

MARKTPOTENTIALIALE VON HYBRID- OBERLEITUNGS-LKW IN DEUTSCHLAND

André Kühn, Till Gnann, Patrick Plötz und Martin Wietschel
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI



Projektübersicht

MKS-Hybrid-Oberleitungs-Lkw

- „Hybrid-Oberleitungs-Lkw: Potenziale zur Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs“
- Projekt innerhalb der **Mobilität und Kraftstoffstrategie (MKS-II)**
- Laufzeit: **10/2015 bis 09/2016**
- Projektpartner:
 - PTV AG** (Volker Waßmuth, Daniela Paufler-Mann, Werner Balz, Helmut Frik)
 - Fraunhofer IML** (Sebastian Stütz, David Rüdiger, Maximilian Schellert)
 - TUHH** (Anne Rödl) sowie
 - M-Five** (Wolfgang Schade, Simon Mader)
- Zwei **Expertenworkshops**:
 - „Hybrid-Oberleitungs-Lkw: Potenziale zur Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs“ (März 2016)
 - „Auswirkungen auf die Energiewirtschaft“ (Mai 2016)

Agenda

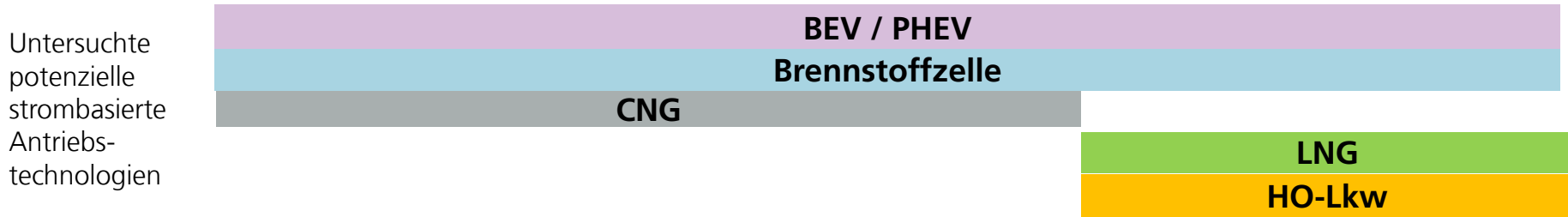
1. Hintergrund und Motivation
2. Vorgehen im Projekt
3. Zentrale Ergebnisse
4. Fazit, Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Agenda

1. **Hintergrund und Motivation**
2. Vorgehen im Projekt
3. Zentrale Ergebnisse
4. Fazit, Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Kennzahlen und untersuchte strombasierte Antriebstechnologien

Größenklasse	GK1	GK2	GK3	GK4	Sattelzüge
Zul. GGW [t]	[0 ; 3,5t]	(3,5t ; 7,5t)	(7,5t ; 12t)	(12t ; 26t)	40t
Ø JFL* [km/a]	ca. 13 Tsd.	ca. 27 Tsd.	ca. 66 Tsd.	ca. 74 Tsd.	ca. 106 Tsd.
Bestand [Fzg.]	ca. 2 Mio.	ca. 262 Tsd.	ca. 77 Tsd.	ca. 161 Tsd.	ca. 183 Tsd.
Fahrleistung [Fzg.-km/a]	26 Mrd.	7,1 Mrd.	5,1 Mrd.	11,9 Mrd.	19,4 Mrd.
CO ₂ -Emission ¹ WTW [g/Fzg.-km]	241	431	594	781 ²	1.016
CO ₂ -Emission WTW [Mio. tCO ₂ /a]	6,3	3,0	3,0	9,3	19,7
Energiebedarf TTW [TWh/a]	19,0	9,2	9,1	28,1	59,5



1) Ø alle Straßenkategorien, Euro-VI, Auslastung 50%

2) mit dem Bestand gewichtetes Mittel aus 'LKW >14-20t' und 'LKW >20-26t'

* Jahresfahrleistung

Quelle: KBA (2013), FZ 25 und VD3; HBEFA 3.1 sowie Stichprobe Gebrauchtfahrzeuge (truckscout24)

Differenzierung bei HO-Lkws

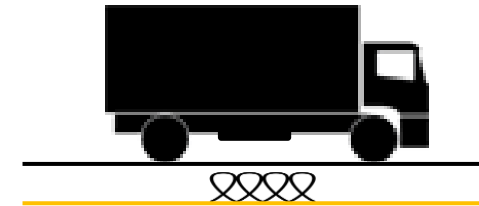
Oberleitungs-Lkw



Stromschienen-Lkw



Induktiv geladener-Lkw



Zwei denkbare Ausführungsvarianten

Elektromotor und
Traktionsbatterie 200 kWh

Serieller Diesel-Hybrid mit kleiner
Traktionsbatterie (~1 kWh)

Sind Oberleitungs-Lkws ein sinnvoller Weg? Gibt es bessere Alternativen?

- Systeme mit oberleitungsgebundenen elektrischen Betrieb von schweren Nutzfahrzeugen auf vielbefahrenen Autobahnen.
- I.d.R. Hybridantriebe (elektrischen Antrieb, konventioneller Antrieb, Batterien zum Zwischenspeichern)



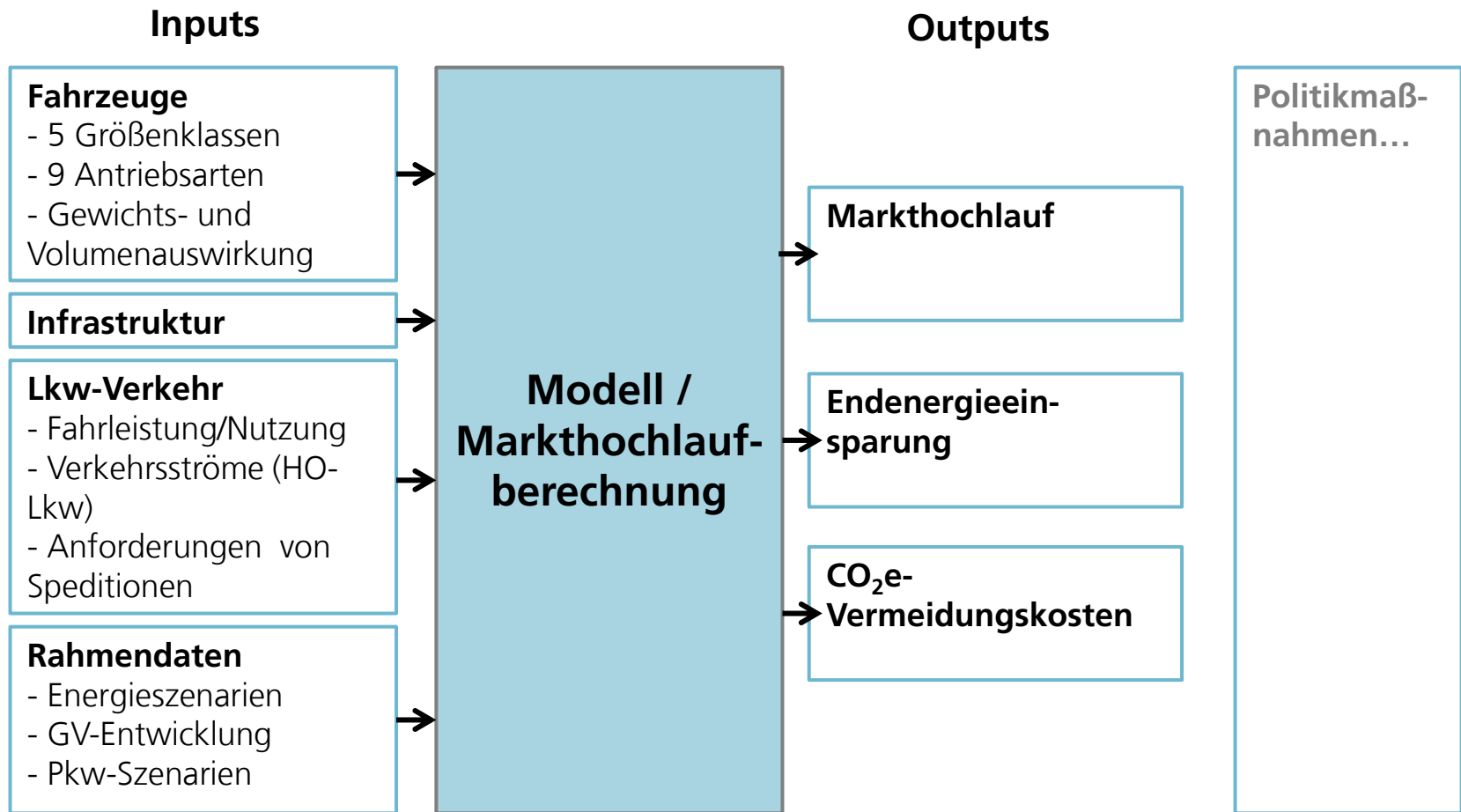
Kontroverse Diskussion:

- „Henne-Ei-Problem“ (Geschäftsmodell, Betreibermodelle)
- Technische Herausforderungen
- Fehlen detaillierterer Wirtschaftlichkeitsrechnungen
- Grenzüberschreitender Verkehr
- Standardisierung
- Rechtliche & sicherheitsrelevante Fragen
- Fahrzeugangebot
- Alternativen (z.B. Umstieg Schiene)
- Akzeptanz
 - Bevölkerung
 - Nutzer
-

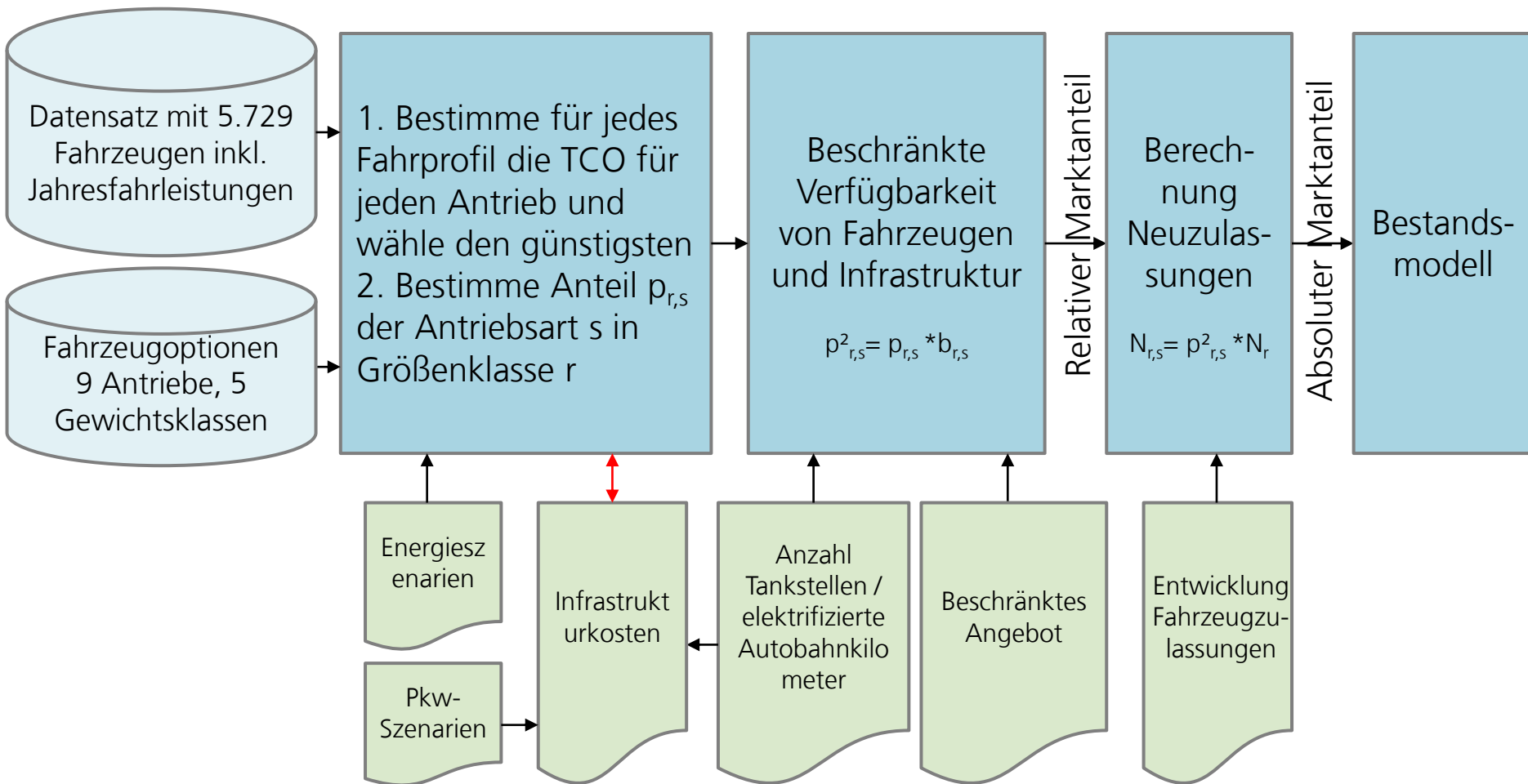
Agenda

1. Hintergrund und Motivation
- 2. Vorgehen im Projekt**
3. Zentrale Ergebnisse
4. Fazit, Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Ziel ist die Erstellung eines TCO-Modells, das alle relevanten Inputs berücksichtigt



Überblick Modell



Daten & Parameter

Daten

- **Stichprobe von Nutzfahrzeugen** auf Basis der KiD → **Stichprobengröße etwa 6.000 Fzg.** in sieben Gewichtsklassen (Aufbauarten: Seitenplaner, Kühlkoffer, Wechselbrücke, Kipper); Ermittlung der **Jahresfahrleistungen** auf Basis der Tachostände

Parameter

- Parameterliste für verschiedene Antriebsarten:
 - Fraunhofer IML: HO-Lkw, Gas-Lkw
 - PTV AG: HO-Infrastruktur
 - Fraunhofer ISI: BEV, PHEV, FCEV, Konsistenzprüfung
- Besprechung der wichtigsten Parameter auf Workshop am 01.03.2016

Systemgrenzen und wichtige Annahmen

Neuzulassungen nach Größenklassen (deutsche Neuzulassungen)

Relevant für HO-Lkw

Jahr	GK1 (<3,5t)	GK2 (3,5-7,5t)	GK3 (7,5-12t)	GK4* (12-26t)	SZM*
Neuzulassungen 2015	228.000	18.000	9.000	6.200	34.000
Neuzulassungen 2030	278.000	18.000	10.000	6.200	39.950
Nutzungsdauer	8	12	10	10	6
Bestand 2030	2.224.000	216.000	100.000	62.000	239.700

* Ohne Baufahrzeuge aufgrund von Spezialaufbauten und geringer Autobahnnutzung.

Energieträgerpreise**

Jahr	Dieselpreis	Gaspreis	Strompreis Industrie	Strompreis Gewerbe	Wasserstoff- preis
2015	0,98 €/l	0,87 €/kg	0,14 €/kWh	0,21 €/kWh	8,60 €/kg
2030	1,53 €/l	1,11 €/kg	0,16 €/kWh	0,22 €/kWh	5,00 €/kg

** Alle Preise ohne MwSt.

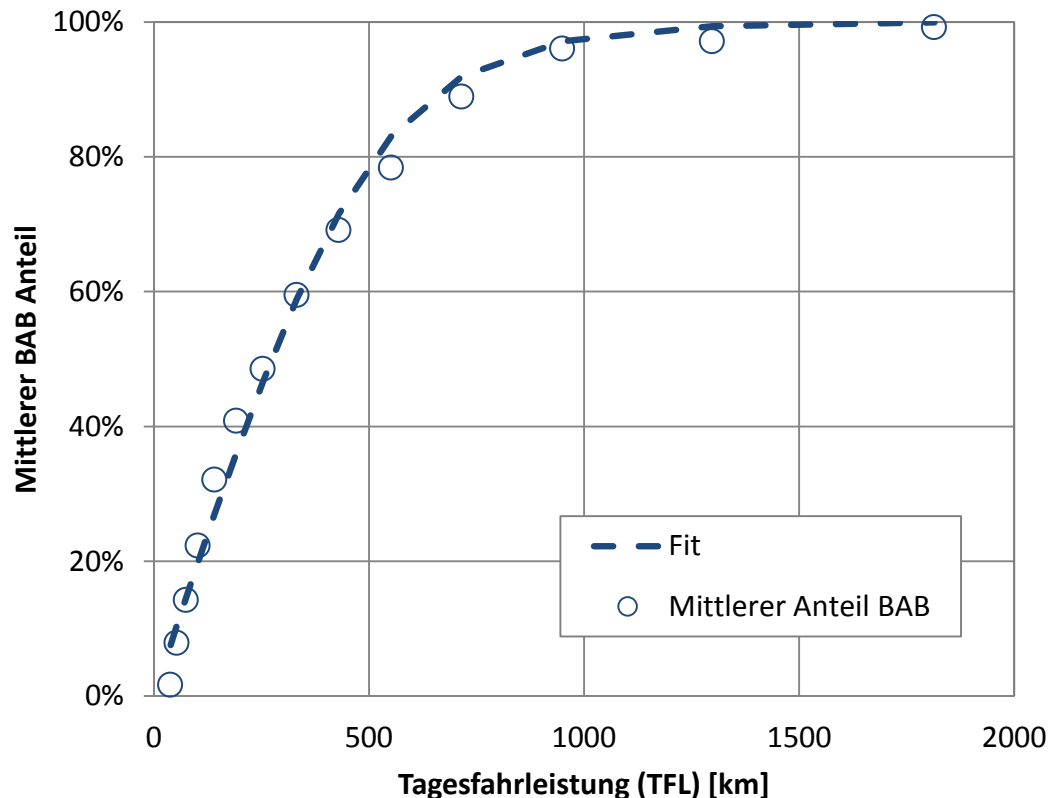
Besonderheiten der Fahrzeuge und resultierende Zusatzannahmen

Im Jahr **2015** steht **keine Oberleitung** zur Verfügung und **BEV und PHEV können nicht nachladen**.

Für die verschiedenen Fahrzeuge werden **für 2030** folgende **Zusatzannahmen** getroffen:

- **HO-Lkw**: Anteil des Fahrens an der Oberleitung hängt davon ab,
 - ob das Fahrzeug viel auf der Autobahn fährt (= **individueller Autobahnanteil**)
 - welche Menge an Autobahn elektrifiziert ist (= **HO-Ausbau**)
 - und mit welcher Wahrscheinlichkeit dieses Fahrzeug auf der elektrifizierten Autobahn unterwegs ist (= **DE-Anteil**)

Individueller Autobahnanteil

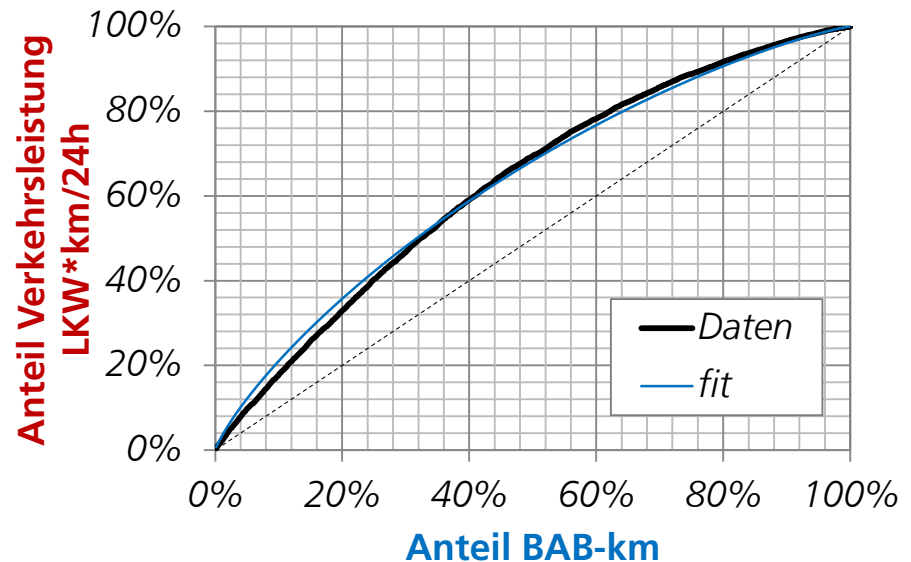
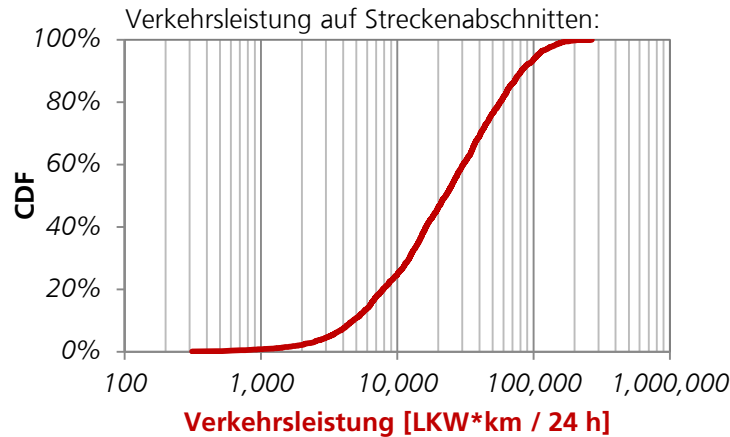


- „Je höher die Jahresfahrleistung, desto größer der Autobahnanteil“
→ Aber wie viel?
 - Auswertung von KiD2010 und Daten aus PTV Validate
- Der Autobahnanteil hängt schätzungsweise gemäß der Formel von der Tagesfahrleistung ab:

$$\text{BAB-Anteil} = 1 - \exp(-\text{TFL}/381)$$

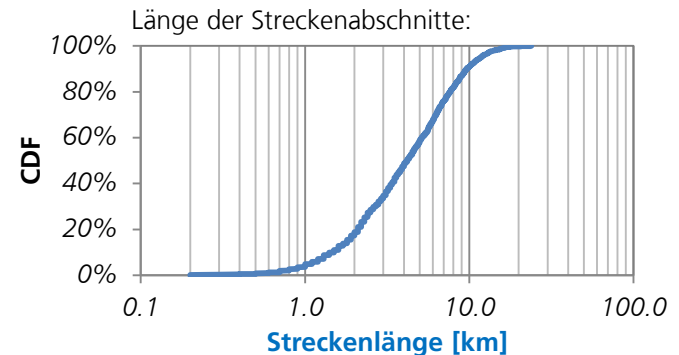
Berechnungen der PTV AG und Auswertung der KiD

Anteil elektrischer Verkehrsleistung bei festem Anteil elektrischer Autobahn?



- Vergl. Einkommensungleichheit
Hier: Gini = 0.37 (BRD 0.3, US 0.4, Brasilien 0.6)
- Datenbasis: manuelle Zählung BASt 2010 & Mauttabelle 2015
→ Belastung und Länge von 1900 BAB-Abschnitten
- Beispiele elektrisches Potenzial (gesamt 13.000 BAB-km):

Anteil elektr. BAB-km	0%	1%	5%	10%	20%	50%	80%
Anteil elektr. LKW-km	0%	3%	12%	21%	36%	68%	91%

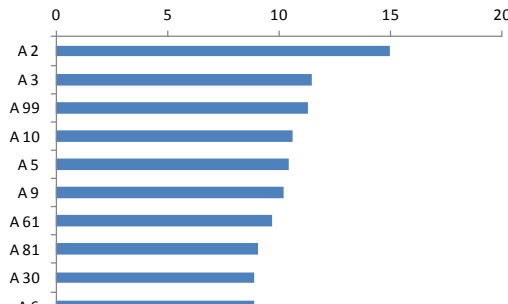


<http://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten-Downloads/2010/Manuelle-Zaehlung-2010.html> und <http://www.mauttabelle.de/maut.html> sowie Berechnungen der PTV AG

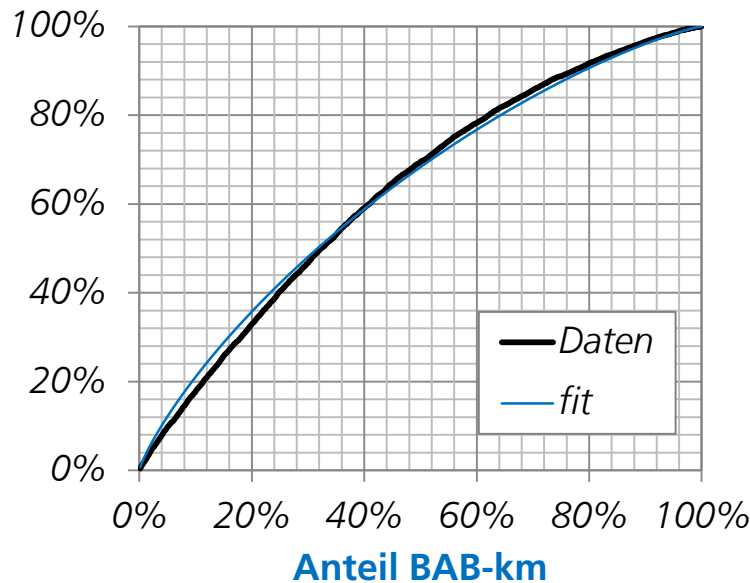
HO-Ausbau über Nutzen von Autobahnen



Mittelwert von Belastung [1000 LKW / 24 h]



Anteil Verkehrsleistung LKW*km/24h

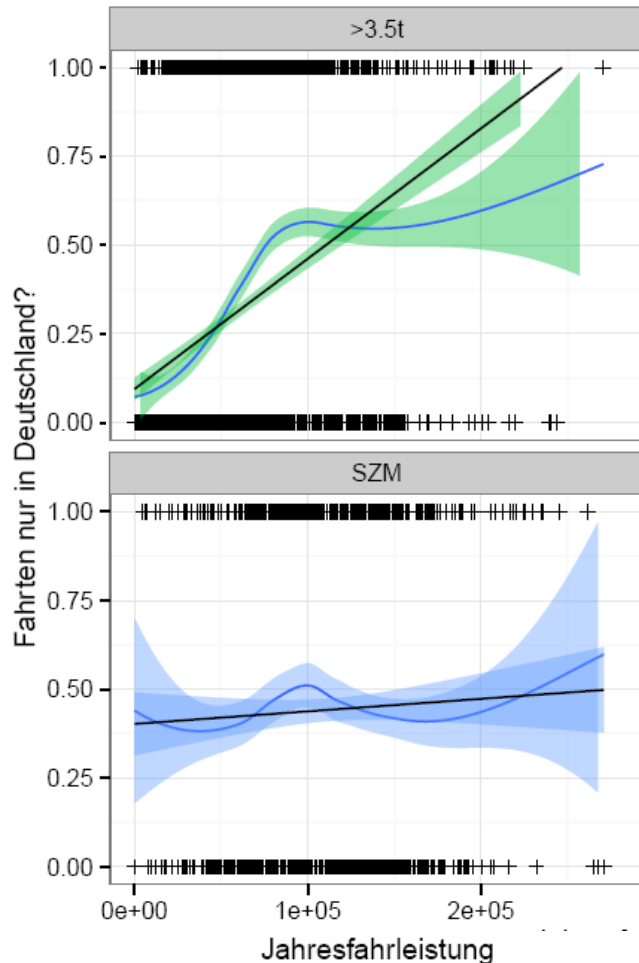


- Ausbau von verschiedenen Autobahnabschnitten hat unterschiedlichen Nutzen
 - Autobahnen mit höherer Belastung sollen zuerst elektrifiziert werden
 - Reihenfolge der Autobahnen wurde gebildet über (manuelle Zählung BASt 2010 & Mauttabelle 2015)
- Mit 30% Ausbau erreicht man 50% des Verkehrs
- Nutzen eines Ausbaus am Anfang hoch und über die Zeit abnehmend:

$$u_{BAB} = 1 - \Phi \left(\Phi^{-1} \left(1 - \frac{km_{el}}{12980} \right) - 1,19^2 \right)$$

<http://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten-Downloads/2010/Manuelle-Zaehlung-2010.html> und <http://www.mauttabelle.de/maut.html> sowie Berechnungen der PTV AG

DE-Anteil: Fahrten **nur** in Deutschland (über 90%)?



- Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass der HO-Lkw auf einer elektrifizierten Autobahn fährt?
- Auswertung von KiD2010 (Frage nach häufigstem Einsatzgebiet: Regional, National, International)
- Lkw mit geringen Fahrleistungen eher regional, mit sehr hohen Fahrleistungen eher international unterwegs
- Wahrscheinlichkeit für HO-Strecke analog mit DE-Anteil (steigt mit Jahresfahrleistung)

Fahrzeugtyp	Achsenabschnitt	Steigung (1e-6)
Nur Deutschland (Anteil > 90%)		
">3.5t"	0.094	3.672
"SZM"	0.398	0.402

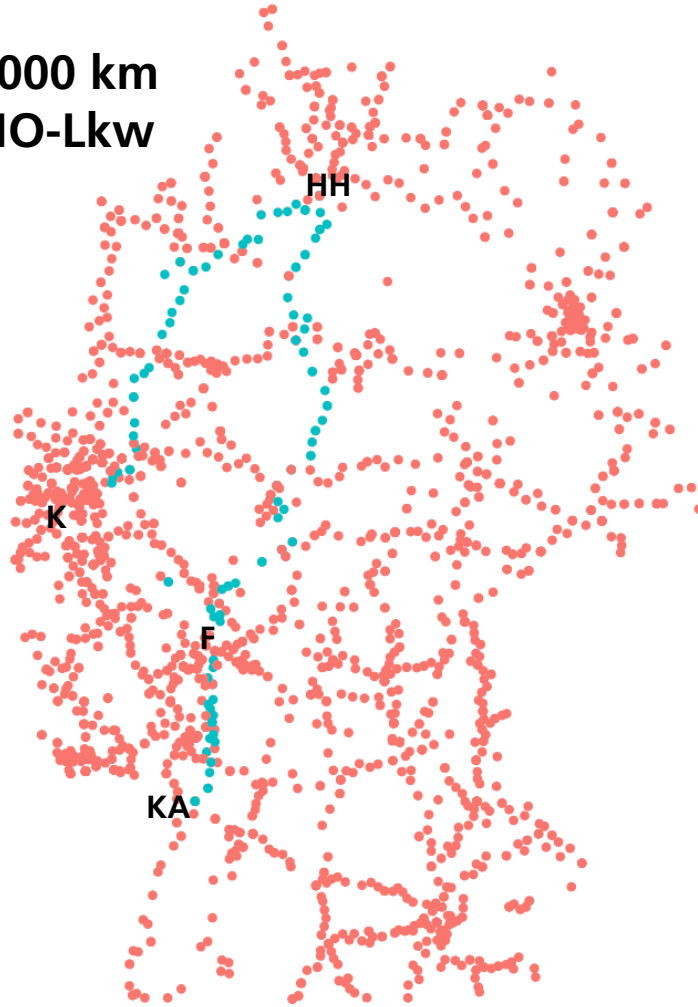
WVI, IVT, DLR, und KBA (2010). Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD2010). WVI Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH, Braunschweig, IVT Institut für angewandte Verkehrs und Tourismusforschung e. V., Heilbronn, DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Verkehrsforschung, Berlin, KBA Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg

Agenda

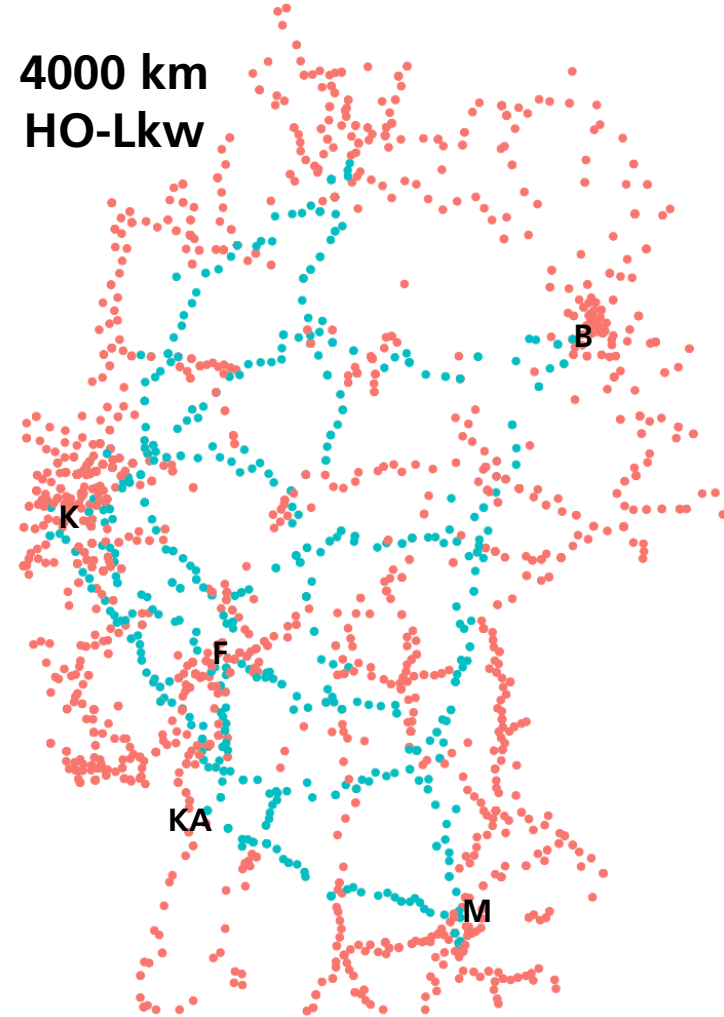
1. Hintergrund und Motivation
2. Vorgehen im Projekt
- 3. Zentrale Ergebnisse**
4. Fazit, Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Angenommener Ausbau der Elektrifizierung Autobahnen für HO-Lkw

1000 km
HO-Lkw

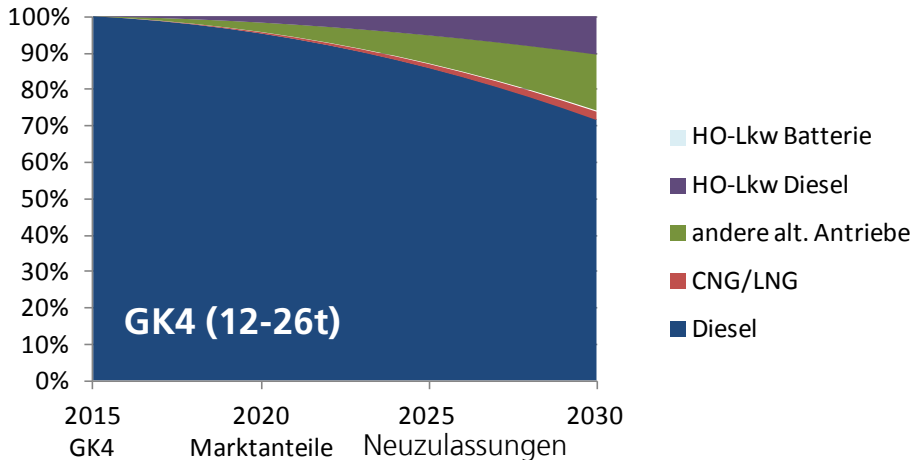


4000 km
HO-Lkw



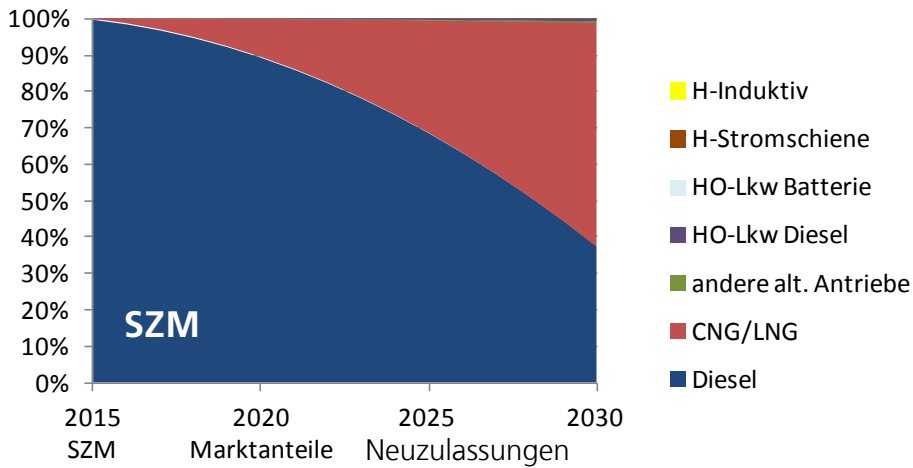
Basierend auf Berechnungen der PTV AG und des Fraunhofer ISI

Ergebnisse ab 12t mit HO-Infrastrukturausbau von **1000 Kilometern** bis 2030



GK4

- HO-Diesel Lkw ist mit 10% Marktanteil bei den Neuzulassungen vertreten
- Hauptkraftstoff bleibt Diesel

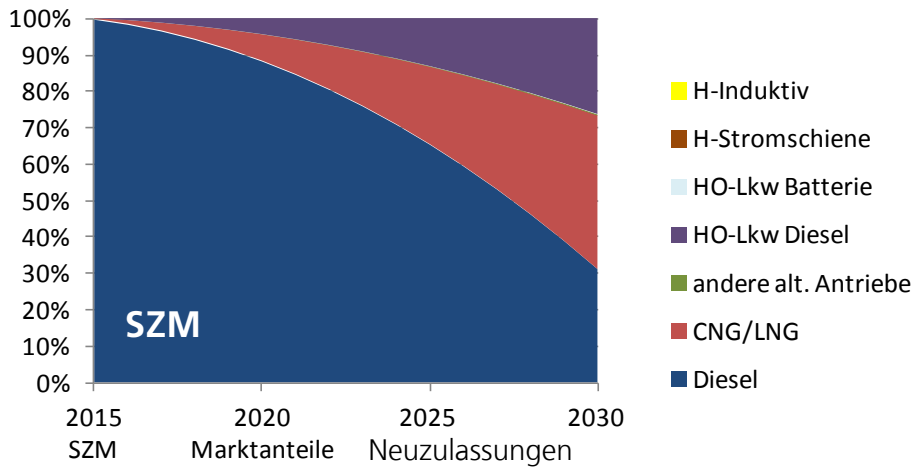
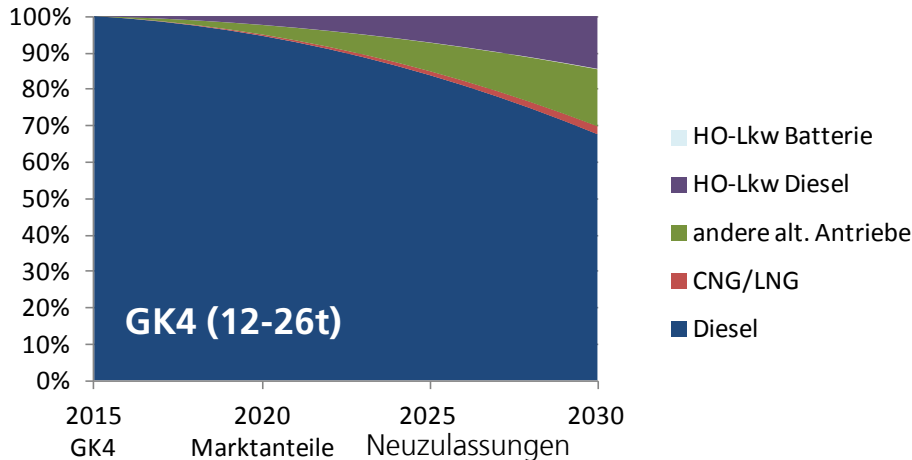


SZM

- Bei den SZM kann nur eine sehr kleine Menge mit HO-Lkw betrieben werden (1000km Infrastruktur)
- CNG/LNG mit 60% Marktanteil

Modellergebnisse

Ergebnisse ab 12t mit HO-Infrastruktur- ausbau von **4000 Kilometern** bis 2030



GK4

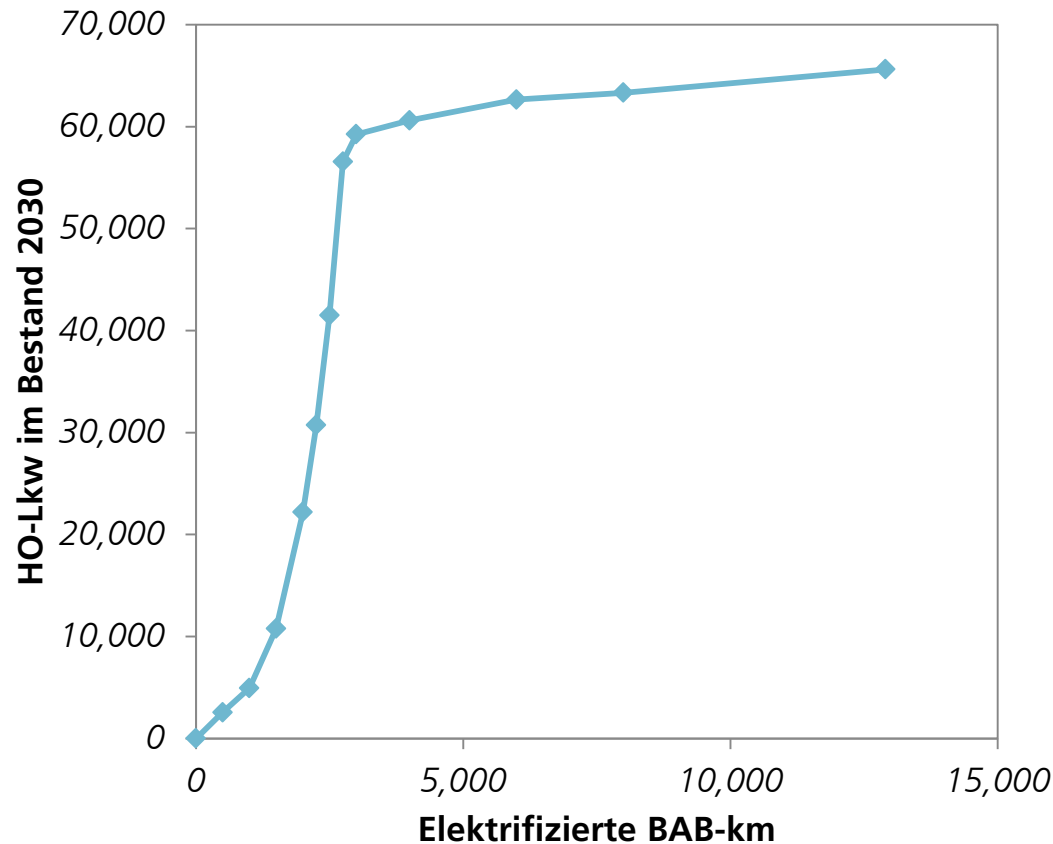
- HO-Diesel Lkw legt von 10% (1000km) auf 15% Marktanteil bei den Neuzulassungen zu (Reduktion des Dieselanteils)
- Neuzulassungen weiter durch Dieselfahrzeuge geprägt

SZM

- 25% Marktanteil von HO-Diesel-Lkw (in Vergleich zu einigen wenigen Prozent bei 1000km)
 - Reduktion der Marktanteile von CNG und Dieselfahrzeugen
- **Großer Einfluss der Infrastruktur, aber wie hoch?**

Modellergebnisse

Anteile der HO-Lkw im Bestand und Infrastrukturausbau

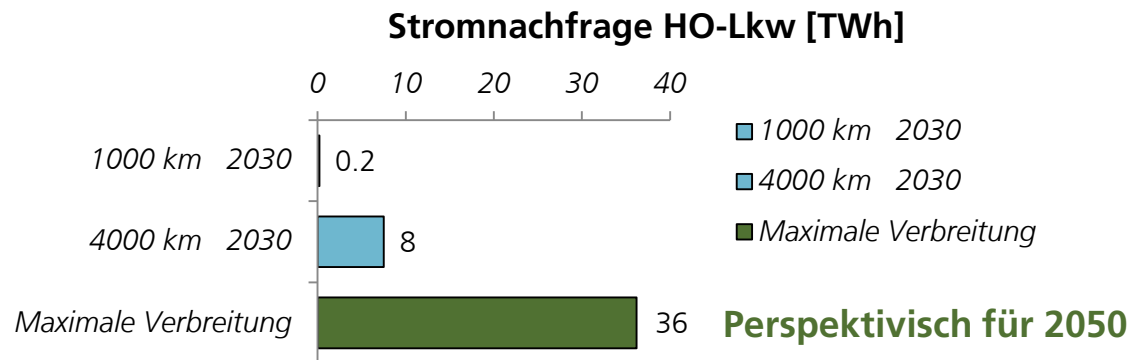


- Die größten Zuwächse werden mit einem Ausbau auf bis zu 3000 km Autobahn erzielt
- Danach kaum mehr Änderung im Bestand
- Zusammenhang zwischen Fahrleistungsverteilung der SZM (F16) und Ausbau, da kleine Menge an Infrastruktur reicht für große Menge an Lkw

Modellergebnisse

Übersicht Energiebedarf alternativer Antriebe für das Jahr 2030

- Vergleich von drei Varianten:
 - Markthochlauf bis 2030 bei 1000 km Oberleitungsausbau
 - Markthochlauf bis 2030 bei 4000 km Oberleitungsausbau
 - *Maximal*: Alle Fahrzeuge über 12t und Oberleitung auf gesamten Autobahnnetz

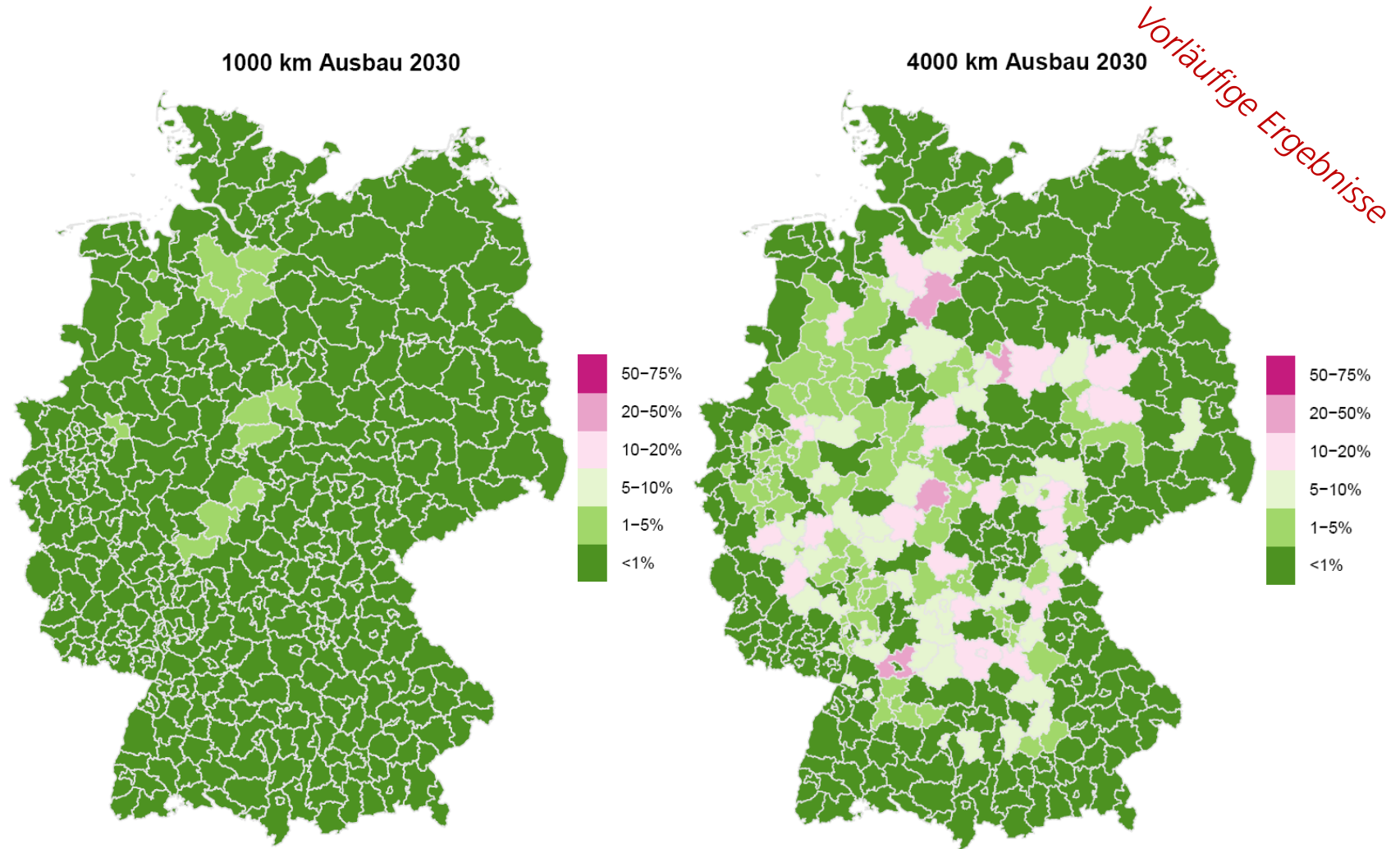


- Vergleich 1: 6 Mio. Elektroautos (@0,16 kWh/km & 14.300 km/a) sind ca. 14 TWh/a
- Vergleich 2: Bruttostrommenge in den Klimaschutzszenarien (BMU 2015) im Jahr 2030: 501 TWh (KS95) - 593 TWh (AMS)

Modellergebnisse

Regionale Effekte nach Markthochlauf 2030

Änderung der lokalen Stromnachfrage durch HO-Lkw



Agenda

1. Hintergrund und Motivation
2. Vorgehen im Projekt
3. Zentrale Ergebnisse
4. **Fazit, Ausblick und weiterer Forschungsbedarf**

Fazit, Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

- Bei **regenerativen** Bereitstellung des **Stroms**, stellen **HO-Lkw** eine Variante zur **Dekarbonisierung** des Straßengüterverkehr dar.
- **Anteil der HO-Lkw** ist nach oben **beschränkt**
 - Auch weitere Szenarien mit größerem Ausbau an Infrastruktur belegen dies.
- Obergrenze des Markthochlaufs der HO-Lkw wird **bestimmt durch den Ausbau der HO-Infrastruktur**, aber auch durch den Einbezug der Beschränkungen:
 - DE-Anteil: Nicht alle Lkw nutzen die elektrifizierten Autobahnen.
 - Beschränkte Fahrzeugverfügbarkeit: Nicht jeder entscheidet für den HO-Lkw bei positivem TCO-Vergleich.
- Entwicklung der **Konkurrenztechnologien beachten** (z.B. CNG/LNG – Besteuerung Kraftstoffe)

Weitere Punkte müssen noch untersucht werden:

- **Marktakzeptanz** der Technologie (Flexibilität, Zuverlässigkeit,...)
- **Bewegungsprofile** von Lkw zur detaillierten Bestimmung von Autobahnanteilen (**GPS-Tracking**)
- Strategien zur Elektrifizierung des **Quell-/ Ziel- und Transitverkehrs**
- Deutscher Sonderweg? - Steht der HO-Lkw im Widerspruch mit der **EU Verkehrspolitik** (TEN-T) – **Gibt es Verlagerungseffekte** (Schiene/Binnenschiff → Straße)?

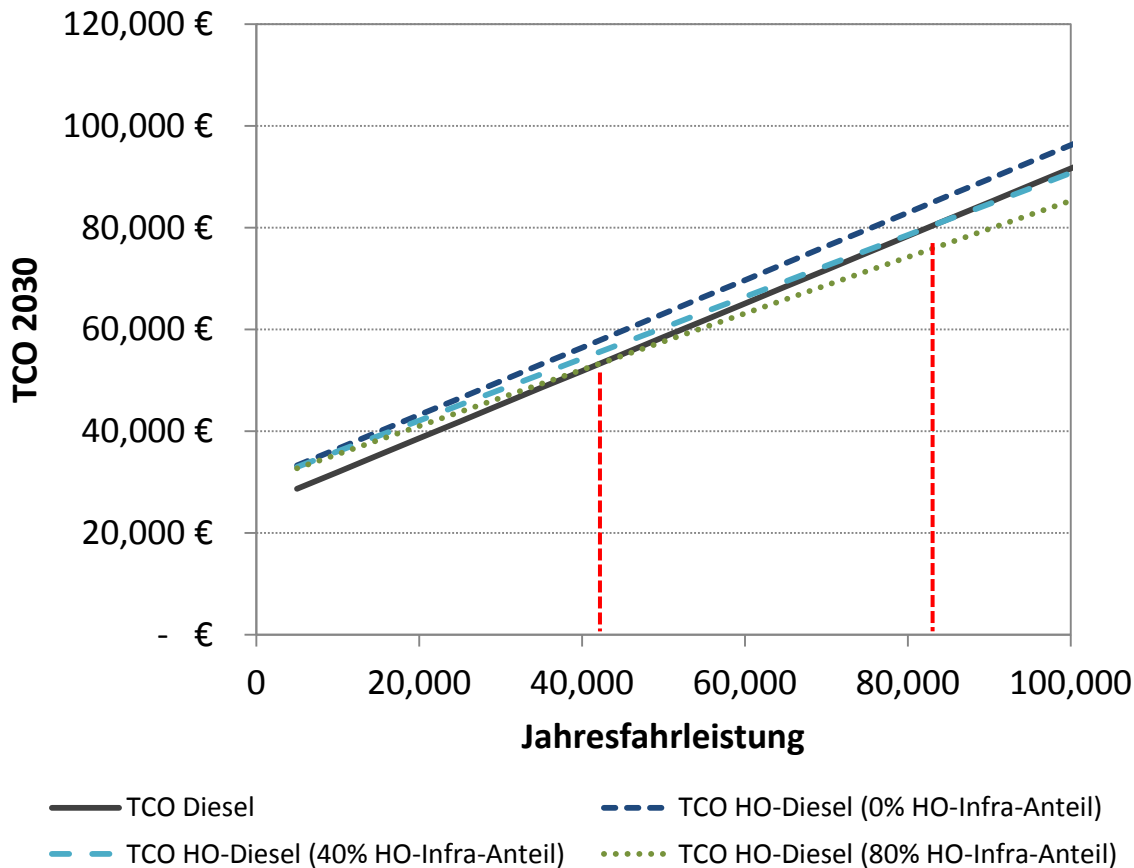
VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!

Weitere Informationen zum Projekt unter:

<http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/mks-fachworkshop-hybrid-oberleitungs-lkw.html>

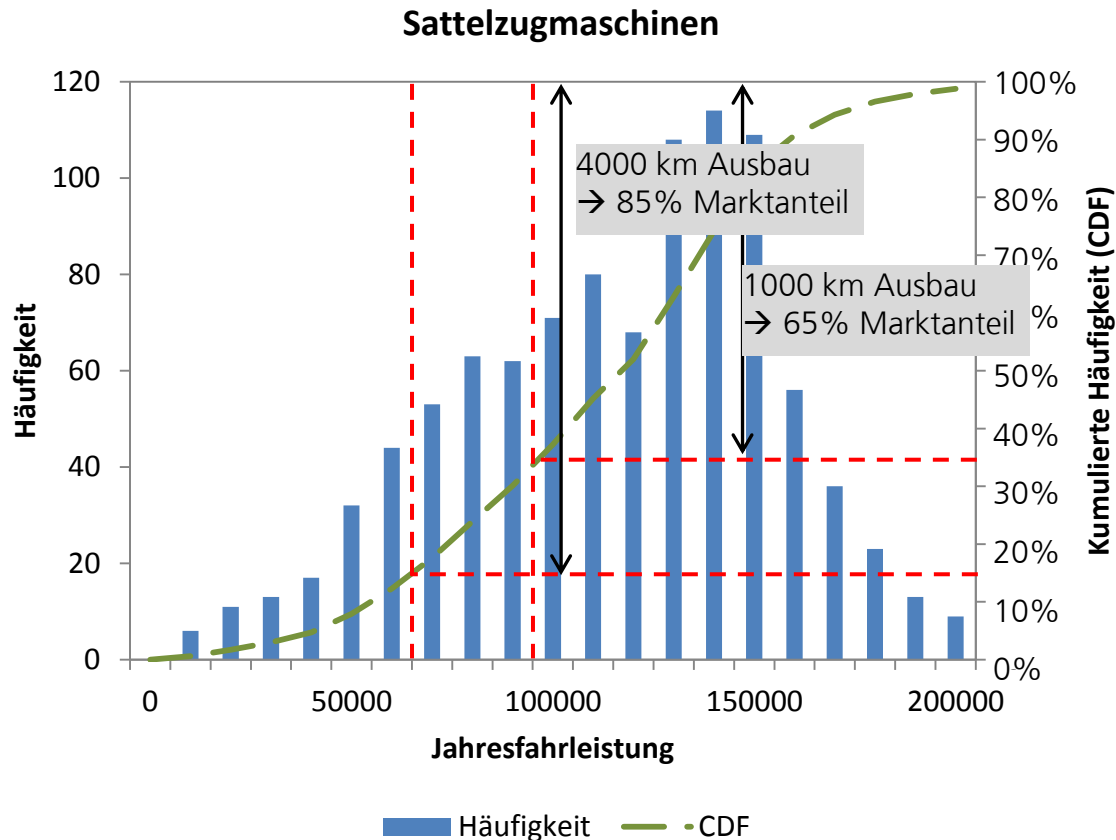
ANHANG

Ab wann werden HO-Diesel-Lkw 2030 wirtschaftlich? (ohne Infrastrukturkosten)



- Die Kosten der HO-Lkw hängen vom Anteil des elektrischen Fahrens an der Oberleitung ab
- Ein hoher Anteil an der Oberleitung bedeutet eine schnellere Amortisation („Es rechnet sich bei geringeren Jahresfahrleistungen“)
- Ca. 30.000 elektrische Kilometer notwendig zur Amortisation 2030
- **ABER:** Elektrische Kilometer hängen vom Ausbau der Oberleitung ab

Die Menge der wirtschaftlichen HO-Lkw liegt oberhalb einer Mindestfahrleistung



- Der Marktanteil von HO-Lkw hängt von der Menge der Lkw mit Jahresfahrleistungen oberhalb einer **Break-Even-Fahrleistung** ab
 - Diese hängt vom Infrastrukturausbau ab
- ACHTUNG:**
- Rechnungen ohne andere alternative Antriebe, diese können die Schwellen beeinflussen
 - Tagesfahrleistungen schwanken (im Modell berücksichtigt)