien unterscheiden sich in der Entwicklung von Batterie- und Brennstoffzellenpreisen

- **TN-Strom:** Deutlich fallende Batteriepreise unterstützen die Verbreitung der Elektromobilität
- **TN-PtG/PtL:** Batteriepreise fallen moderater als im Szenario TN-Strom; ab 2030 werden keine Preisreduktionen bei Batterie und Brennstoffzelle unterstellt
- **TN-H_2:** Bis 2030 wird verstärkt auf Batterietechnologie gesetzt, anschließend stehen Brennstoffzellenfahrzeuge in großer Stückzahl zur Verfügung, so dass die Preise bis 2050 deutlicher sinken als in den anderen Szenarien

Batteriepreise im Verkehr exkl. MwSt.

		Einheit	2020	2030	2040	2050
TN-Strom	BEV	EUR/kWh	240	100	90	80
	PHEV	EUR/kWh	264	110	98	88
TN- PtG/PtL	BEV	EUR/kWh	240	120	120	120
	PHEV	EUR/kWh	264	132	132	132
TN-H_2	BEV	EUR/kWh	240	100	100	100
	PHEV	EUR/kWh	264	110	110	110

Brennstoffzellenpreise im Verkehr exkl. MwSt.

	Einheit	2020	2030	2040	2050
TN-Strom	EUR/kW	234	80	66	55
TN-PtG/PtL	EUR/kW	234	80	80	80
TN-H_2	EUR/kW	234	78	62	50

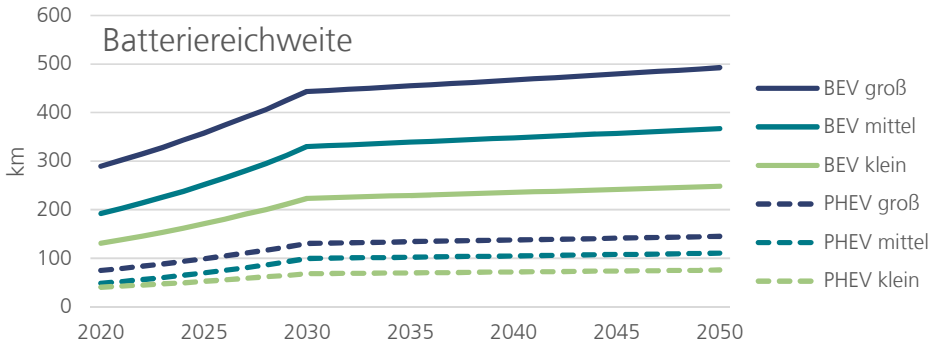
Quellen: Lutsey (2017): Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. In: Energies 10 (9), S. 1314. DOI: 10.3390/en10091314.
Zapf et al. (2019): Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden
Mottschall et al. (2019):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

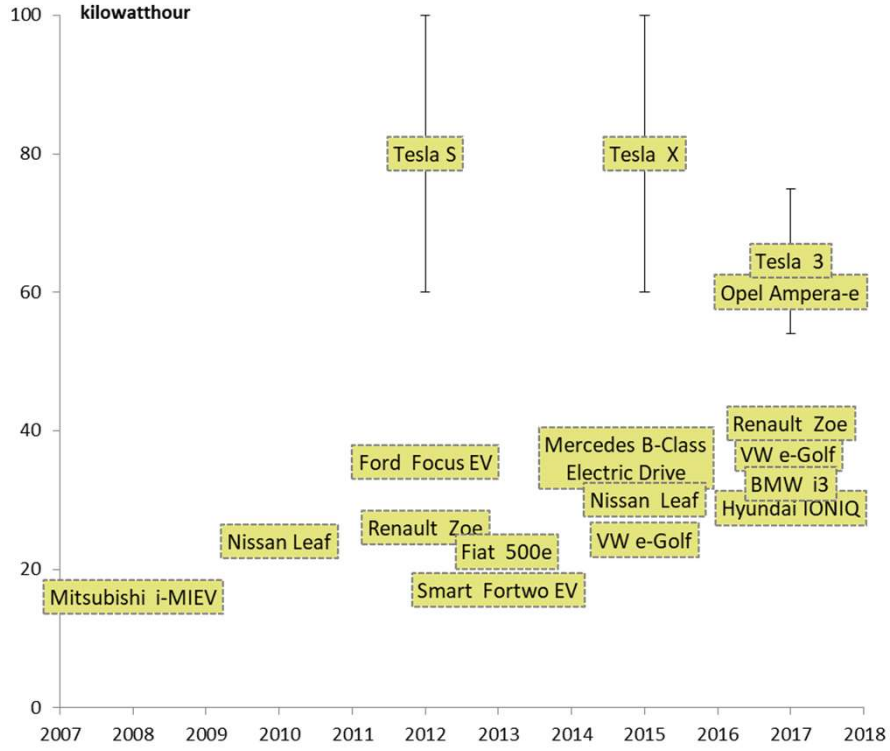
Agenda

- Einführung
  - Einordnung in Langfristszenarien
  - Einführung Verkehrssektor: Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträger
  - Allgemeine Annahmen
  - **Pkw: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen**
  - Nfz: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Weitere Verkehrsträger
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Diskussion*

Annahmen: Zunehmende Batteriekapazität führt bis 2030 zu steigenden Reichweiten; geringer Anstieg ab 2030

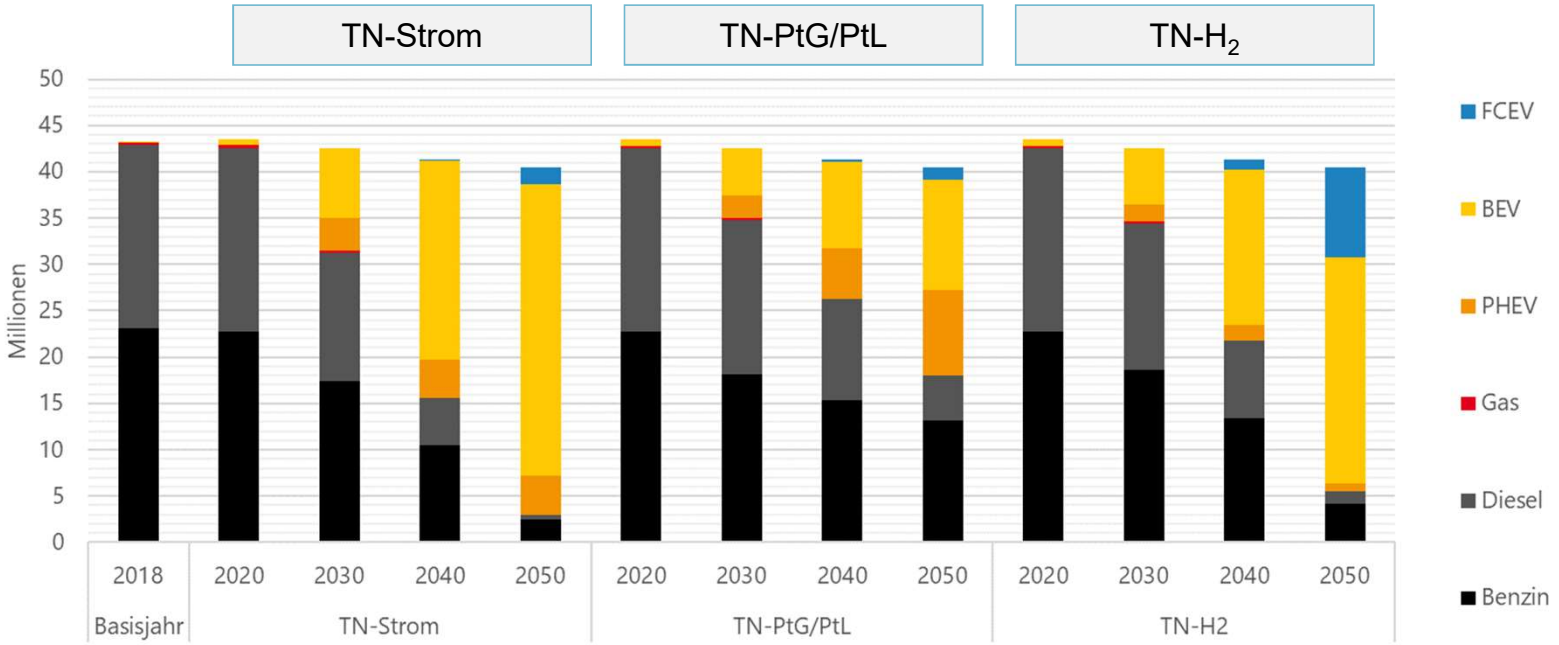
Batteriekapazität [kWh]				
Antriebsart	**Fahrzeuggröße**	**2020**	**2030**	**2050**
BEV	Klein	25	38	38
	Mittel	45	69	69
	Groß	73	100	100
PHEV	Klein	8	12	12
	Mittel	12	22	22
	Groß	20	31	31





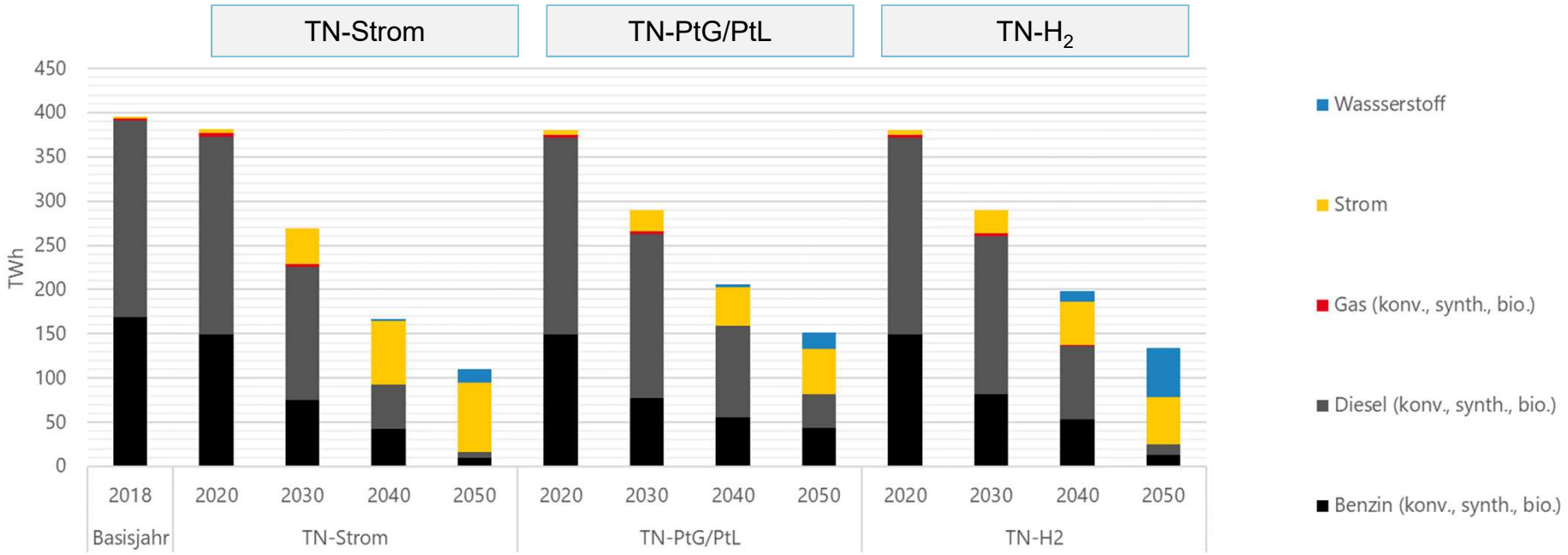
Quelle: ifeu (2019): Klimabilanz von Elektroautos – Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. Im Auftrag Agora Verkehrswende

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



- In allen Szenarien spielen EV eine entscheidende Rolle (47 % - 88 %); im TN-Strom und TN-H_2 dominieren BEV, im TN-PtG/PtL verstärkt auch PHEV
- Diesel + Benzin 2050 in allen Szenarien noch im Bestand, im TN-Strom und TN-H_2 erfolgen keine Neuzulassungen mehr
- FCEV kommen für Langstreckenfahrer in Frage und konkurrieren in allen Szenarien mit PHEV

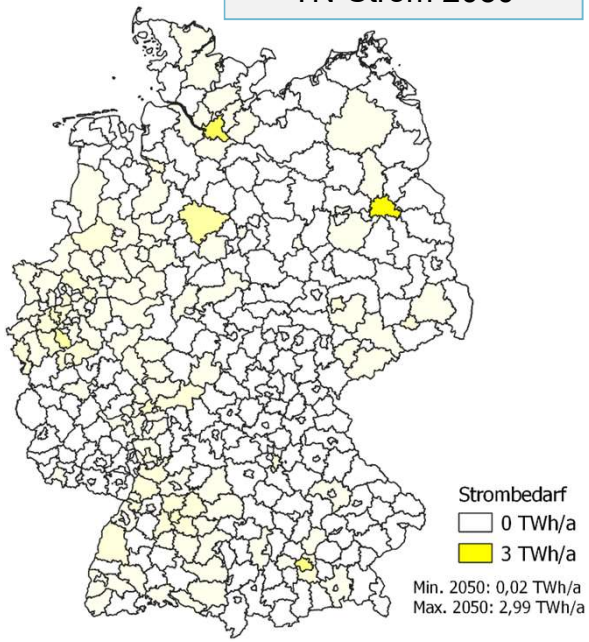
Ergebnisse: Der Endenergiebedarf nimmt deutlich ab, Unterschiede durch Effizienz der Antriebsalternativen



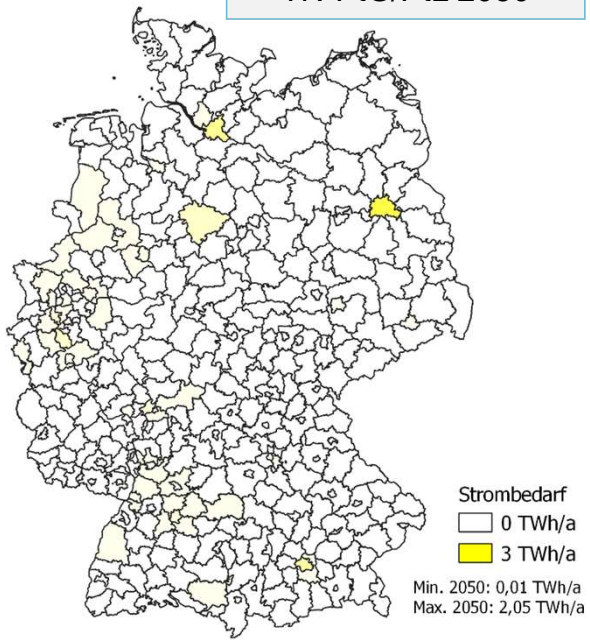
- Rückgang Endenergienachfrage um bis zu 70 %; Unterschiede in den Szenarien aus Effizienzunterschieden der Fahrzeugalternativen
- Benzin und Diesel im TN-Strom und TN-H_2 2050 in kleinen Mengen für letzte Verbrennungsfahrzeuge mit geringer Fahrleistung benötigt
- Gas spielt in keinem Szenario eine entscheidende Rolle (u.a. heute wegen zu wenig Pkw-Angeboten, später aus fehlender Wirtschaftlichkeit), H_2 wird in unterschiedlichem Umfang benötigt, Strom in allen Szenarien wichtig

Ergebnisse: In allen Szenarien entsteht 2050 insbesondere in Städten ein deutlicher Strombedarf

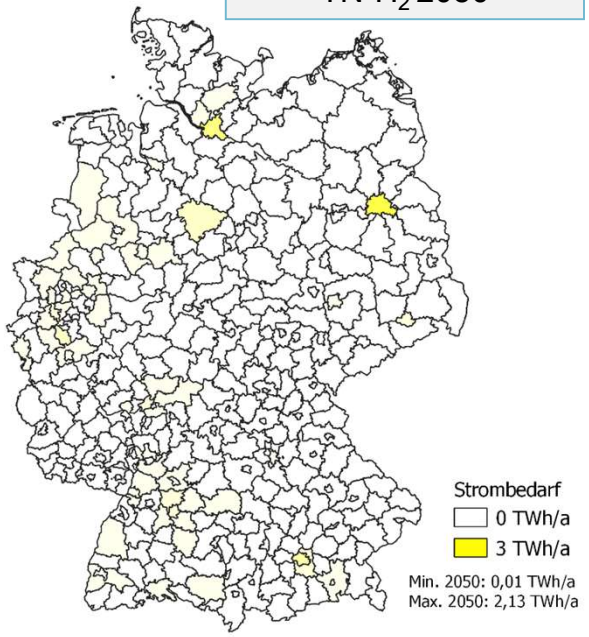
TN-Strom 2050



TN-PtG/PtL 2050



TN-H_2 2050

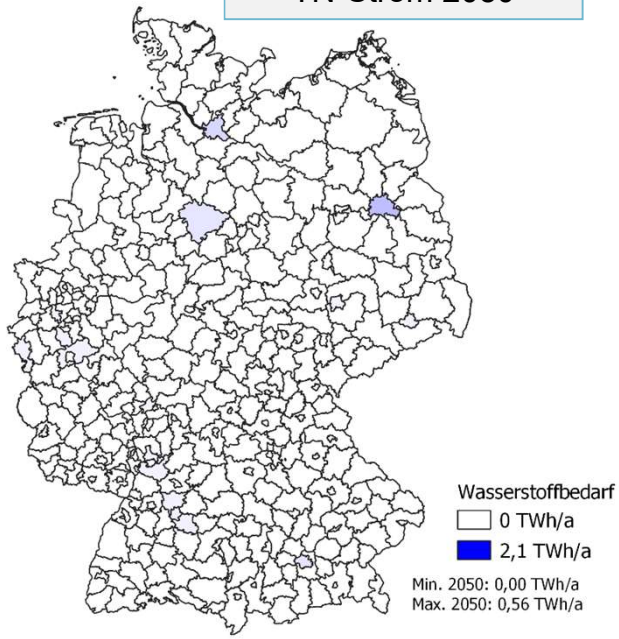


- Höhere Energiebedarfe in städtischen Gebieten
- Nutzung von biogenen oder synthetischen Kraftstoffen (TN-PtG/PtL) sowie Wasserstoff (TN-H_2) kann den Strombedarf regional, insbesondere auch in ländlichen Gebieten während des Hochlaufs, reduzieren; langfristig jedoch flächendeckender Bedarf

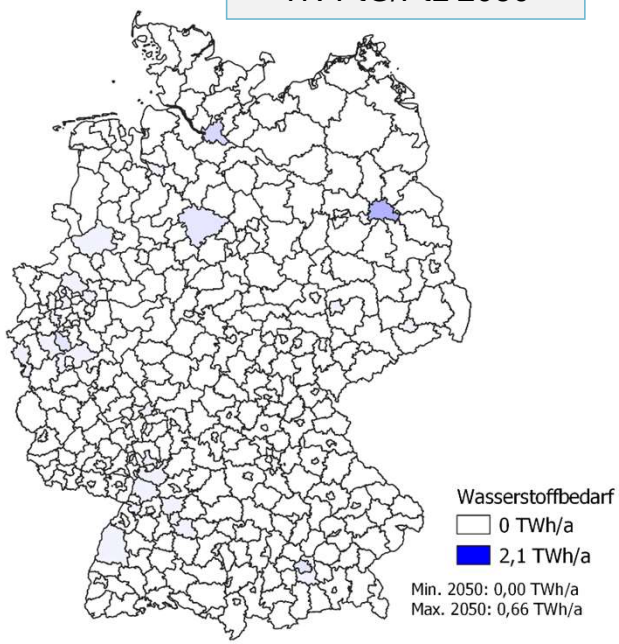
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU Berlin E&R Energy and Resources

Ergebnisse: Wasserstoff wird im Szenario TN-H_2 regional in relevanten Mengen nachgefragt

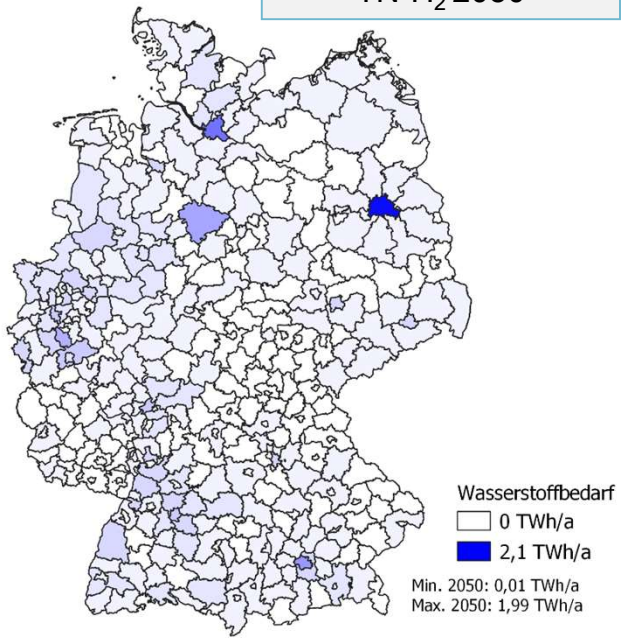
TN-Strom 2050



TN-PtG/PtL 2050



TN-H_2 2050



- Wasserstoff für Pkw im Szenario TN-H_2 regional in relevanten Mengen nachgefragt.
- In den Szenarien TN-Strom und TN-PtG/PtL Realisierung aufgrund der notwendigen Infrastruktur fraglich und von anderen Sektoren abhängig
- Stärkere Bündelung auf einzelne Regionen vorstellbar

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

Verschärfung: Förderung und Regulierung können die Umstellung insbesondere nach 2030 weiter beschleunigen

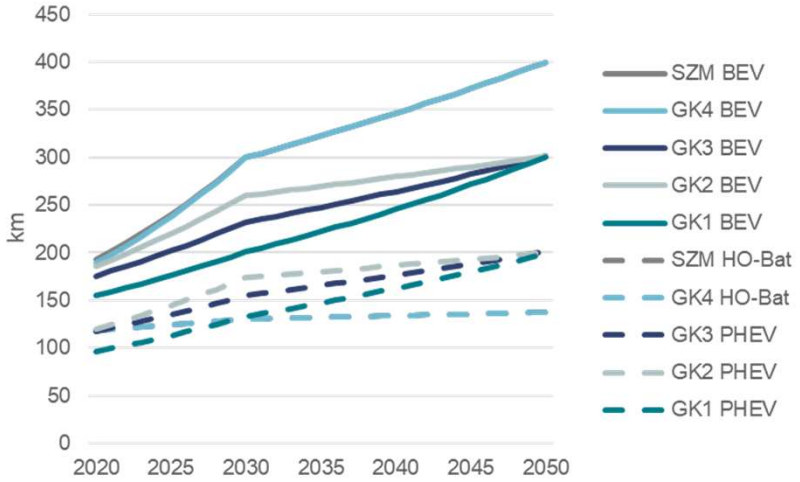
- Optionen zur weiteren Beschleunigung der Flottenumstellung aus Modellperspektive:
  - Förderung
    - Verlängerungen der Kaufprämien
    - Aufbau von Ladeinfrastruktur
  - Regulierung
    - Herstellerziele zur Erweiterung der Produktpalette absichern: ambitionierte Flottengrenzwerte / Mindestquoten für alternative Antriebe
    - Einschränkungen für konventionell betriebene Fahrzeuge, z.B. Fahrverbote in Innenstädten, mittelfristig Verkaufsverbote
- Erwartete Auswirkungen:
  - Anstieg alternativer Antriebe bis 2030 durch Flottenumwälzung (Haltedauer: 14 Jahre) limitiert
  - Ab 2030 deutliche Effekte auf verbleibende konventionelle Fahrzeuge möglich

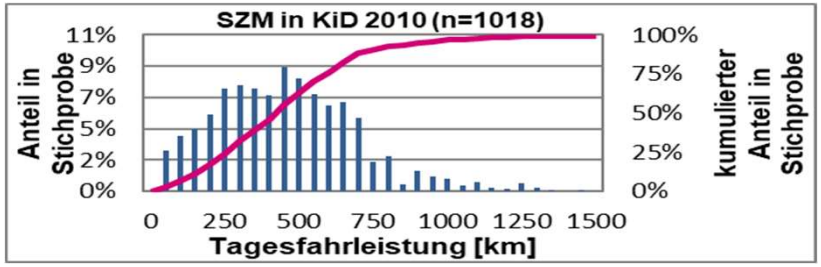
Agenda

- Einführung
  - Einordnung in Langfristszenarien
  - Einführung Verkehrssektor: Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträger
  - Allgemeine Annahmen
  - Pkw: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - **Nfz: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen**
  - Weitere Verkehrsträger
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Diskussion*

Annahmen: Mittelfristig kann etwa die Hälfte der Sattelzugmaschinen ohne Zwischenladen elektrifiziert werden

Batteriekapazität [kWh]				
Antriebsart	**Fahrzeuggröße**	**2015**	**2030**	**2050**
BEV	GK1	50	65	92
	GK2	110	160	176
	GK3	150	200	246
	GK4	200	352	446
	SZM	240	411	520
PHEV	GK1	30	43	61
	GK2	70	107	117
	GK3	100	133	164
HO-Bat	GK4	169	169	169
	SZM	200	200	200

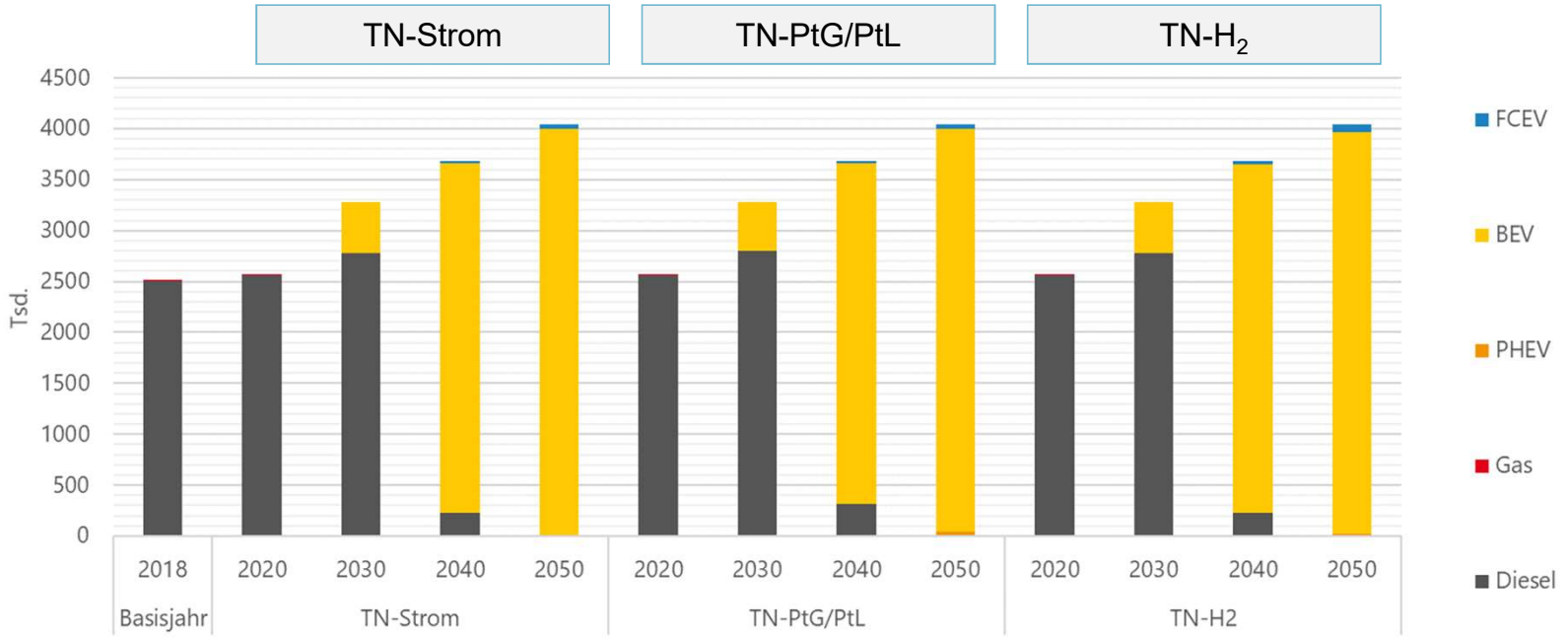




Quelle: KiD (2010): Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010. WVI Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH; Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung

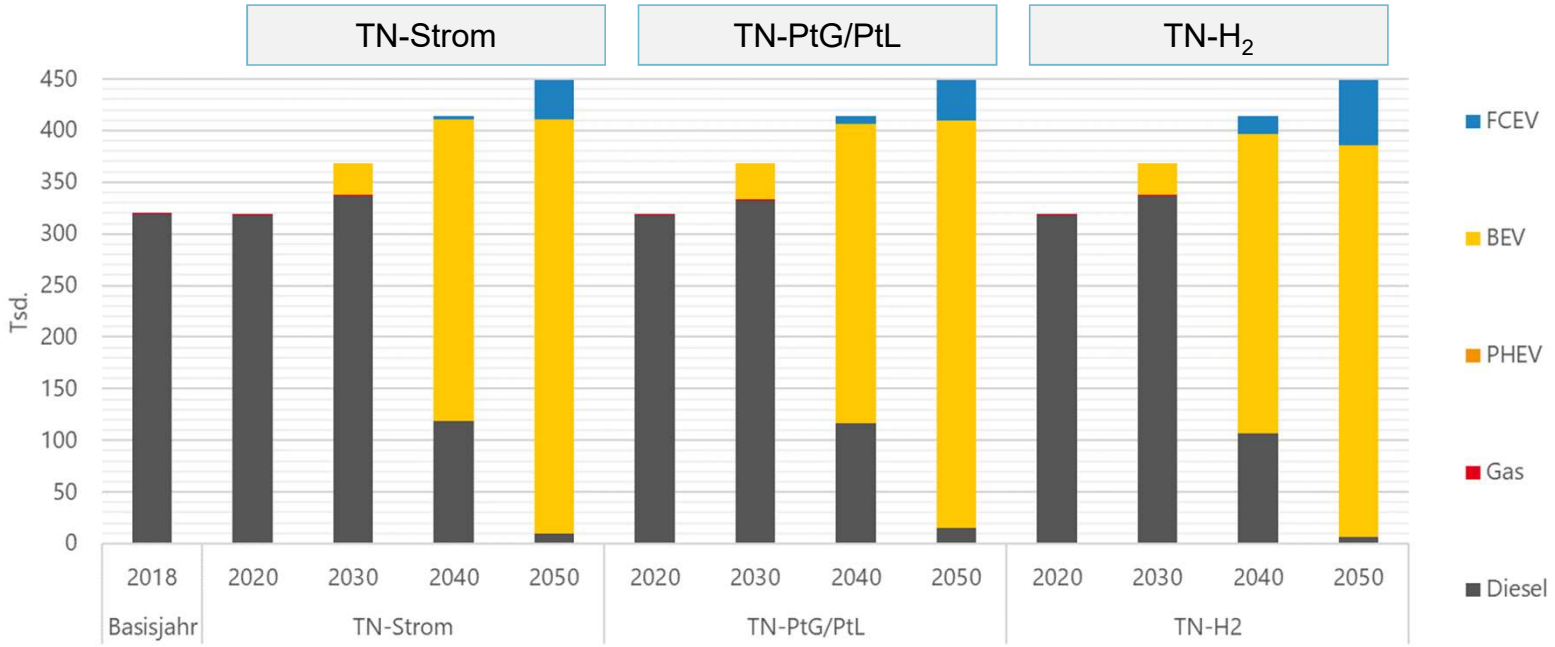
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU Berlin E&R Energy and Resources

Ergebnisse leichte Nutzfahrzeuge: Elektrifizierung in allen Szenarien dominante Strategie



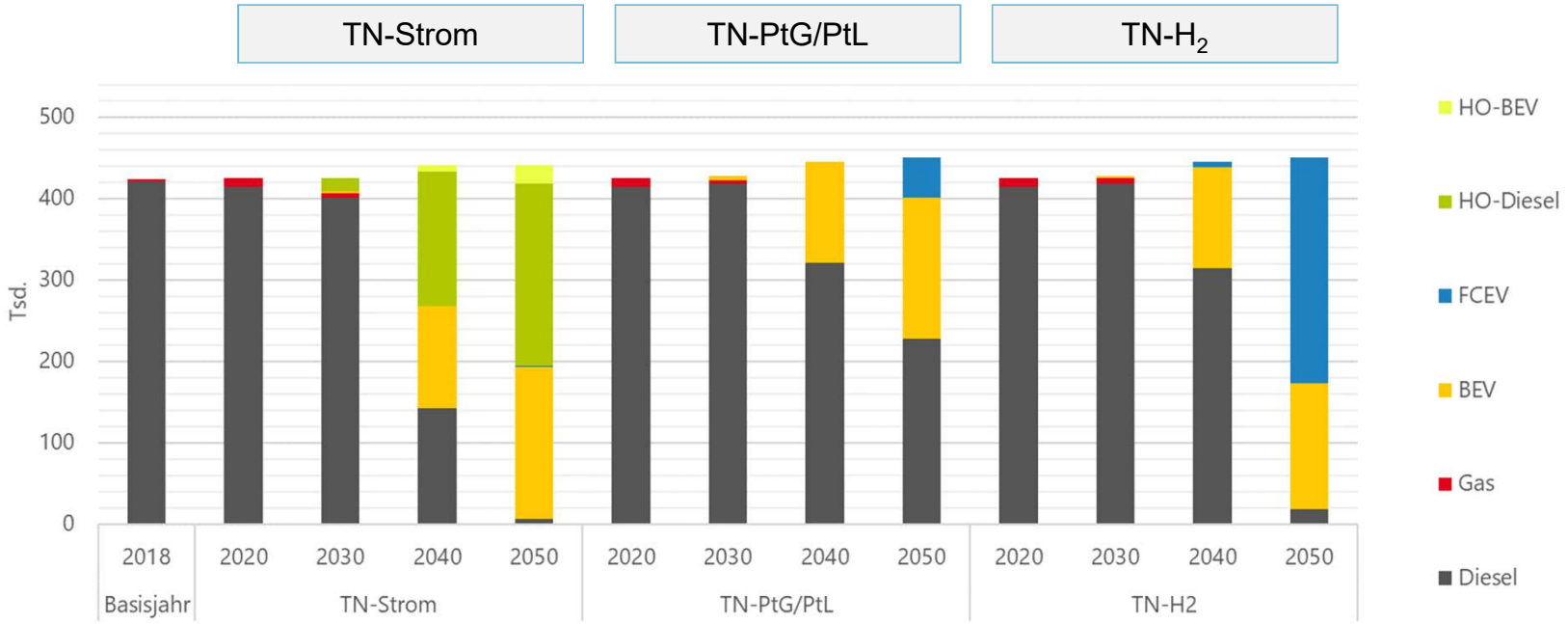
- Elektrifizierung ist in allen Szenarien die kostengünstigste Alternative für leichte Nutzfahrzeuge; die im Vergleich zum Pkw hohe Jahresfahrleistung ermöglicht die Amortisation der durch die Batterien höheren Investition

Ergebnisse mittlere Nutzfahrzeuge: Elektrifizierung in allen Szenarien dominante Strategie



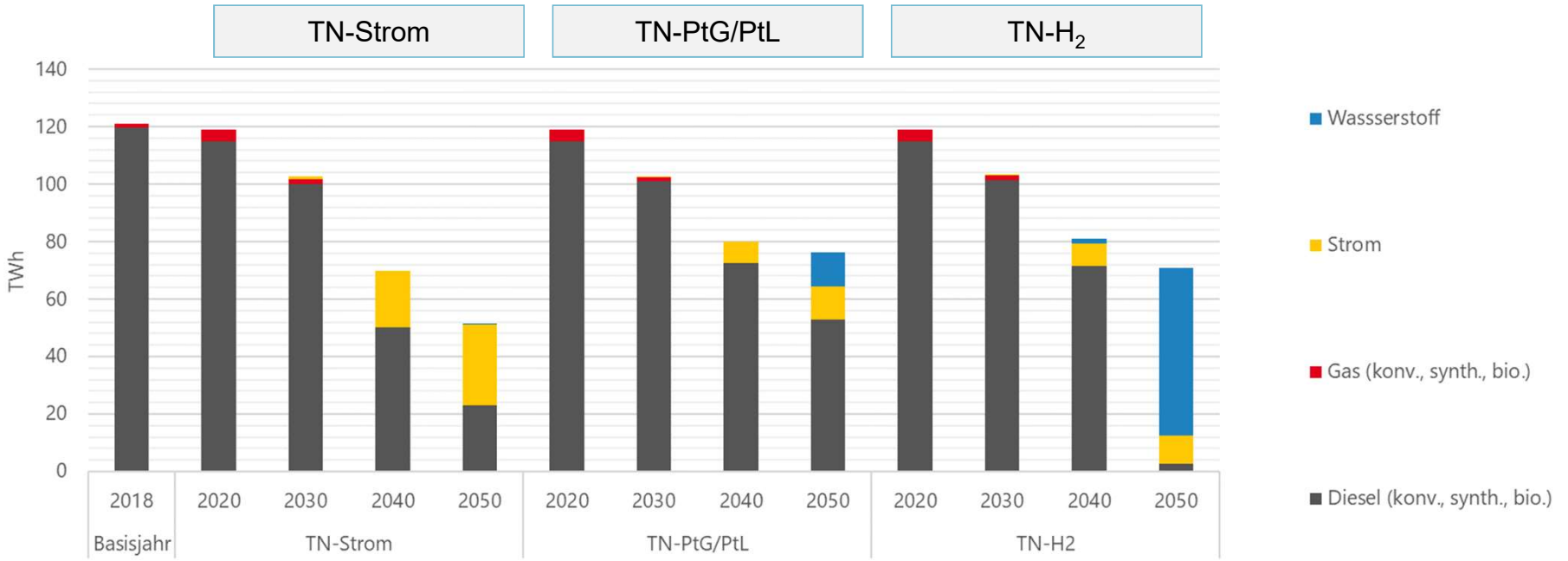
- Elektrifizierung ist in allen Szenarien die kostengünstigste Alternative für mittlere Nutzfahrzeuge; die im Vergleich zum Pkw hohe Jahresfahrleistung ermöglicht die Amortisation der durch die Batterien höheren Investition
- Strecken, die nicht elektrifiziert werden können, werden mit FCEV abgedeckt

Ergebnisse schwere Nfz: Teilweise Elektrifizierung möglich, Langstrecke in Szenarien unterschiedlich gelöst



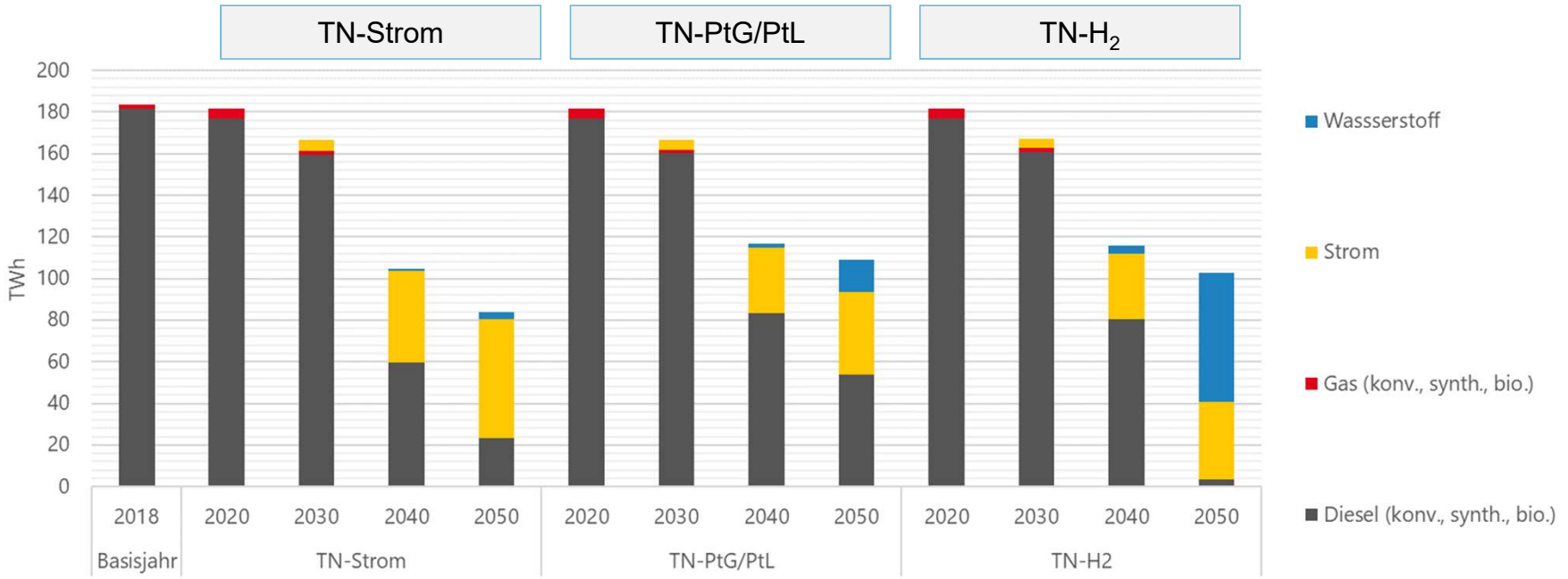
- Schwere Nutzfahrzeuge können teilweise elektrifiziert werden. Aufgrund der hohen Fahrleistung dominieren operative Kosten. Effizienz des Elektromotors macht Elektrifizierung, falls aufgrund der Reichweite möglich, in der Regel zur kostengünstigsten Lösung
- Fahrzeuge mit hoher Fahrleistung können bei entsprechender Infrastruktur (TN-Strom) durch Oberleitungen mit Strom betrieben werden, alternativ muss H_2 (TN-H_2) oder ein (PtX-) Kraftstoff (TN-PtG/PtL) verwendet werden

Ergebnisse schwere Nfz: Deutliche Reduktionen des Endenergiebedarfs durch Elektrifizierung



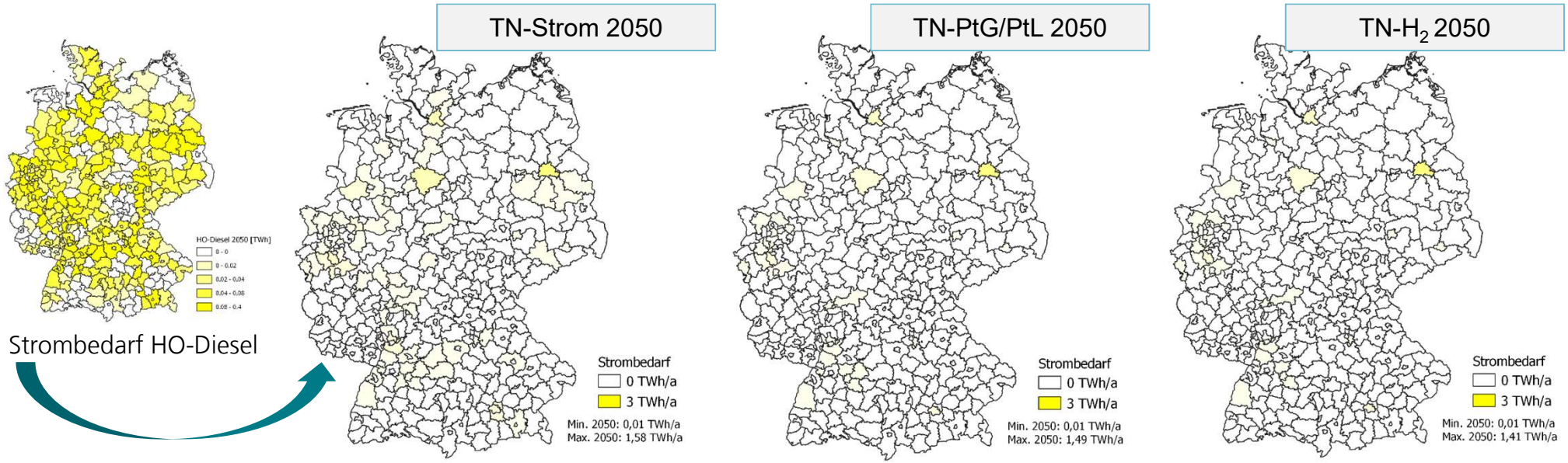
- TN-Strom enthält vergleichsweise hohen Anteil an biogenem Dieselkraftstoff, da Oberleitungs-Fahrzeuge abseits der Oberleitung mit konventionellem Motor betrieben werden. Oberleitungs-Batterie-Fahrzeuge sind aufgrund hoher Investitionen vergleichsweise unattraktiv
- Falls FCEV kostengünstig zur Verfügung gestellt werden können und eine entsprechende Infrastruktur zur Verfügung steht, bieten FCEV das höchste Reduktionspotenzial für Dieselkraftstoffe

Ergebnisse alle Nfz: Deutliche Reduktionen des Endenergiebedarfs durch Flottenumstellung ab 2030



- Schwere Nutzfahrzeuge tragen zu etwa 2/3 zum Endenergiebedarf der Nutzfahrzeuge bei
- Deutliche Reduktionen werden nach 2030 durch die nahezu vollständige Flottenumstellung erreicht
- In allen Szenarien entsteht für leichte und mittlere Nutzfahrzeuge ein elektrischer Endenergiebedarf, im Szenario TN-Strom wird dieser durch die Nachfrage durch schwere Nutzfahrzeuge erhöht

Ergebnisse: In TN-H_2 und TN-PtG/PtL Strombedarf durch leichte und mittlere Nfz, in TN-Strom auch schwere Nfz

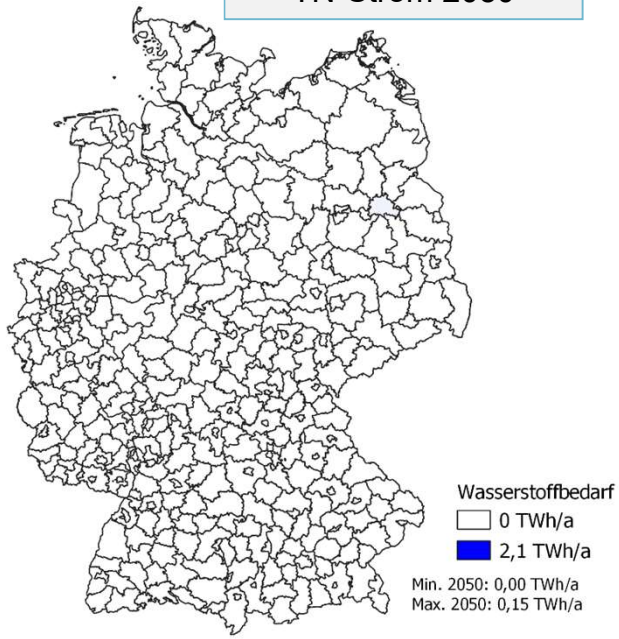


- Regional entsteht in allen Szenarien ein Strombedarf durch leichte und mittlere Nutzfahrzeuge
- In den Szenarien TN-H_2 und TN-PtG/PtL entsteht Bedarf vor allem in dicht besiedelten Gebieten
- Im Szenario TN-Strom entstehen weitere Bedarfe vor allem entlang der Autobahnen durch den Einsatz elektrischer Fahrzeuge im Langstreckenverkehr

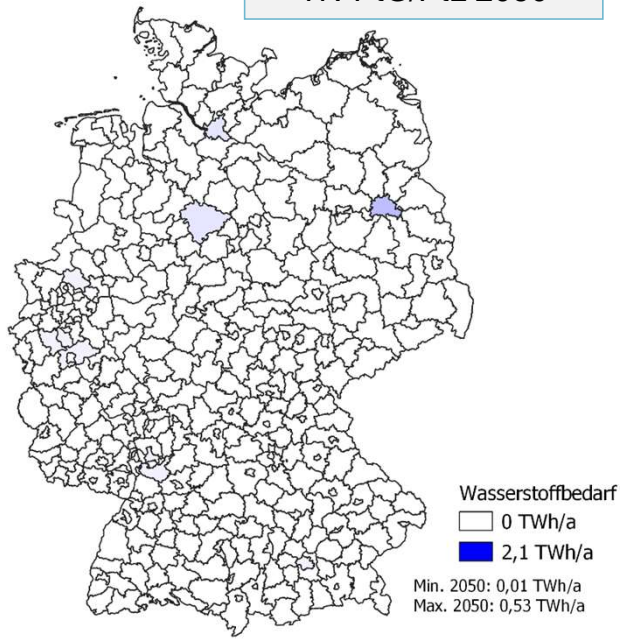
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU Berlin E&R Energy and Resources

Ergebnisse: Wasserstoff wird im Szenario TN-H_2 regional in relevanten Mengen nachgefragt.

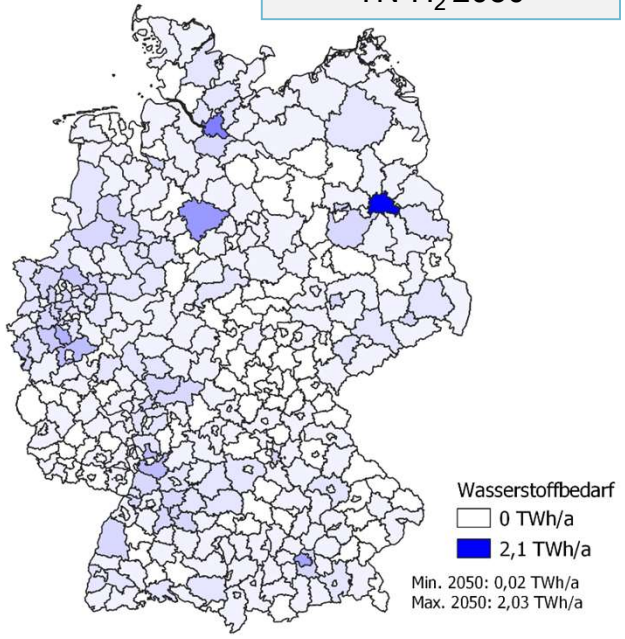
TN-Strom 2050



TN-PtG/PtL 2050



TN-H_2 2050



- Wasserstoff für Lkw im Szenario TN-H_2 in relevanten Mengen nachgefragt; Nachfrage teilweise regional höher als bei Pkw
- Wasserstoff primär relevant für schwere Nutzfahrzeuge, daher kaum Nachfrage in den Szenarien TN-Strom und TN-PtG/PtL
- Stärkere Bündelung auf einzelne Regionen vorstellbar

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

Verschärfung: Förderung und Regulierung können die Umstellung auch vor 2030 weiter beschleunigen

- Optionen zur weiteren Beschleunigung der Flottenumstellung aus Modellperspektive:
  - Förderung
    - (Teilweise) Erstattung von Mehrkosten für alternative Antriebe bei Nutzfahrzeugen
    - Aufbau von Ladeinfrastruktur, insbesondere für die Langstreckennutzung von Lkw
    - Unterstützung der Fahrzeugentwicklung, beispielsweise durch Demonstrationsprojekte
  - Regulierung
    - Herstellerziele zur Erweiterung der Produktpalette absichern: ambitionierte Flottengrenzwerte / Mindestquoten für alternative Antriebe
- Erwartete Auswirkungen:
  - Stärkere Flottenumstellung bereits vor 2030

Agenda

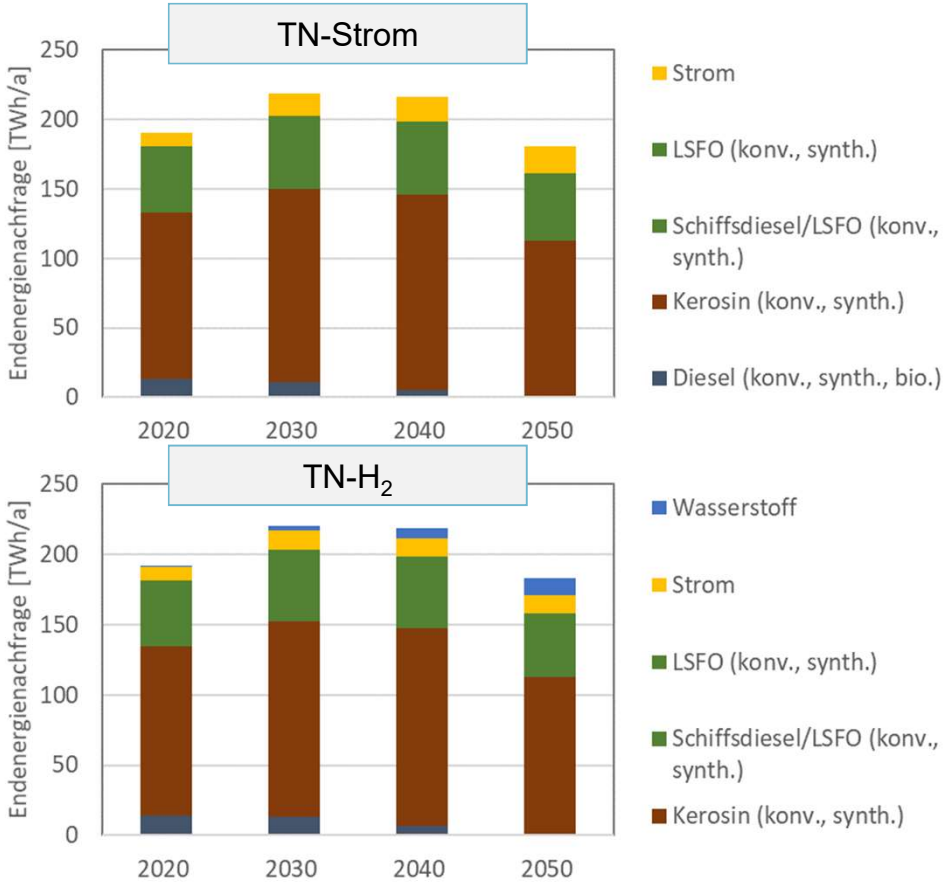
- Einführung
  - Einordnung in Langfristszenarien
  - Einführung Verkehrssektor: Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträger
  - Allgemeine Annahmen
  - Pkw: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Nfz: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - **Weitere Verkehrsträger**
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- *Diskussion*

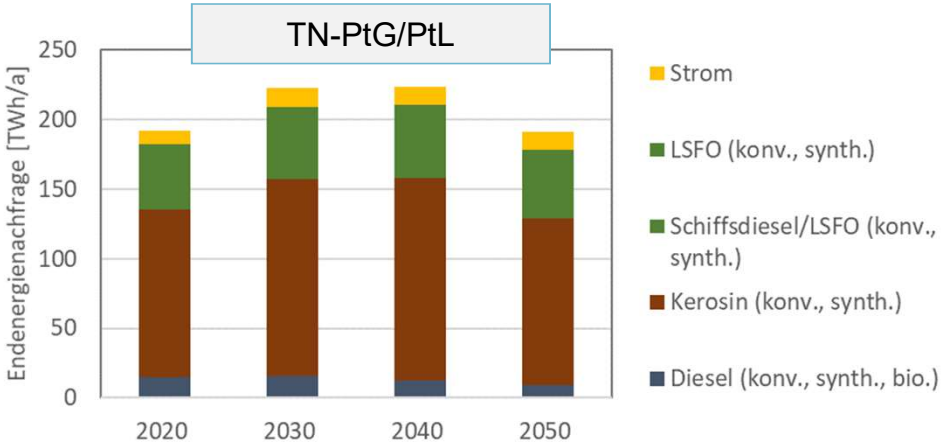
Annahmen: Weitere Verkehrsträger

- Antriebsunabhängige Annahmen:
  - Luftverkehr mit energieeffizientem Design und verbessertem Vortriebswirkungsgrad ab 2025 → Effizienzverbesserung um 35% im Jahr 2050 im Vergleich zu 2020
  - Hochseeverkehr mit deutlichen Vorgaben zur Effizienzverbesserung auch durch organisatorische Anpassung (Slow Steaming, reduzierte Umlaufzeiten in Häfen, Weatherrouting,...), so dass rund 40% Effizienzverbesserung im Bestand im Jahr 2050 ggü. heute möglich sind.
  - Im Schienenverkehr Effizienzverbesserung von 3% in 10 Jahren.
- Durchdringung alternativer Antriebe:

Verkehrsträger	TN-Strom	TN-PtG/PtL	TN-H2
Luftverkehr	Nationaler Luftverkehr mit Strom	Alles mit BtL / PtL	Nationaler Luftverkehr mit H2
Hochseeverkehr	Alles mit BtL / PtL	Alles mit BtL / PtL	Alles mit BtL / PtL
Binnenschifffahrt	20% Strom durch Hybridsysteme	Alles mit BtL / PtL	Alles mit H2
Schiene	Heutige Dieselloks durch Batteriezüge ersetzt	Heutige Dieselloks mit BtL / PtL	Heutige Dieselloks werden durch Brennstoffzellenzüge ersetzt
Busverkehr	100% elektrisch	50% elektrisch (in Städten wg. lokalen Emissionen), 50% mit BtL / PtL	50% elektrisch (Kurzstrecke und Start-Stop), 50% mit H2

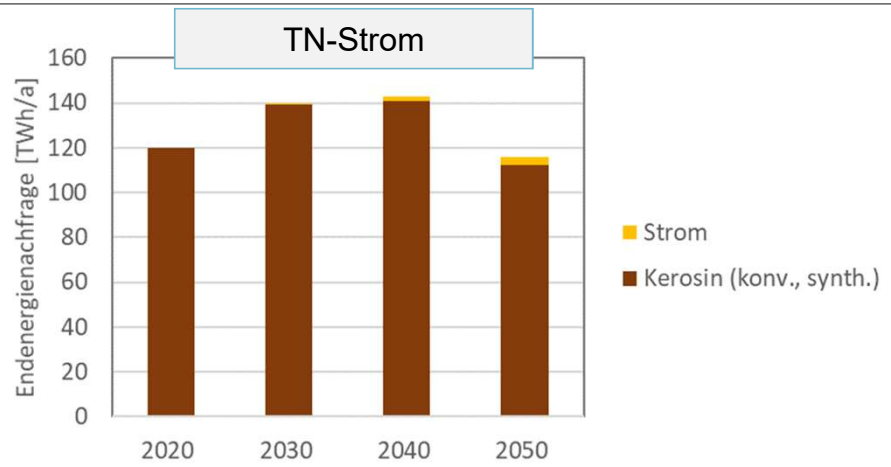
Ergebnisse: Weitere Verkehrsträger unterscheiden sich in den Szenarien in Summe nur unwesentlich

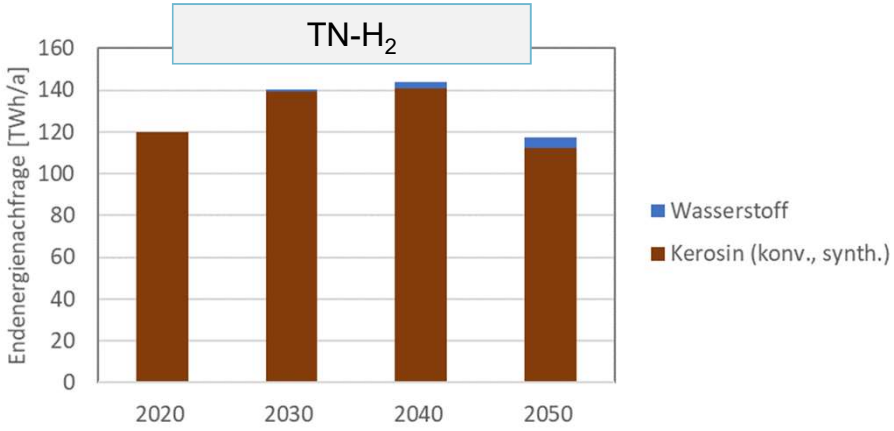


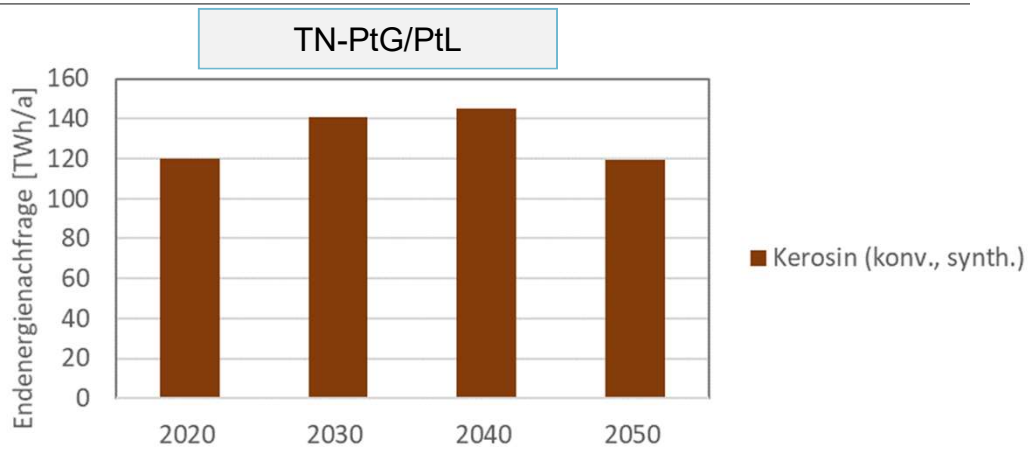


- Kerosin und Schiffsdiesel / LSFO (Low Sulfur Fuel Oil) für Hochsee- und Binnenschiffe aus erneuerbaren Quellen dominieren die weiteren Verkehrsträger
- Strom kommt im Bus- und Bahnverkehr zum Einsatz

Ergebnisse: Im Luftverkehr unterscheiden Annahmen zum innerdeutschen Verkehr die Szenarien



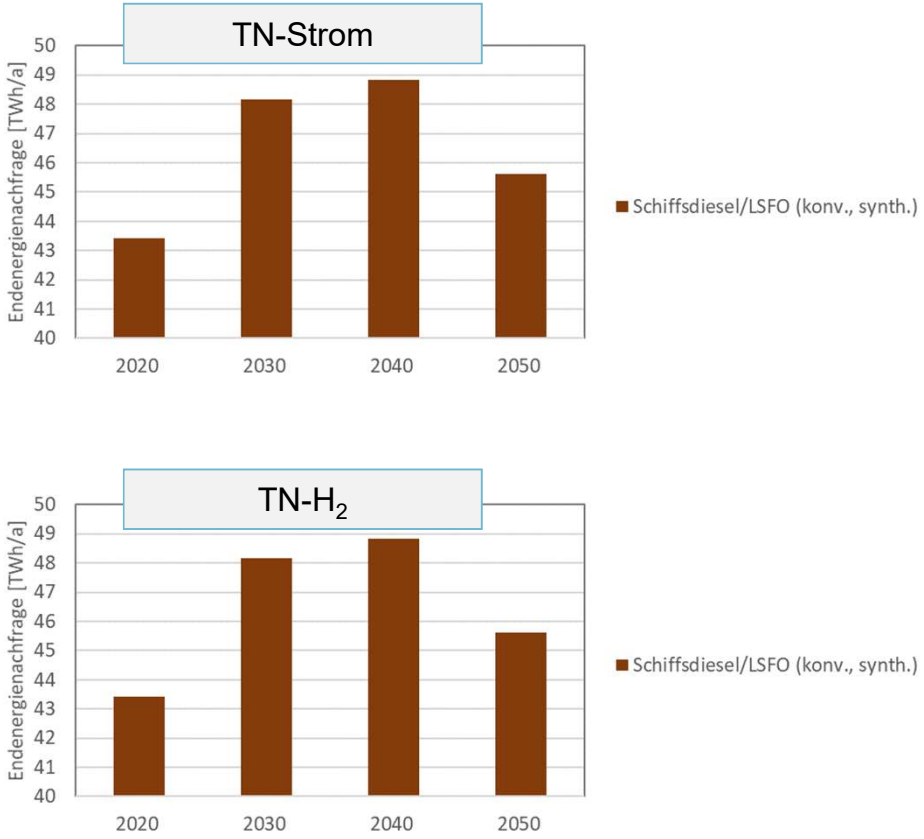


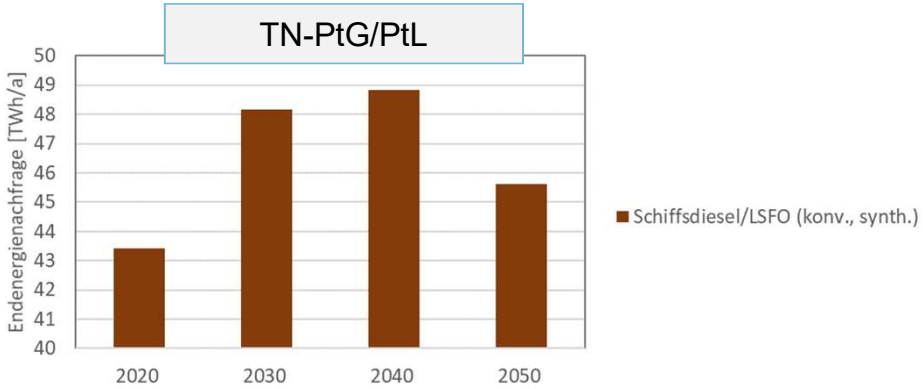


- Kerosin dominiert auch 2050 die Luftfahrt; Kerosin dann aus erneuerbaren Quellen
- Strom und Wasserstoff kommen nur im nationalen Luftverkehr bis 2050 in Frage

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

Ergebnisse: Im Hochseeverkehr unterscheiden sich die Szenarien nicht

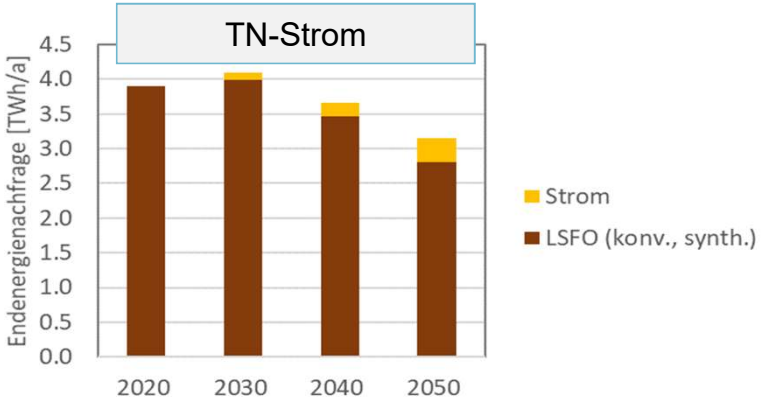


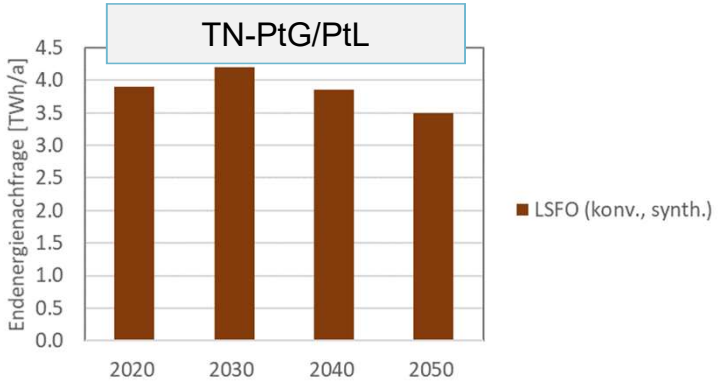


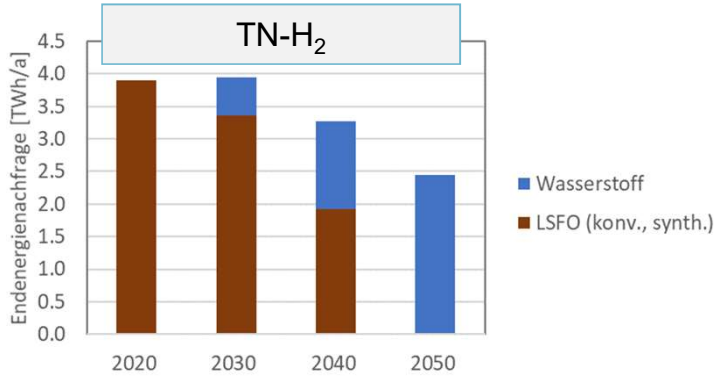
- Die Speicherung von Strom und Wasserstoff in Batterien und Wasserstofftanks begrenzt deren Einsatz auf sehr geringe Reichweiten.
- Strom und Wasserstoff ist daher im Hochseeschiffsverkehr nur sehr bedingt möglich und daher unwirtschaftlich.

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

Ergebnisse: In der Binnenschifffahrt können nur bedingt elektrische Schiffe eingesetzt werden

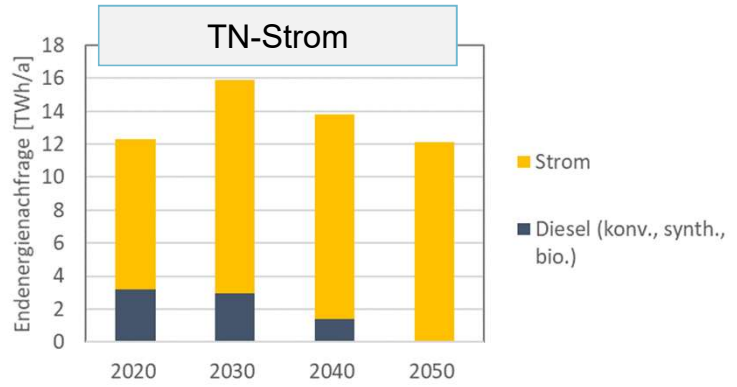


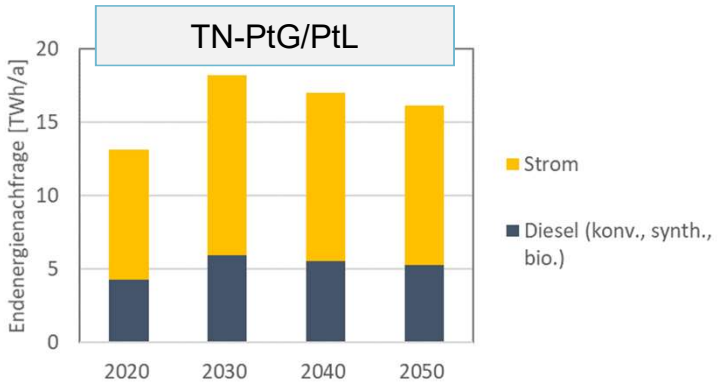


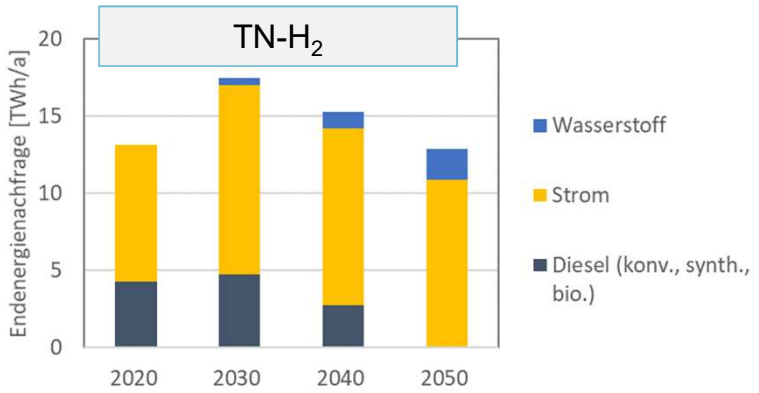


- Elektrische Schiffe auch in TN-Strom nur mit maximal 20% Marktanteil aufgrund der beschränkten Reichweite
- Wasserstoff könnte LSFO vollständig ersetzen

Ergebnisse: Im Schienenverkehr können die 10% der heute mit Diesel gefahrenen Kilometer ersetzt werden



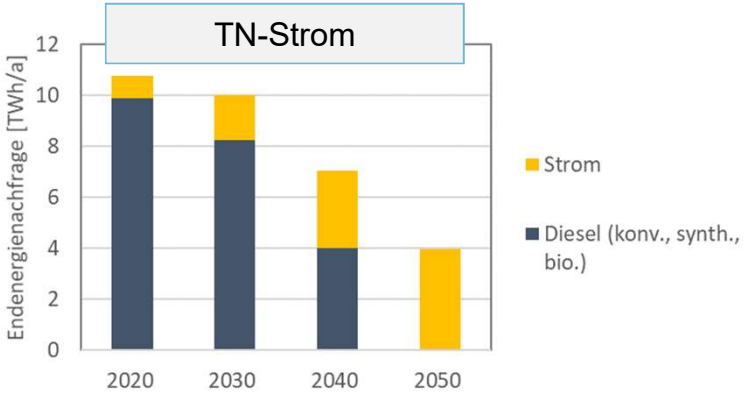


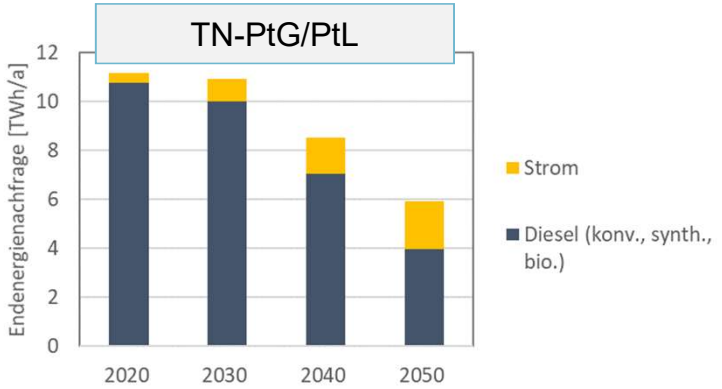


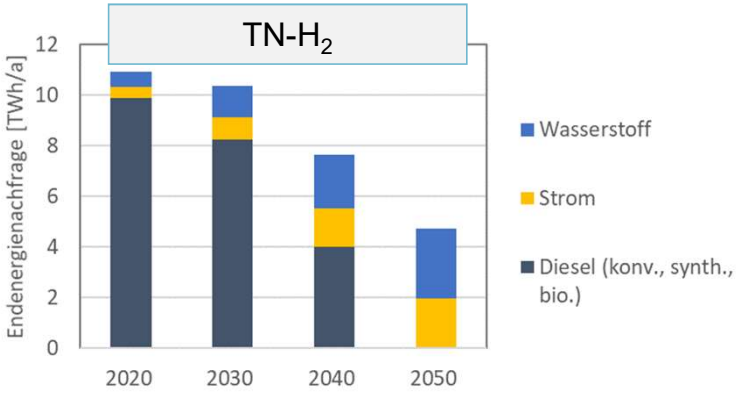
- 10% der Schienenkilometer sind heute mit Diesel betrieben und können vollständig ersetzt werden
- Strom oder Wasserstoff können beides Alternativen zu synthetischem Diesel sein.

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

Ergebnisse: Im Busverkehr ist eine Teilelektrifizierung immer Teil der Lösung





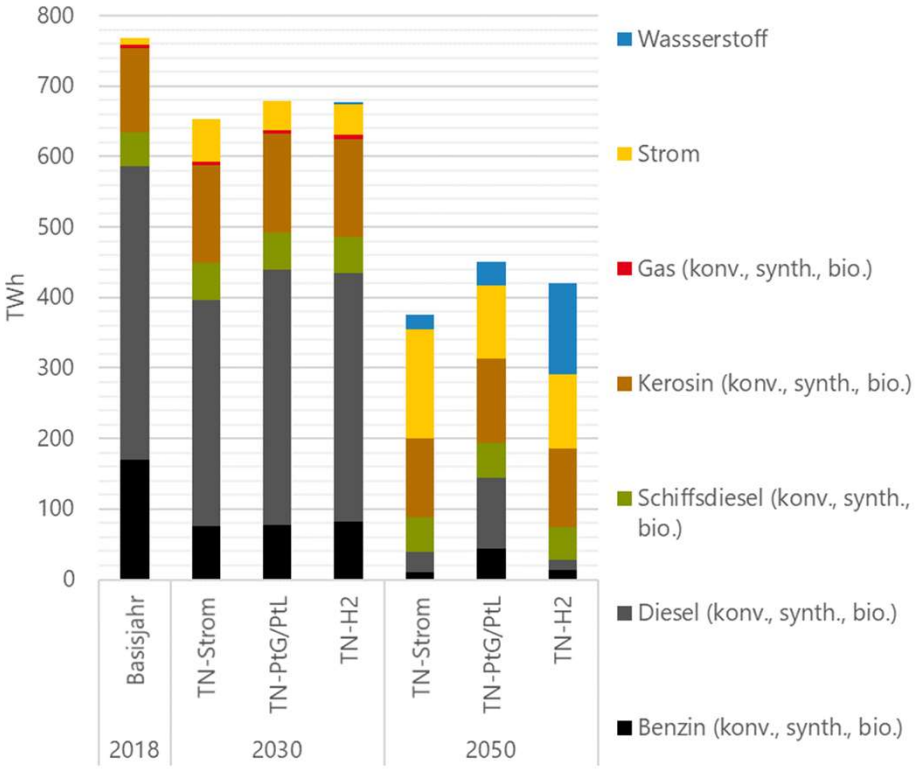


- Elektrische Busse sind aufgrund der Synergien zu Pkw und Lkw Teil aller Lösungen
- Langstrecken- oder Überlandbusse könnten auch mit Wasserstoff oder synthetischem Diesel angetrieben werden

Agenda

- Einführung
  - Einordnung in Langfristszenarien
  - Einführung Verkehrssektor: Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträger
  - Allgemeine Annahmen
  - Pkw: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Nfz: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Weitere Verkehrsträger
- **Zusammenfassung und zentrale Botschaften**
- *Diskussion*

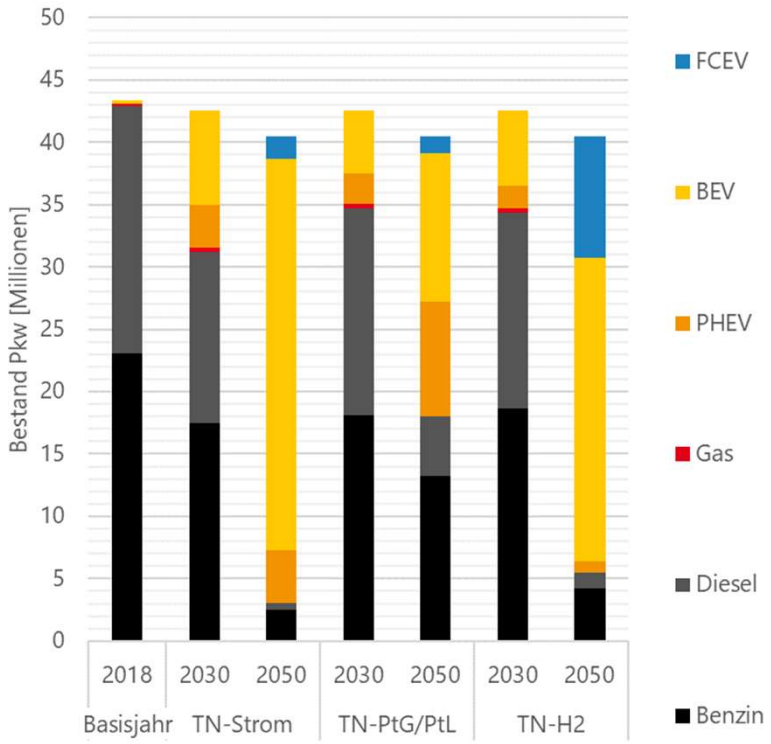
Zusammenfassung und zentrale Botschaften: Trend zu Elektromobilität robust



- **Ergebnisse**
  - Rückgang des Endenergiebedarfs im Verkehr bis 2050, je nach Szenario, zwischen 42 % und 52 %.
  - Für Pkw und leichte Lkw setzt sich in allen Szenarien Elektromobilität durch. Die Dekarbonisierung schwerer Lkw erfolgt abhängig vom Szenario mit Strom, Wasserstoff oder synthetischem Dieselkraftstoff.
  - Der internationale Flug- und Schiffsverkehr bleibt aus heutiger Sicht auf synthetische oder biogene Kraftstoffe angewiesen.
- **Einordung**
  - Ambitionierte Maßnahmen, z.B. Grenzwertverschärfungen oder Fahrverbote, können die Flottenumstellung weiter beschleunigen.
  - Methangas kann unter günstigen politischen Bedingungen, z.B. für Lkw, eine Rolle spielen.
- **Schlussfolgerung**
  - Förderung strombasierter Antriebe für Pkw/Lkw ist zielführend.
  - Für Schiffe und Flugzeuge sind Effizienzsteigerungen kurzfristig die einzige Vermeidungsoption. Mittelfristig müssen Alternativen, z.B. BtL und PtL, weiterentwickelt werden.

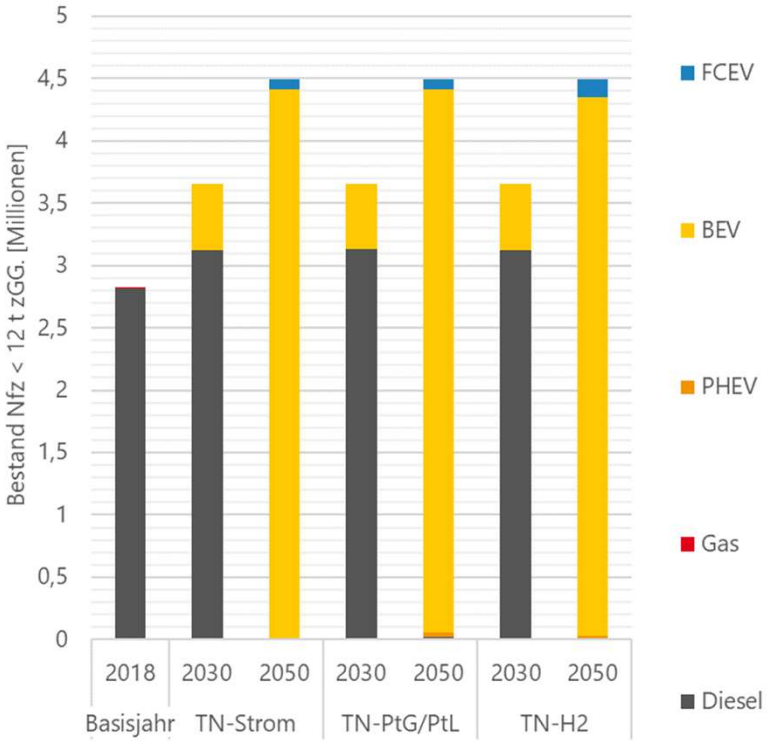
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU Berlin E&R Energy and Resources

Pkw: Elektrofahrzeuge dominieren in allen Szenarien die Pkw-Flotte und reduzieren den Endenergiebedarf deutlich



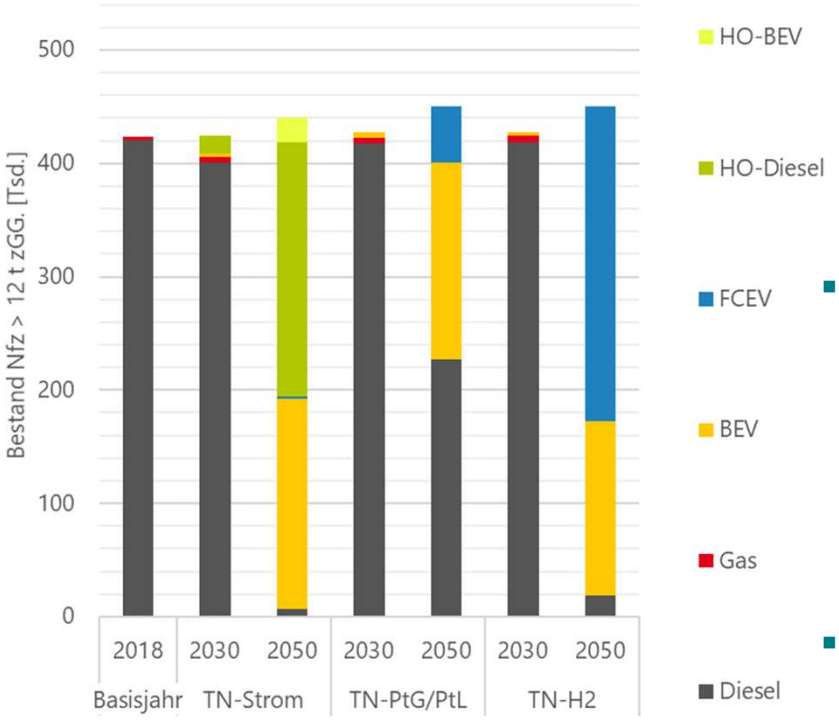
- **Ergebnisse**
  - Elektrofahrzeuge stellen 2050 88 % (TN-Strom), 52 % (TN-PtG/PtL) oder 62 % (TN-H_2-G) des Pkw-Bestandes.
  - Diesel- und Benzinfahrzeuge werden in den Szenarien TN-Strom und TN-H_2-G 2050 nicht neu zugelassen, es verbleiben jedoch kleine Restbestände.
  - Brennstoffzellenfahrzeuge kommen längerfristig für Langstreckenfahrer in Frage, konkurrieren jedoch mit Plug-in Hybriden. Ihr Marktanteil ist aufgrund geringer Stückzahlen unsicher.
  - Der Endenergiebedarf geht um bis zu 70 % zurück.
- **Einordung**
  - Hoher Anteil batterieelektrischer Pkw auch unter verschiedenen Annahmen.
  - Es wird von ambitionierten Effizienzsteigerungen ausgegangen.
- **Schlussfolgerung**
  - Ladeinfrastrukturausbau für Pkw ist in jedem Szenario sinnvoll.
  - Effizienzsteigerungen und alternative Antriebe ermöglichen eine deutliche Reduktion des Energiebedarfs für Pkw.

Leichte und mittlere Nutzfahrzeuge: Elektrofahrzeuge dominieren



- **Ergebnisse**
  - Langfristig nahezu vollständige Elektrifizierung in allen Szenarien, da hohe aber gleichmäßige Fahrleistung Amortisation der im Vergleich zum Diesel teureren batterieelektrischen Fahrzeuge begünstigt.
  - Wasserstofffahrzeuge werden im Einzelfall bei hohen Reichweitenanforderungen genutzt.
- **Einordung**
  - Hoher Anteil batterieelektrischer Lkw auch unter verschiedenen Annahmen.
  - Die Rolle von Wasserstofffahrzeugen hängt davon ab, ob Fahrzeuge auch bei kleinen Stückzahlen verfügbar sind.
- **Schlussfolgerung**
  - Ladeinfrastrukturausbau für leichte und mittlere Nutzfahrzeuge ist in jedem Szenario sinnvoll.
  - Effizienzsteigerungen und alternative Antriebe ermöglichen eine deutliche Reduktion des Endenergiebedarfs.

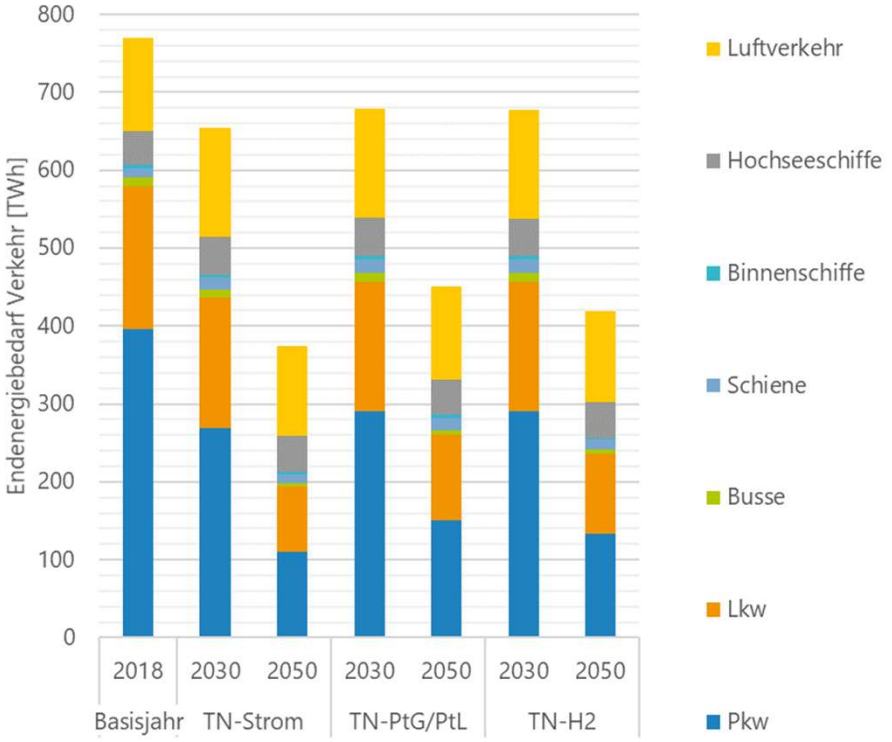
Schwere Nutzfahrzeuge: Verfügbare Infrastruktur ist entscheidender Faktor für Antriebswahl in den Szenarien



- **Ergebnisse**
  - Bei schweren Nutzfahrzeugen dominieren operative Kosten: Wenn technisch möglich, ist Strom langfristig die günstigste Alternative.
  - Der Langstreckenverkehr ist abhängig von der verfügbaren Infrastruktur, z.B. der Oberleitung im Szenario TN-Strom.
  - Wasserstoff kann, falls Fahrzeuge in großer Stückzahl günstig angeboten werden, eine Alternative für die Langstrecke sein.
- **Einordung**
  - Für das Szenario TN-H_2-G wurden massive Preisreduktionen auf Fahrzeugseite unterstellt.
  - Oberleitungs-Lkw stehen im Szenario TN-Strom stellvertretend für elektrische Lkw mit Lademöglichkeit. Eine ähnliche Elektrifizierung ist evtl. auch mit Schnellladestationen erreichbar. Nur bei Nichtverfügbarkeit dieser Lösung (u.a. wegen Einführungshürden oder Akzeptanzproblemen) kommen andere Antriebsarten ins Spiel.
- **Schlussfolgerung**
  - Auf Kurzstrecke werden zukünftig vermutlich elektrische Lkw eingesetzt.
  - Auf der Langstrecke entscheiden u.a. die verfügbare Infrastruktur und weitere technische Entwicklungen über die genutzte Technologie.

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

Weitere Verkehrsträger: Bedeutung von Luft- und Schifffahrt für Endenergiebedarf steigend



Ergebnisse

- Rückgang des Endenergiebedarfs im Verkehr bis 2050, je nach Szenario, zwischen 42 % und 52 %.
- In allen Szenarien deutliche Reduktionen bei Pkw und Lkw durch den Einsatz von Strom, Wasserstoff sowie Effizienzsteigerungen.
- Luftverkehr sowie Hochseeschifffahrt nutzen in allen Szenarien nur zu kleinen Teilen alternative Antriebe (Kurzstrecke). Im internationalen Bereich dominieren 2050 synth. Kraftstoffe. Effizienzsteigerungen kompensieren die stark steigende Nachfrage nur teilweise, so dass ihr Anteil am Energiebedarf im Verkehr steigt.

Einordung

- Starke Effizienzsteigerungen im Straßenverkehr
- Erste Ansätze zum Einsatz von alternativen Antrieben in der Luft- und Schifffahrt werden nur für innerdeutsche Verkehre berücksichtigt.
- Auswirkungen von Corona auf die Luftfahrt sind unberücksichtigt.

Schlussfolgerung

- Für Schiffe und Flugzeuge sollten Alternativen, z.B. BtL und PtL, weiter erforscht und entwickelt werden.

Agenda

- Einführung
  - Einordnung in Langfristszenarien
  - Einführung Verkehrssektor: Methodik und Modelle
- Verkehrsnachfrage
- Ergebnisse nach Verkehrsträger
  - Allgemeine Annahmen
  - Pkw: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Nfz: Annahmen, Ergebnisse, Verschärfungen
  - Weitere Verkehrsträger
- Zusammenfassung und zentrale Botschaften
- ***Diskussion***

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Ansprechpartner:		
Projektleitung:	Dr. Frank Sensfuß	Frank.Sensfuss@isi.fraunhofer.de
Verkehr:	Prof. Dr. Martin Wietschel	Martin.Wietschel@isi.fraunhofer.de
	Dr. Michael Krail	Michael.Krail@isi.fraunhofer.de
	Daniel Speth	Daniel.Speth@isi.fraunhofer.de
	Dr. Till Gnann	Till.Gnann@isi.fraunhofer.de

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU Berlin E3R Energy and Resources