
EINSTIEG UND ÜBERSICHT ÜBER DIE AKTUELLE UNTERSUCHUNG

Prof. Dr. Martin Wietschel

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)

- Studientitel: *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-LKWs*
- Laufzeit: *10.2015 – 09.2016*
- Partner: *Fraunhofer ISI (Koordination), Fraunhofer IML, PTV Group, Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), M-FIVE*

Fachworkshop „Hybrid-Oberleitungs-Lkw: Potenziale zur Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs“

1. März 2016 // 11.00 bis 16.00 Uhr Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Invalidenstraße 44, 10115 Berlin)

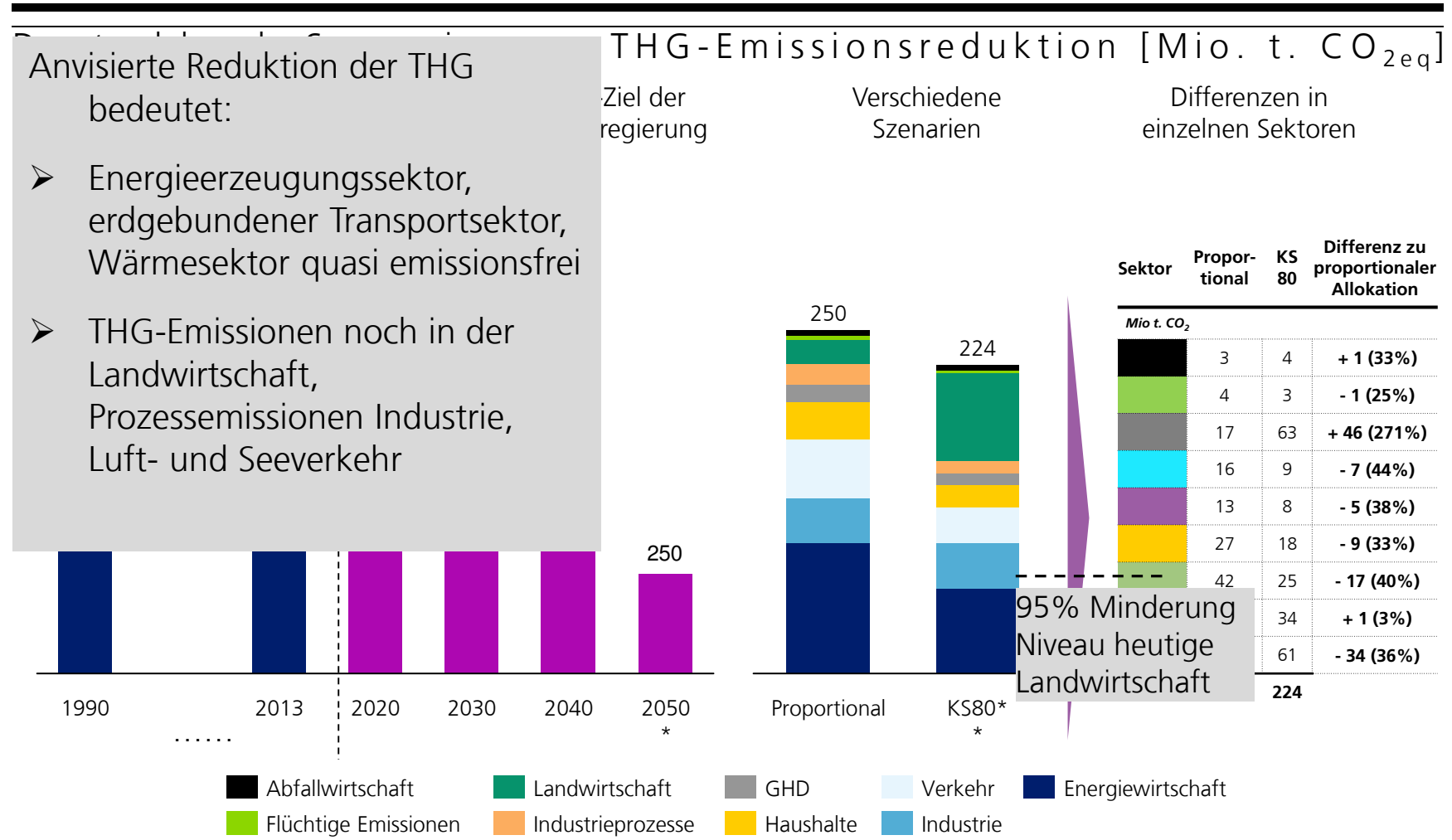
Agenda

- Einleitung und Motivation
- Projektziele und Vorgehen
- Zentrale Fragestellungen für den Workshop

Agenda

- **Einleitung und Motivation**
- Projektziele und Vorgehen
- Zentrale Fragestellungen für den Workshop

Die ThG-Ziele sind drastisch und es wird die Sektoren unterschiedlich treffen



* Max Szenario der Bundesregierung 80% Reduktion bis 2050

** KS80 Szenario der Studie „Klimaschutzszenarien“, von Öko Institut e. V. und Fraunhofer ISI

Voraussichtlicher Einsatz von strombasierten Antriebstechnologien

Größen- klasse	GK1	GK2	GK3	GK4	Sattelzüge
Zul. GGW [t]	[0 ; 3,5t]	(3,5t ; 7,5t]	(7,5t ; 12t]	(12t ; 26t]	40t
Ø Jahres- laufleistung [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 TTW [g/Fzg.-km]	185	371	526	732²	1.028
CO ₂ -Emission TTW [Mio. tCO ₂ /a]	4,81	2,63	2,68	8,71	19,94
potenzielle strombasierte Antriebs- technologien	BEV / PHEV				
	Brennstoffzelle				
	Power to Methan				
	Power to Liquid				
					HO-Lkw

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:

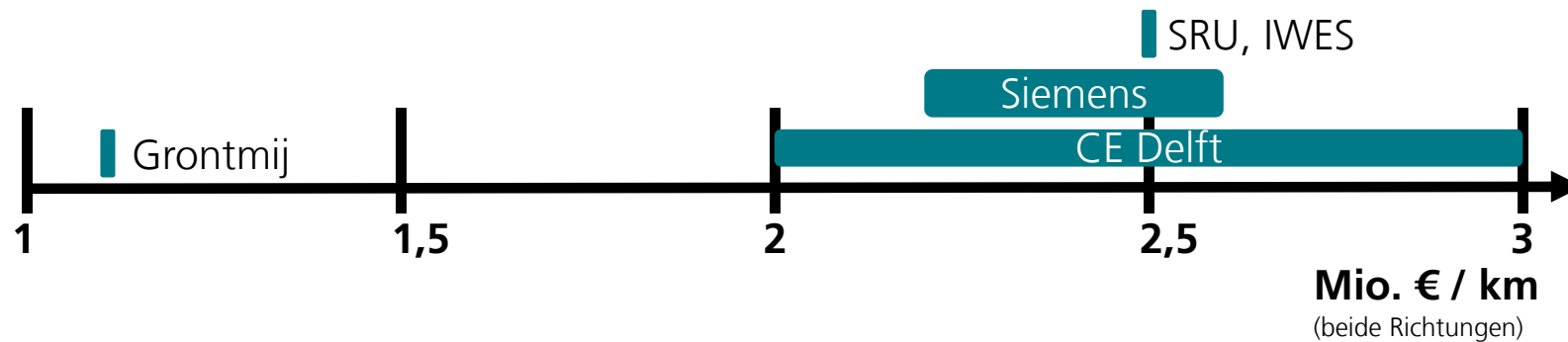
- „Henne-Ei-Problem“ (Geschäftsmodell, Betreibermodelle)
- Technische Herausforderungen
- Fehlen detaillierterer Wirtschaftlichkeitsrechnungen
- Grenzüberschreitender Verkehr
- Standardisierung
- Rechtliche und sicherheitsrelevante Fragen
- Fahrzeugangebot
- Patentsituation
- Alternativen (z.B. Umstieg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

Die Auswertung existierende Studien lässt folgendes schließen

- Es existieren nur wenige Studien zum HO-Lkw
- Die Datenangaben sind teilweise lückenhaft und intransparent
- Diese Studien sehen in einem eingeschwungenen Zustand (Infrastruktur aufgebaut, Kostensenkungspotenziale erreicht) i.d.R. die Wirtschaftlichkeit als möglich an
- Der Markthochlauf wird nicht betrachtet
- Durchschnitts-Lkws und Fahrleistungen liegen den Berechnungen zu Grunde
- Die Nutzersicht kommt zu kurz

Wie hoch liegen die Investitionen in die Infrastruktur?

Vergleich existierender Studien



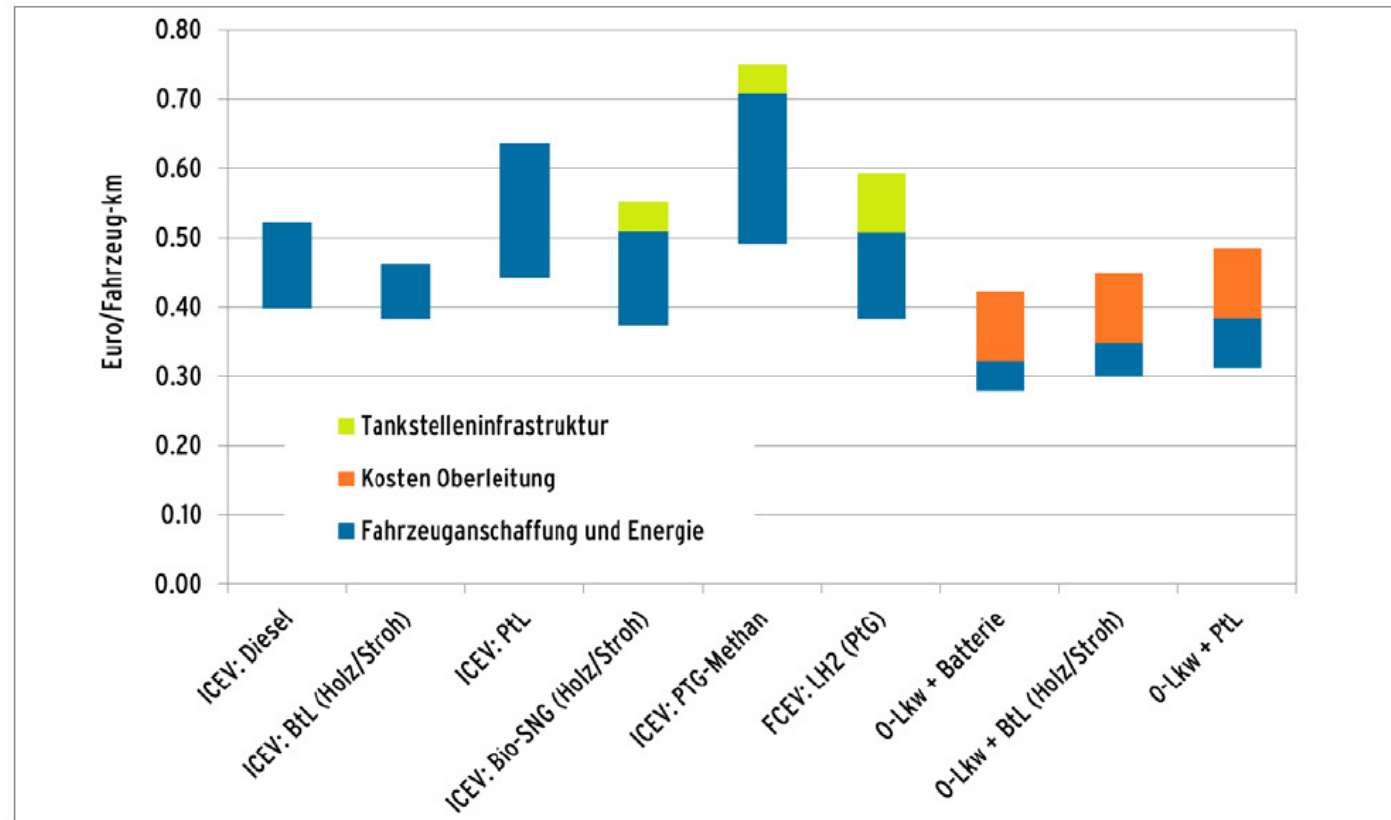
- Wenn man die 10 000 am meisten befahrenen Autobahnkilometer (insgesamt 13 500 Autobahnkilometer) elektrifiziert: Investitionen von 20 bis 30 Mrd. €

Quellen:

- CE Delft, 2013: Zero emissions trucks – an overview of state-of-the-art technologies and their potential, S. 48
- Siemens, AG
- SRU, 2012: Umweltgutachten 2012 – Verantwortung in einer begrenzten Welt, S. 151
- Fraunhofer IWES, 2015: Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr, S. 69
- Grontmij, 2010: Elektriska vägar – elektrifiering av tunga vägtransporter, S. 4

Im Vergleich erscheinen die HO-Lkws im eingeschwungenen Zustand wirtschaftlich attraktiv sein zu können

Ergebnisse einer existierenden Studie
Andere existierende Studien kommen zu ähnlichen Aussagen



Quelle:

Umweltbundesamt, 2014: Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung, S. 92. Annahmen: Zustand 2050, Ausbau komplettes Netz (13.000 km), 2,5 Mio €/km □ 32,5 Mrd. €, jährliche Wartungskosten: 5%, ca. 50% der Lkw über 12 t zGG sind HO-Fahrzeuge

Agenda

- Einleitung und Motivation
- **Projektziele und Vorgehen**
- Zentrale Fragestellungen für den Workshop

Ziele der Studie

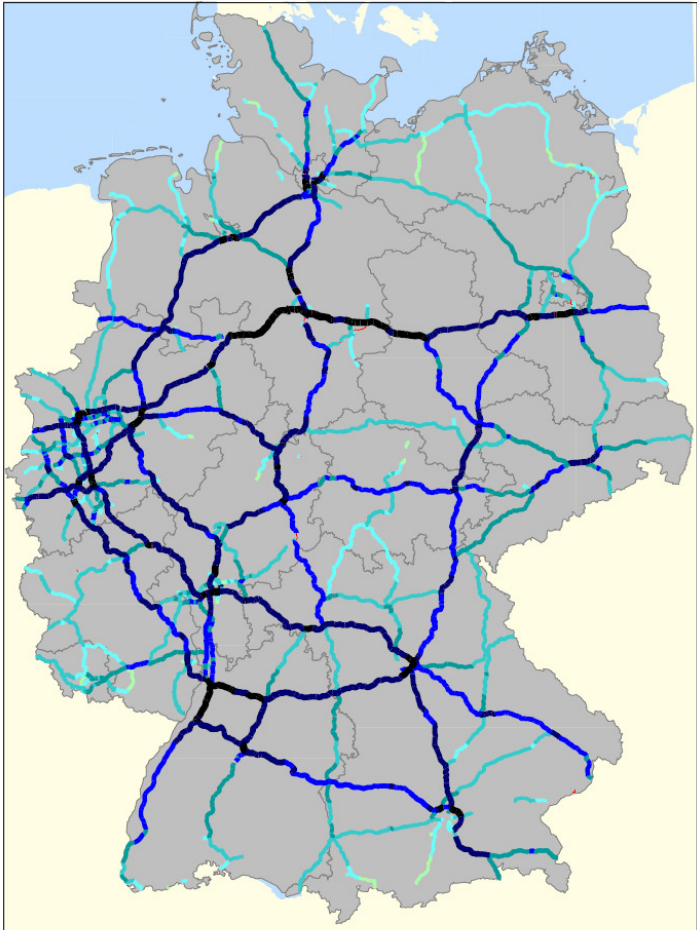
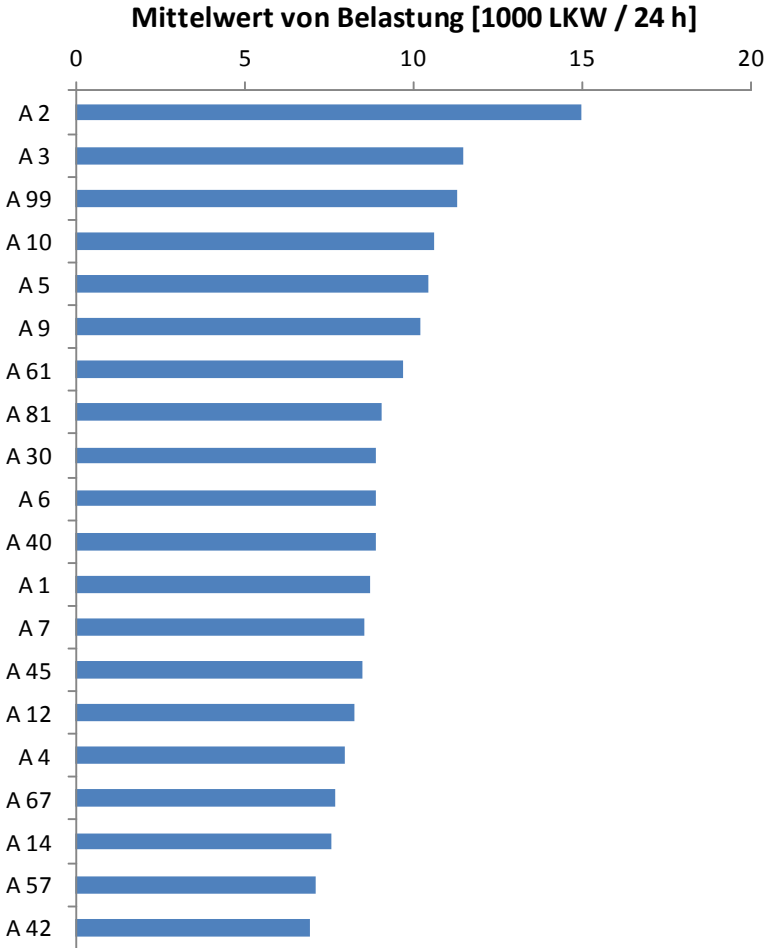
„Hybrid-Oberleitungs-Lkw: Potenziale zur Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs“

Welches Potenzial haben Hybrid-Oberleitungs-Lkws unter einer wirtschaftlichen Perspektive in Deutschland?

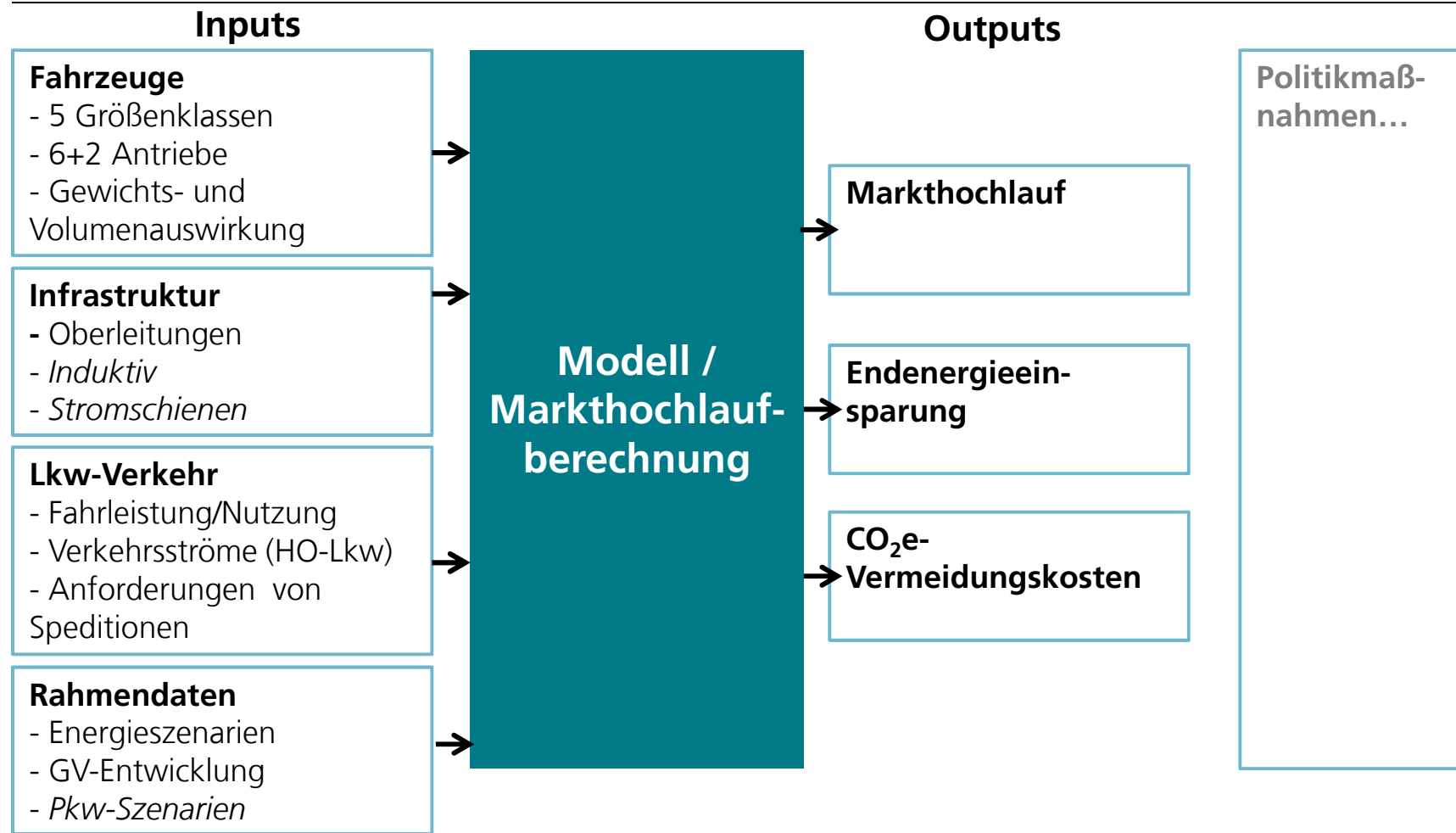
- Was sind sinnvolle technische Ausgestaltungsoptionen der Stromzufuhr (Oberleitungen, induktive Systeme, Stromschienen)?
- Welche technische Auslegung der HO-Lkws bieten sich an? Wie sieht die Hybridisierungsstrategie aus (Größe der Fahrzeugbatterie)?
- Wie sieht die Wirtschaftlichkeit in einem eingeschwungenen Zustand auf?
- **Wie sollte der Markthochlauf und der Infrastrukturaufbau aussehen?**
- **Welche Autobahnen sind über welche Zeitschiene mit einer Oberleitungsinfrastruktur aufzubauen?**
- Welche Finanzierungs- und Betreibermodelle für den Infrastrukturaufbau/-betrieb sind sinnvoll?
- **Wie ist die Lkw-Herstellersicht und wie könnte eine künftige Modellpalette aussehen?**
- **Wie sieht die Nutzersicht auf HO-Lkws aus? Was sind Nutzeranforderungen?**
- Was sind die energie- und klimapolitischen Auswirkungen der Einführung von HO-Lkws?

Alles transparent und nachvollziehbar!

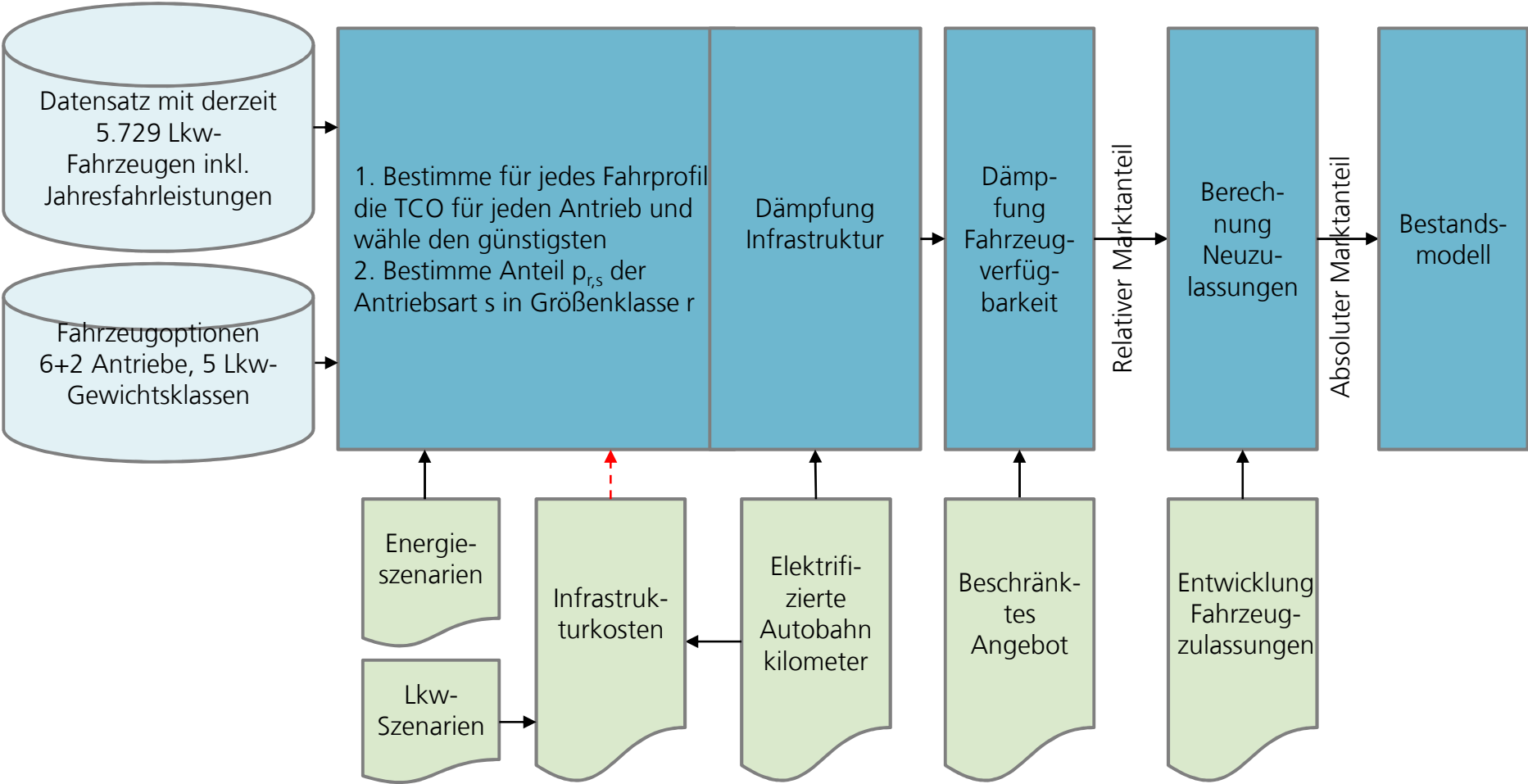
Über Verkehrsflußrechnungen werden die interessantesten Autobahnstrecken identifiziert



Die Markthochlaufberechnungen erfolgen auf Basis detaillierter Analysen



Wirtschaftlichkeit, verfügbare Infrastruktur und Modellpalette fließen in den Markthochlauf ein



Agenda

- Einleitung und Motivation
- Projektziele und Vorgehen
- **Zentrale Fragestellungen für den Workshop**

Zentrale Fragestellungen für den Workshop

Sind die getroffenen Annahmen zur konzeptionellen Auslegung und die wirtschaftlichen und technischen Parameter für die Infrastrukturlösungen und die Lkws sinnvoll?

- Welches sind die besonderen Anforderungen bei dem Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur insgesamt sowie bei der Auslegung der einzelnen Komponenten im Speziellen?
- Welches ist die optimale Auslegung der Komponenten und welche Kosten sind damit verbunden?
- Wie kann die Konkurrenzsituation zu anderen leitungsgebundenen Lösungen wie der induktiven oder spurgeführten Ladung bewertet werden?
- Welches sind die unterschiedlichen technischen Konzepte für den Hybrid-Lkw und welche Kosten sowie Wirkungsgrade lassen sich jeweils erreichen?
- Wie kann die Batterie für diese unterschiedlichen technischen Konzepte optimal ausgelegt werden?
- Wie beurteilen Logistikunternehmen die Tauglichkeit des Hybrid-Lkw für ihre individuellen Transportanforderungen?

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG DES BMVI ZUR WEITER- ENTWICKLUNG DER MOBILITÄTS- UND KRAFTSTOFF- STRATEGIE (MKS)

Oberleitungsinfrastruktur



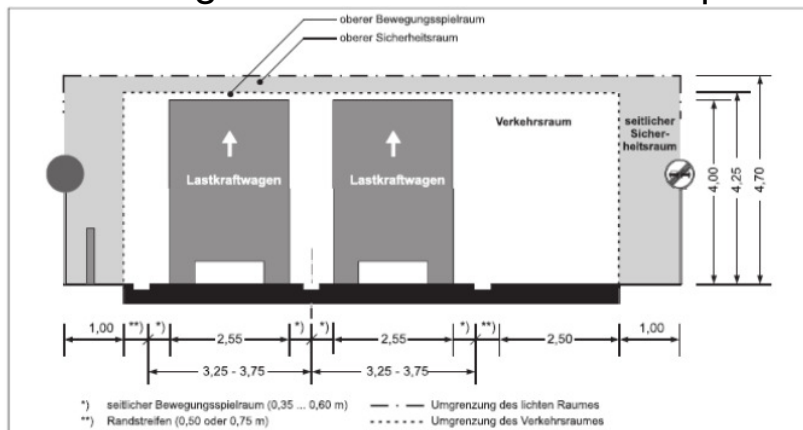
Berlin, 01. März 2016

Teil 1: Oberleitungsinfrastruktur

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Relevante Normen / Richtlinien

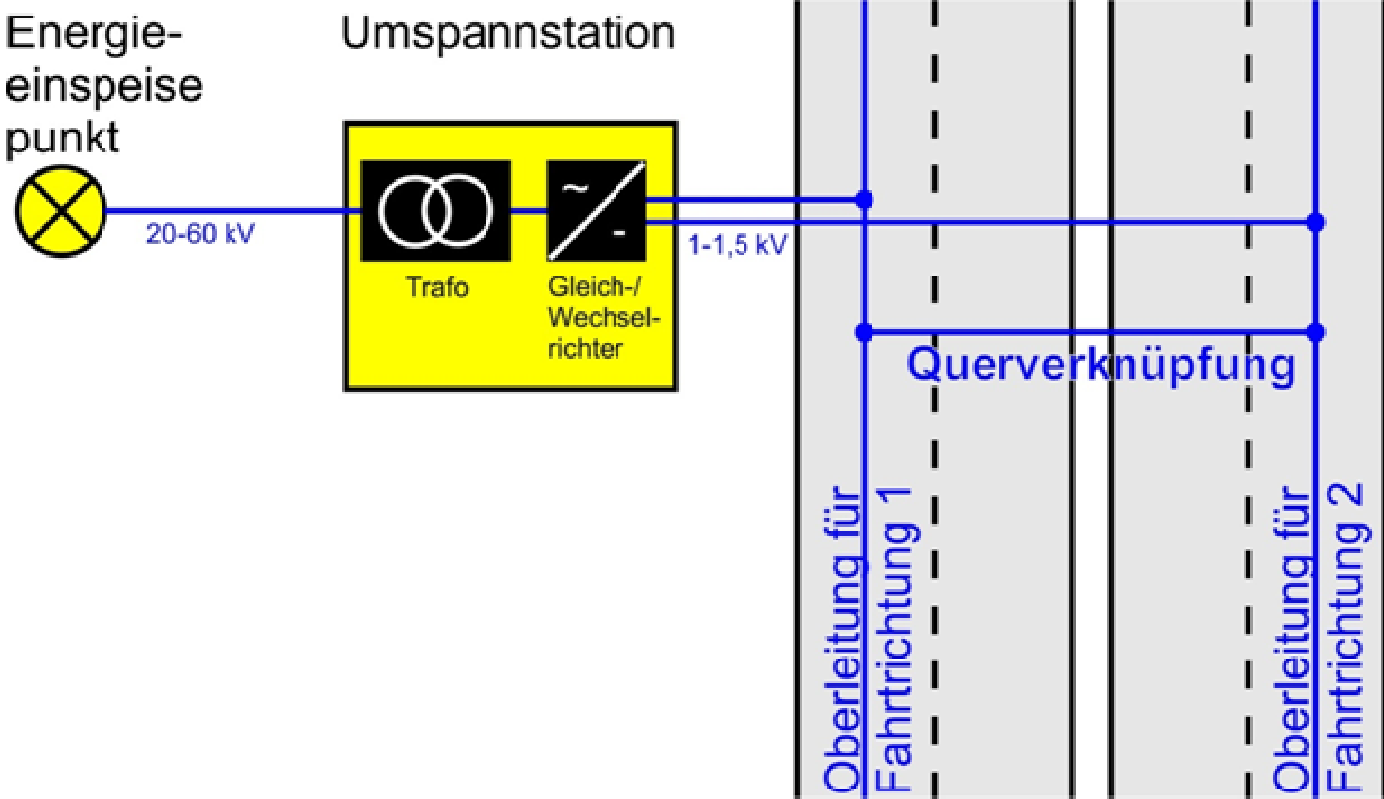
- **DIN EN 50502:** Sicherheitsanforderungen und Konstruktionshinweise für die elektrische Ausrüstung in O-Bussen
- **DIN EN 50149:** Maßgebend für die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Oberleitungen
- **BOStrab**, § 25: Fahrleitungsanlagen
- **RPS:** Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (maßgebend für die Absicherung der Masten und Umspannstationen mit Schutzplanken)
- **RAA:** Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (maßgebend für die Anordnung der Oberleitungsinfrastruktur im Straßenquerschnitt)



MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau Komponenten der Oberleitungs-Infrastruktur

Komponente	Eigenschaften / Anforderungen
Energieeinspeisepunkt	Abzweig aus dem bestehenden Mittelspannungsnetz des lokalen EVU, z.B. an einem Umspannwerk, an einem Erdkabel oder an einer Freilandleitung
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	20-60 kV Leitungen; es ist mit Zuleitungslängen von 500m (in Ballungsräumen) bis 3.000m (in ländlichen Gebieten) zu rechnen
Umspannstation	Schaltschrank/Container mit Trafo und Gleich-/Wechselrichter; Anordnung einseitig am Fahrbahnrand im Abstand von ca. 3 km; zur Reduktion der Strombelastungen wird vorgeschlagen, die Oberleitungen mit Spannungen von 1,0 bis 1,5 kV Gleichstrom zu versorgen
Masten	Beton- oder Stahlmaste mit Auslegern von ca. 6m Länge (an Anschlussstellen sind ggf. längere Ausleger notwendig); Anordnung beidseitig am rechten Fahrbahnrand im Abstand von ca. 50m; an Standorten mit Querverknüpfungen sind ggf. etwas stärkere Maste erforderlich.
Oberleitung (Fahrdraht)	Kettenwerk, bestehend aus 2-poligen Rillenfahrdrähten mit 150 mm ² Querschnittsfläche, Tragseilen (120 mm ² Querschnittsfläche) und Querkupplungen zwischen den Oberleitungen beider Fahrtrichtungen

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau Prinzip der Energieversorgung (vereinfachte Darstellung)



MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Abschätzung des Energiebedarfs bei Vollast

Situation	Berechnungsgrundlagen	Max. Energiebedarf je Umspannstation
Ebene Strecke	Max. 100 HO-LKW je 3-km-Sektor (beide Richtungen); 100 kVA je HO-LKW	10 MVA
Steigungsstrecke	50 HO-LKW auf Steigungsstrecke je 500 kVA	25 MVA
Max. Ladebetrieb	100 HO-LKW je 1.000 kVA	100 MVA

→ Kapazitäten des Mittelspannungsnetzes ggf. nicht ausreichend

→ Stromtragfähigkeit der Oberleitungen (bei 670 V Gleichstrom) nicht ausreichend

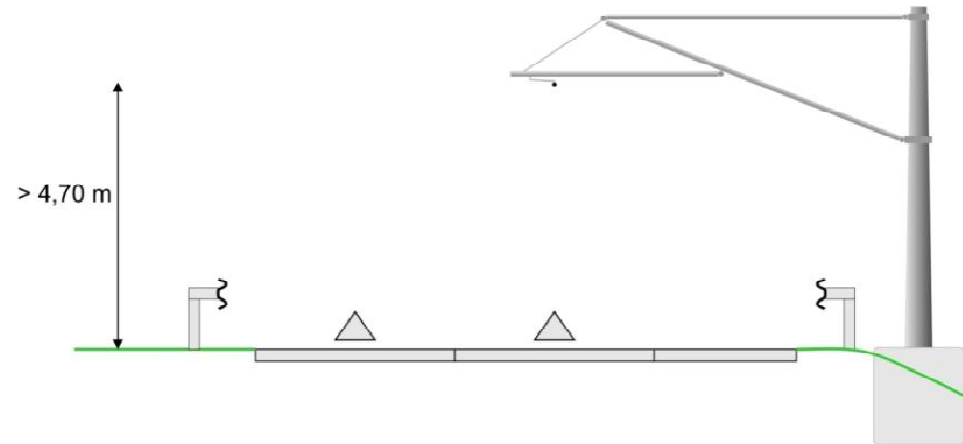
MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau Maßnahmen zur Vermeidung zu hohen Energiebedarfs

- Verwendung einer möglichst hohen Spannung im Oberleitungsnetz, um die Stromstärken zu reduzieren (→ 1,5 kV Gleichspannung)
- Herstellen eines Kommunikationssystems zwischen HO-LKW und Umspannstation, über das der HO-LKW der Umspannstation die Wunschbezugsleistung übermittelt und die Umspannstation dem HO-LKW die jeweils aktuell mögliche Bezugsleistung mitteilt
- Anordnung von Oberleitungen im Anschluss an Steigungsstrecken, so dass auf der Steigungsstrecke selbst weniger Energie bereitgestellt werden muss
- Verdichtung der Umspannstationen
- Einbau von Batteriespeichern in den Umspannstationen, um das Mittelspannungsnetz von Bezugsspitzen durch HO-LKW zu entkoppeln
- Lokale Verstärkungen des Mittelspannungsnetzes

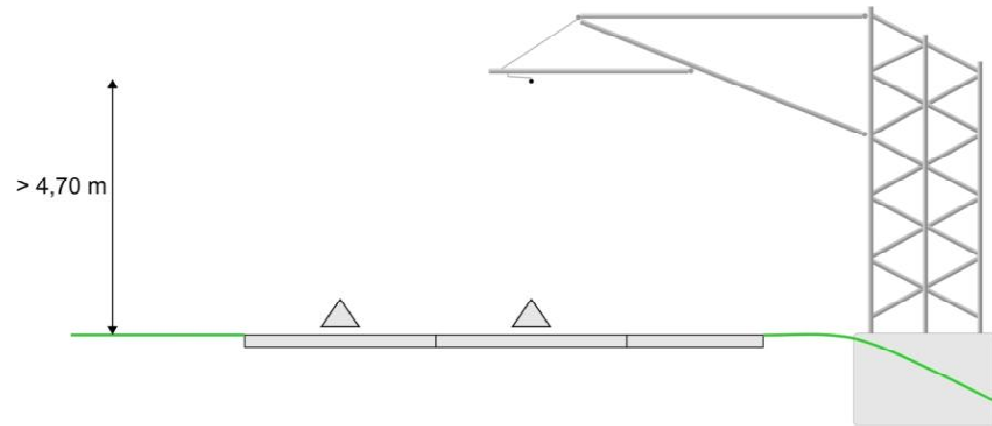
MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Anordnung der Oberleitungsinfrastruktur im Strassenquerschnitt

Variante 1:



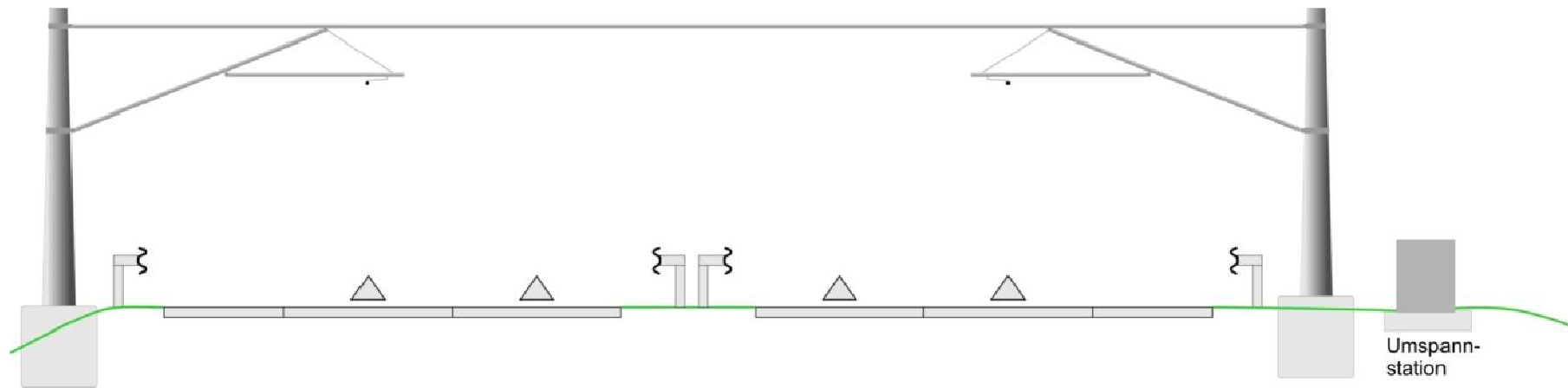
Variante 2:



MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Anordnung der Oberleitungsinfrastruktur im Strassenquerschnitt

Variante 3:



MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Besondere Aspekte der Oberleitungs-Infrastruktur

Aspekt	Eigenschaften / Anforderungen
Querung von Schilderbrücken	Unterquerung des Fahrdrachts mittels Stromschiene (in einem Isolator gefasst) dürfte in aller Regel möglich sein; Tragseil und Verstärkungsleitung können - in einem Isolator gefasst - über der Beschilderung hinweggeführt werden. Tragfähigkeit der Schilderbrücken für die Befestigung der Oberleitungen dürfte in aller Regel ausreichend sein; ebenso der notwendige Platzbedarf (ca. 5 cm) zur Einhaltung der Soll-Durchfahrtshöhe.
Querung von Überführungsbauwerken	Unterquerung der Oberleitungen (Fahrdraht, Tragseil und Verstärkungsleitung) mittels Deckenstromschienen dürfte in aller Regel möglich sein. An Überführungsbauwerken sind Einrichtungen zum Schutz vor Berührung der Oberleitungen anzubringen.
Absicherung der Masten durch passive Schutzeinrichtungen (Schutzplanken)	Beton- und Stahlrohrmaste sind mit Schutzplanken abzusichern, wobei gemäß RPS 2009 von der Aufhaltstufe H1 ausgegangen werden muss; ggf. ist eine Verstärkung der vorhandenen Schutzplanken vorzunehmen. Bei Verwendung von Gabelständern, die als verformbar eingestuft werden können, sind gemäß RPS Schutzeinrichtungen mit Aufhaltstufe N2 ausreichend; bei gemäß DIN EN 12767 hinsichtlich der passiven Sicherheit geprüften Tragkonstruktionen kann ggf. auf Schutzeinrichtungen verzichtet werden.

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Besondere Aspekte der Oberleitungs-Infrastruktur (2)

Aspekt	Eigenschaften / Anforderungen
Enteisung der Oberleitungen	Da Eislasten bis ca. 2.000 kg/50m auftreten können, wird empfohlen, die Oberleitungen beheizbar auszulegen.
Einfluss von Lärmschutzwänden	Die Anordnung von Masten im Bereich von Lärmschutzwänden ist aufwändig und kann mit erheblichen Mehrkosten verbunden sein. Streckenabschnitte mit Lärmschutzwänden sollten deshalb nach Möglichkeit ausgespart werden.
Streckenabschnitte ohne Oberleitungen	Aus Kostengründen sollten Talbrücken sowie die Verbindungsrampen an Autobahnkreuzen und –dreiecken ausgespart werden; längere Tunnelstrecken (> 100m) sollten aus Sicherheitsgründen ausgespart bleiben.
Sonstiges	Weitere Strecken können ohne Oberleitungen bleiben, wenn sie im Batteriebetrieb überwunden werden können.

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau Grundlagen und Quellen für die Kostenschätzung

Oberleitungsinfrastruktur:

- Ergebnisse der **ENUBA**-Studie
- **Einheitspreisliste** zur Kostenkontrolle für **VBA-Komponenten**
- Verfügbare **Ausschreibungsergebnisse**
- Literatur- und **Internet**recherchen
- **Preisfragen** bei Herstellern

Alternative Ladeinfrastrukturen:

- Ergebnisse des EU-Forschungsprojekts **FABRIC** „Feasibility analysis and development of on-road charging solutions for future electric vehicles“
- Projekt „**LUAS City Broombridge**“ (System Alsthom)

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Grobe Kostenschätzung – Best Case

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [€/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000,--/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	ca. 50,-- pro lfd m Kabelgraben (Tiefbau, unbebautes Gebiet), ca. 100,-- pro lfd m Kabel; bei Ø 500 m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 25.000,--/km	25.000,--
Umspannstation	ca. 250.000,-- pro MVA (incl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 25 MVA Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 6,25 Mio. € pro Umspannstation; bei einem Raster von 3 km folgt daraus rund 2,1 Mio. € / km	2.100.000,--
Masten	ca. 10.000,-- pro Mast (incl. Ausleger und Fundament); bei einem Mastabstand von 50m ergeben sich Kosten von 400.000,-- pro km (für beide Fahrtrichtungen)	400.000,--
Oberleitung (Fahrdraht)	ca. 300,-- pro lfd m, d.h. 600.000,-- pro km (für beide Fahrtrichtungen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	Annahme: Zur Absicherung der Masten kann auf passive Schutzeinrichtungen verzichtet werden, da verformbare, gemäß DIN EN 12767 hinsichtlich der passiven Sicherheit geprüfte Tragkonstruktionen eingesetzt werden können; Kosten für die Absicherung der Umspannstationen: ca. 10.000,-- pro Station → ca. 3.500,--/km	3.500,--
Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken	Mehrkosten für Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken stehen Einsparungen bei Masten entgegen	0,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10% der Investitionskosten	320.000,--

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Grobe Kostenschätzung – Worst Case

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten [€/km]
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 5.000,--/km	5.000,--
Zuleitungen vom Energieeinspeisepunkt zur Umspannstation an der Strecke	ca. 200,-- pro lfd m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100,-- pro lfd m Kabel; bei Ø 2,5km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 250.000,--/km	250.000,--
Umspannstation	ca. 350.000,-- pro MVA (incl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 25 MVA Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 8,75 Mio. € pro Umspannstation; bei einem Raster von 3 km folgt daraus rund 2,5 Mio. € / km	2.900.000,--
Masten	ca. 10.000,-- pro Mast (incl. Ausleger und Fundament); bei einem Mastabstand von 50m ergeben sich Kosten von 400.000,-- pro km (für beide Fahrtrichtungen)	400.000,--
Oberleitung (Fahrdraht)	ca. 300,-- pro lfd m, d.h. 600.000,-- pro km (für beide Fahrtrichtungen)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	ca. 100,-- pro lfd m; unter der Annahme, dass die gesamte Strecke neu ausgestattet bzw. bestehende Schutzplanken verstärkt werden müssen, ergeben sich Kosten von 200.000,-- pro km (für beide Fahrtrichtungen)	200.000,--
Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken	Mehrkosten für Querungen von Schilderbrücken und Überführungsbauwerken stehen Einsparungen bei Masten entgegen	0,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10% der Investitionskosten	425.000,--

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Grobe Kostenschätzung – Zusammenstellung

Best Case	ca. 3,5 Mio. € pro km
Worst Case	ca. 4,8 Mio. € pro km
Kostenschätzung ENUBA2 (Basis-Szenario)	2,2 Mio. € pro km

Erklärung der Abweichung zur Kostenschätzung ENUBA2:

- Abweichung ergibt sich primär aus der Leistung der Umspannstationen (25 MVA gegenüber 2 MVA im ENUBA2-Ansatz)
- Der Leistungsbedarf der Umspannstationen erhöht sich, wenn man den Ausstattungsgrad mit Oberleitungsinfrastruktur ausdünnst und entsprechend die Reichweite der HO-LKW im Batteriebetrieb ausnutzt (ca. 30% Ausstattungsgrad gegenüber >90% im ENUBA2-Ansatz)
- Die Kosten für das Gesamtnetz sinken durch diese Ausdünnung der Bereiche mit Oberleitungsinfrastruktur

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau Investitionsbedarf

Ausstattungsvariante	Investitions- bedarf [Mrd. €]
30% des gesamten BAB-Netzes (ca. 3.900 km)	16,0
30% des „Ausbaunetzes“ gemäß ENUBA (ca. 1.250 km)	5,0
94% des „Ausbaunetzes“ gemäß ENUBA (ca. 3.850 km)	8,5

Teil 2: Alternative Ladeinfrastrukturen

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau Alternative Ladeinfrastruktur – „Stromschiene“



The test site in Sweden

Quelle: <http://www.fabric-project.eu>

Quelle: <http://news.volvogroup.com>

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau Komponenten des Systems „Stromschiene“

Komponente	Eigenschaften / Anforderungen
Energieeinspeisepunkt	Abzweig aus dem bestehenden Mittelspannungsnetz des lokalen EVU, z.B. an einem Umspannwerk, einem Erdkabel oder an einer Freileitung
Zuleitung vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	20-60kV Leitungen; es ist mit Zuleitungslängen von 500m (Ballungsräume) bis 3.000m (in ländlichen Gebieten) zu rechnen.
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	Erdkabel entlang der versorgten Strecke für 1,0-1,5 kV Gleichspannung; Variante 1: Verkabelung beidseits der Strecke Variante 2: Fahrbahnquerungen in regelmäßigen Abständen (Durchörterungen mit erhöhten Tiefbau- aber geringeren Kabelkosten gegenüber Variante 1)
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Erdkabel entlang der versorgten Strecke für 20-60kV Wechselspannung, um die notwendigen Kabelquerschnitte für die Gleichspannungsversorgung in Grenzen zu halten (eine durchgehende Verkabelung über mehrere km würde zu Kabelquerschnitten wie bei den geplanten HGÜ-Nord-Süd-Trassen oder darüber führen)
Umspannstationen	Schaltschrank/Container mit Trafo und Gleich-/Wechselrichter; Anordnung der Umspannstation einseitig am Fahrbahnrand im Abstand von ca. 1km, die dann eine Erdverkabelung mit hohem Leiterquerschnitt entlang der Autobahn versorgt
Stromleiter, einschließlich Schalter und Sensorik	2 mit Isolatoren segmentierte Stromleiter längs der Fahrbahn. Die Segmente werden automatisch eingeschaltet, wenn ein Fahrzeug mit Stromabnehmer das Segment überquert. Die Länge der Segmente richtet sich nach der jeweiligen Fahrzeuglänge

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Grobe Kostenschätzung des Systems „Stromschiene“ (Best-Case-Betrachtung)

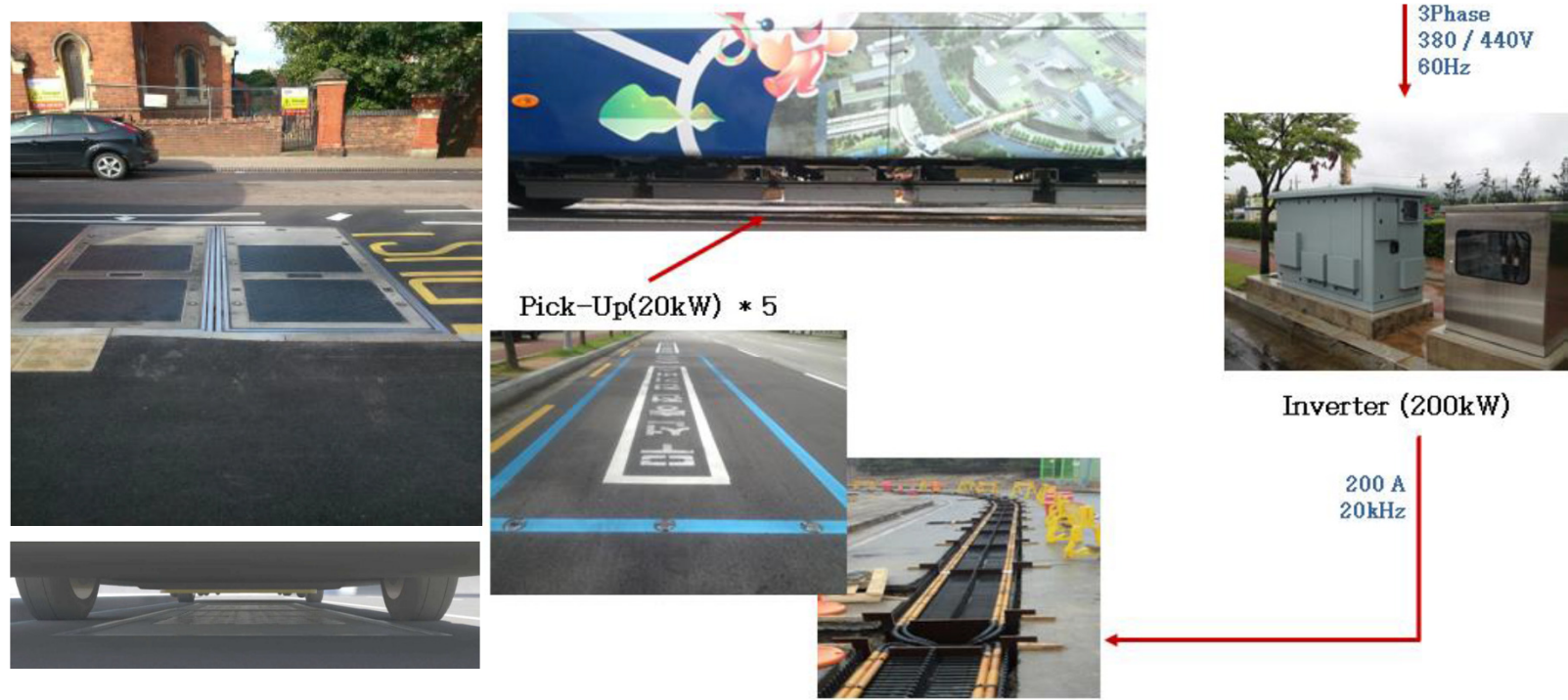
Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten (€/km)
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3km folgt daraus 5.000,--/km	5.000,--
Zuleitung vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 50,-- pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet); ca. 100,-- pro lfd. m Kabel; bei durchschnittlich 500m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3km folgt daraus 25.000,-- je km	25.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	ca.50,-- pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100,-- pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000,-- je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000,-- je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Verlegung im Graben des Gleichspannungskabels, ca. 100,-- pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000,-- je km Strecke (einseitig)	150.000,--
Umspannstationen	ca. 250.000,-- pro MVA (incl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 25 MVA/3km, d.h. ca. 8,3 MVA/km Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 2,1 Mio. € pro Umspannstation	2.100.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100,-- pro lfd. m, unter der Annahme dass die Umspannstationen im Abstand von 1km an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 10.000,--/km	10.000,--
Stromleiterinfrastruktur in der Fahrbahn	Gemäß den Angaben aus dem Projekt „LUAS City Broombridge“	1.850.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10% der Investitionskosten	450.000,--
	Summe	4.900.000,--

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Grobe Kostenschätzung des Systems „Stromschiene“ (Worst-Case-Betrachtung)

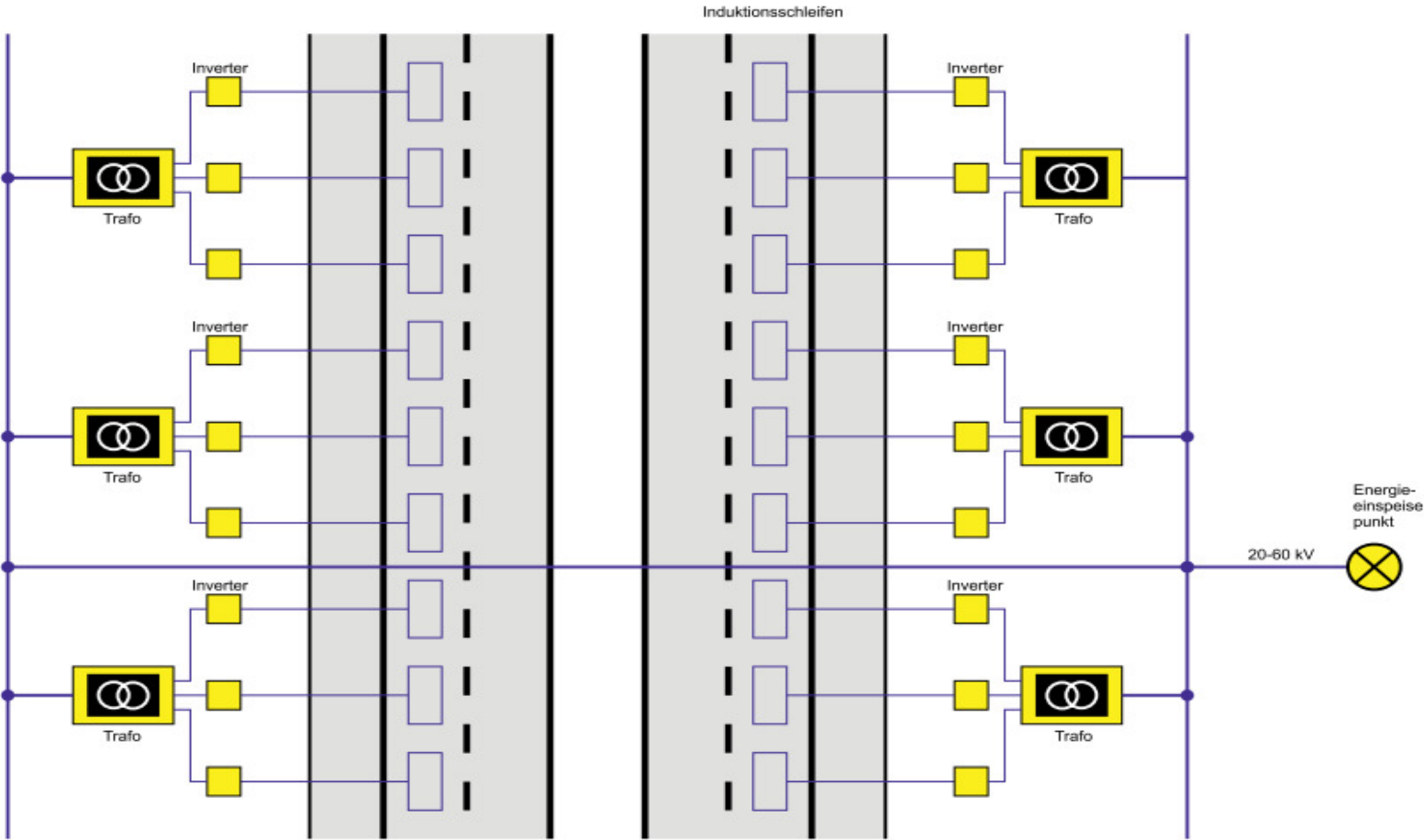
Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten (€/km)
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3km folgt daraus 5.000,--/km	5.000,--
Zuleitung vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 200,-- pro lfd m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100,-- pro lfd m Kabel; bei Ø 2,5km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 250.000,--/km	250.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Gleichspannung)	ca.50,-- pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100,-- pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000,-- je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000,-- je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Verlegung im Graben des Gleichspannungskabels, ca. 100,-- pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000,-- je km Strecke (einseitig)	150.000,--
Umspannstationen	ca. 350.000,-- pro MVA (incl. Kommunikations- und Sicherheitstechnik); bei 25 MVA/3km, d.h. ca. 8,3 MVA/km Leistungsbedarf ergeben sich Kosten von 2,5 Mio. € pro Umspannstation	2.500.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100,-- pro lfd. m, unter der Annahme dass die Umspannstationen im Abstand von 1km an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 10.000,--/km	10.000,--
Leiterinfrastruktur in der Fahrbahn	Gemäß den Angaben aus dem Projekt „LUAS City Broombridge“	1.850.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10% der Investitionskosten	525.000,--
	Summe	5.600.000,--

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau Alternative Ladeinfrastruktur – Induktives System



Quelle: <http://www.fabric-project.eu>

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau Prinzip des Induktiven System



MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Komponenten des Induktiven Systems

Komponente	Eigenschaften / Anforderungen
Energieeinspeisepunkt	Abzweig aus dem bestehenden Mittelspannungsnetz des lokalen EVU, z.B. an einem Umspannwerk, einem Erdkabel oder an einer Freileitung
Zuleitung vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	20-60kV Leitungen; es ist mit Zuleitungslängen von 500m (Ballungsräume) bis 3.000m (in ländlichen Gebieten) zu rechnen.
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	Erdkabel entlang der versorgten Strecke für 20-60kV Wechselspannung; Variante 1: Verkabelung beidseits der Strecke Variante 2: Fahrbahnquerungen in regelmäßigen Abständen (Durchörterungen mit erhöhten Tiefbau- aber geringeren Kabelkosten gegenüber Variante 1)
Transformatorstationen	Wegen der Leistungsübertragung auf 400V-Ebene mit entsprechend hohen Leitungsquerschnitten sind Trafostationen im Abstand von ca. 250m zu errichten, welche die Inverter der Induktionsschleifen mit je ca. 250kW Leistung versorgen
Inverter	Wechselrichter, die jeweils eine Schleife speisen. Die Inverter können am Standort der Trafostation untergebracht werden, entweder abgesichert oberirdisch, oder unterirdisch
Induktionsschleifen	Die Induktionsschleifen sind flächendeckend in den Fahrbahnen einzubauen. Hierbei kommen nur Systeme in Frage, die so tief eingebracht werden können, dass sie eine Sanierung der Deckschicht zuverlässig überstehen, da ansonsten mit jeder Fahrbahnerneuerung dieser Systemteil komplett erneuert werden muss

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Grobe Kostenschätzung des Induktiven Systems (Best-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten (€/km)
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3km folgt daraus 5.000,--/km	5.000,--
Zuleitung vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 50,-- pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet); ca. 100,-- pro lfd. m Kabel; bei durchschnittlich 500m Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 75.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3km folgt daraus 25.000,-- je km	25.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	ca.50,-- pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100,-- pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000,-- je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000,-- je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Transformatorstationen	ca. 600.000,-- je km (beidseitig)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100,-- pro lfd. m, unter der Annahme dass die Trafostationen im Abstand von 250m an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 40.000,--/km	40.000,--
Inverter + Induktionsschleifen	Gemäß den Angaben aus dem Projekt Fabric ist für das eigentliche Induktionssystem mit Kosten von ca. 3,2 Mio. € je km (beidseitig) zu rechnen	3.200.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10% der Investitionskosten	420.000,--
Summe		4.590.000,--

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Grobe Kostenschätzung des Induktiven Systems (Worst-Case-Betrachtung)

Komponente	Berechnungsgrundlagen	Kosten (€/km)
Energieeinspeisepunkt	ca. 15.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3km folgt daraus 5.000,--/km	5.000,--
Zuleitung vom Energieeinspeisepunkt zur Längsverkabelung entlang der Strecke	ca. 200,-- pro lfd m Kabelgraben (Tiefbau, bebautes Gebiet), ca. 100,-- pro lfd m Kabel; bei Ø 2,5km Anschlusslänge ergeben sich Kosten von 750.000,-- pro Anschluss; bei einem Anschlussraster von 3 km folgt daraus 250.000,--/km	250.000,--
Längsverkabelung entlang der Strecke (Wechselspannung)	ca.50,-- pro lfd. m Kabelgraben (Tiefbau entlang Strecke ohne Kunstbauten); ca. 100,-- pro lfd. m Kabel; daraus folgt 150.000,-- je km Strecke (einseitig) bzw. 300.000,-- je km Strecke (beidseitig)	300.000,--
Transformatorstationen	ca. 600.000,-- je km (beidseitig)	600.000,--
Passive Schutzeinrichtungen	100,-- pro lfd. m, unter der Annahme dass die Trafostationen im Abstand von 250m an einer Seite der Strecke oberirdisch aufgestellt werden und mit je 100m zusätzlicher Schutzplanke abgesichert werden müssen, ergeben sich Kosten von 40.000,--/km	40.000,--
Inverter + Induktionsschleifen	Gemäß den Angaben aus dem Projekt Fabric ist für das eigentliche Induktionssystem mit Kosten von ca. 3,2 Mio. € je km (beidseitig) zu rechnen	3.200.000,--
Projektierung, Planung, Ausschreibung, PM etc.	ca. 10% der Investitionskosten	435.000,--
	Summe	4.830.000,--

MKS-HO-LKW, Datengrundlage Infrastrukturaufbau

Kostenvergleich alternativer Ladeinfrastrukturen

Systemvariante	Notwendiger Ausstattungsgrad	Kosten [Mio. € je km]
Oberleitungen	30%	3,50 – 4,80
Stromschiene	30%	4,90 – 5,60
Induktives System	> 90%	4,59 – 4,83

FACHWORKSHOP „HYBRID-OBERLEITUNGS-LKW“

Entwicklung des Lkw-Sektors und der Benchmarktechnologie
Diesel-Lkw – André Kühn (Fraunhofer ISI)



Berlin, 01. März 2016

Übersicht Parameter

Allgemeine und konventionelle Diesel-Lkw

1. Aufteilung der Fahrzeuge nach Gewichtsklassen
2. Fahrleistungsentwicklung je Gewichtsklasse
3. Wert von Volumen und Nutzlast
4. Fahrleistungsverteilung
5. Entwicklung konventioneller Lkw bis 2030 (für heute, 2020 und 2030)
 1. Energieverbräuche der Fahrzeuge
 2. Nettopreise
 3. Nutzungsdauer der Fahrzeuge und Restwerte
 4. Maut
 5. Wartungskosten
 6. Personalkosten
 7. Sonstige

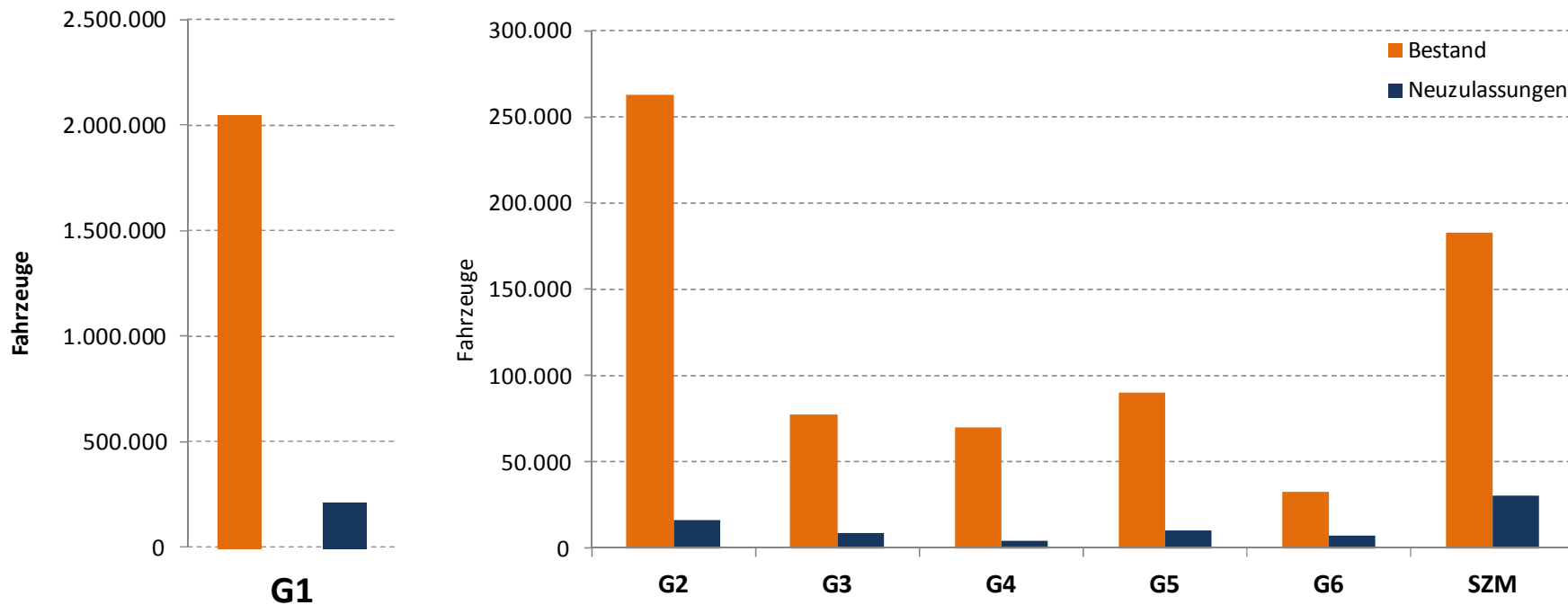
Übersicht Parameter

Allgemeine und konventionelle Diesel-Lkw

- 1. Aufteilung der Fahrzeuge nach Gewichtsklassen**
2. Fahrleistungsentwicklung je Gewichtsklasse
3. Wert von Volumen und Nutzlast
4. Fahrleistungsverteilung
5. Entwicklung konventioneller Lkw bis 2030 (für heute, 2020 und 2030)
 1. Energieverbräuche der Fahrzeuge
 2. Nettopreise
 3. Nutzungsdauer der Fahrzeuge und Restwerte
 4. Maut
 5. Wartungskosten
 6. Personalkosten
 7. Sonstige

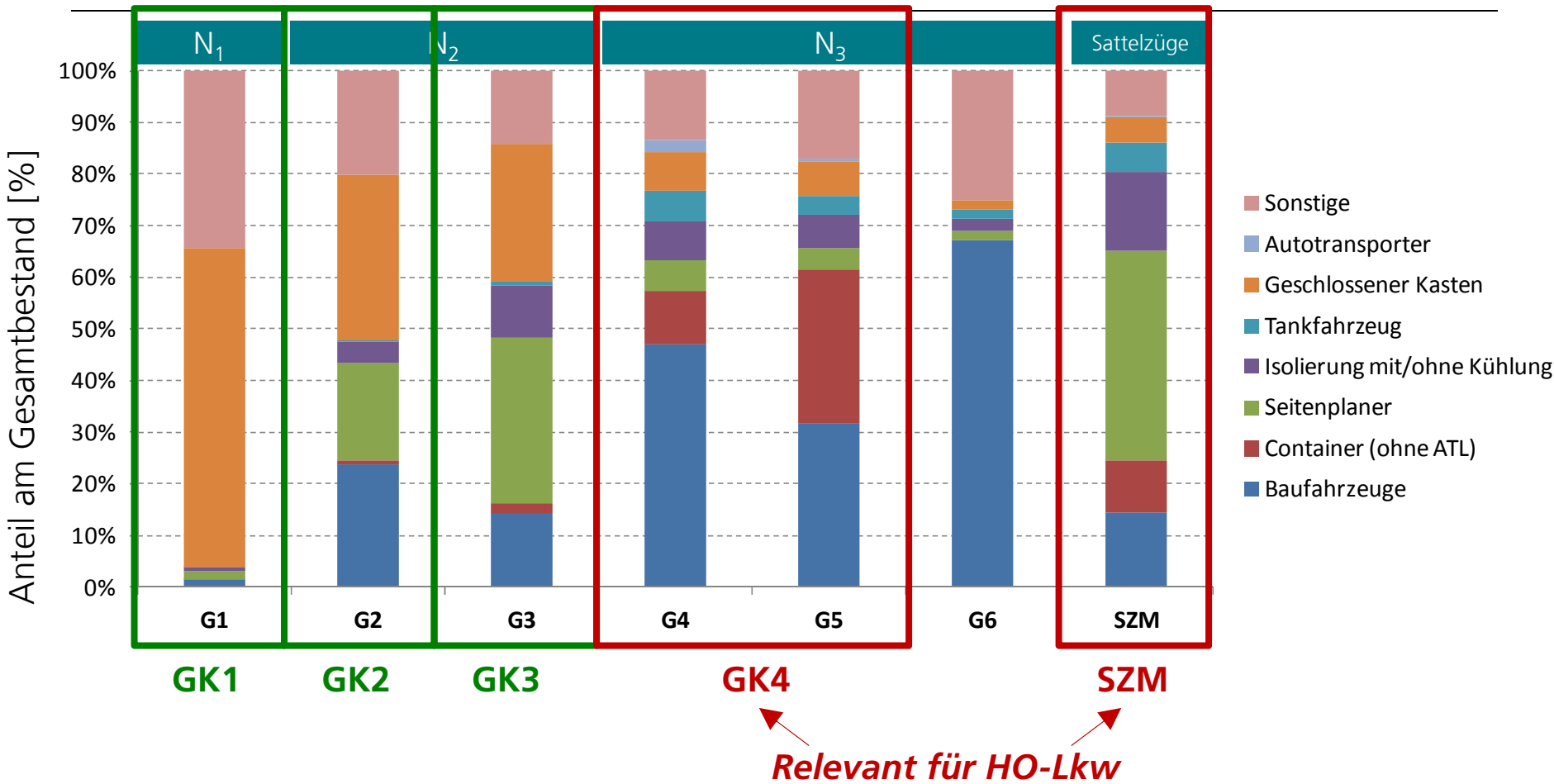
Neuzulassungen und Bestand nach zul. GGW im Jahr 2013

N ₁	N ₂		N ₃			Sattelzüge
G1	G2	G3	G4	G5	G6	
[0 ; 3,5t]	(3,5t ; 7,5t]	(7,5t ; 12t]	(12t ; 18t]	(18t ; 26t]	(26t ; 32t]	40t



Quelle: KBA Bestand (FZ25) und Neuzulassungen (FZ26)

Aggregierte Aufteilung Bestand (2013) nach Größenklassen für diese Studie



Quelle: KBA Bestand 2013 (FZ 25)

Übersicht Parameter

Allgemeine und konventionelle Diesel-Lkw

1. Aufteilung der Fahrzeuge nach Gewichtsklassen
- 2. Fahrleistungsentwicklung je Gewichtsklasse**
3. Wert von Volumen und Nutzlast
4. Fahrleistungsverteilung
5. Entwicklung konventioneller Lkw bis 2030 (für heute, 2020 und 2030)
 1. Energieverbräuche der Fahrzeuge
 2. Nettopreise
 3. Nutzungsdauer der Fahrzeuge und Restwerte
 4. Maut
 5. Wartungskosten
 6. Personalkosten
 7. Sonstige

Entwicklung der Fahrleistung in der Verflechtungsprognose

Inländer-Verkehrsleistung:

Tab. 6-3: Entwicklung der Kfz-Fahrleistungen¹⁾ nach Fahrzeugarten

	Mrd. Fzkm		2030/10 (%)	
	2010	2030	Insg.	p.a.
Pkw	599,0	657,4	9,7	0,5
Motorisierte Zweiräder	16,3	18,1	10,8	0,5
Omnibusse	3,3	3,5	6,3	0,3
Lkw / Sattelzugmaschinen	77,6	99,7	28,5	1,3
- Schwere Nutzfahrzeuge ²⁾	29,8	36,7	23,0	1,0
- Leichte Nutzfahrzeuge ²⁾	47,8	63,1	32,0	1,4
Sonstige Kfz ³⁾	8,5	11,0	29,3	1,3
Insgesamt	704,8	789,8	12,1	0,6

1) Inländer-Fahrleistungen
 2) Größer bzw. kleiner/gleich 3,5 t Nutzlast
 3) Übrige Kfz in der Abgrenzung des KBA (Polizei-, Feuerwehr-, Müllfahrzeuge, Arbeitsmaschinen u. a.) sowie restliche Zugmaschinen (außer in der Landwirtschaft).

Quelle: DIW, eigene Prognosen

(vgl. Verflechtungsprognose S. 334)

- Verkehrsleistung in **Fztkm leitet sich** aus der Entwicklung der Güterbeförderungsleistung (**tkm**) ab
 → Berücksichtigung des **Güterstruktureffektes**
- Nur Berücksichtigung der Entwicklung der **Inländer-Verkehrsleistung** (maßgeblich für dt. Nutzfahrzeug-Flotte)
- Anstieg der FL **leichter Nutzfahrzeuge** (bis 6t zul. GGW) **um 1,4% jährlich**; **schwere Nutzfahrzeuge** um **1,0% pro Jahr**.

Quelle: Verflechtungsprognose des BVWP

Ex-post-Entwicklung der Fahrleistung nach Gewichtsklassen



- Anteil **Sattelzüge** an der FL von über **60%** (Tendenz **steigend**)
- Anteil der Gewichtsklasse **GK2** an der FL unter **1%** (Tendenz leicht **fallend**)
- Anteil der Gewichtsklasse **GK3** an der FL bei etwa **8%** (**konstant**)
- Anteil der Gewichtsklasse **GK4** an der FL bei etwa **28%** (Tendenz leicht **fallend**)

Quelle: KBA Kraftverkehrsstatistik VD3, S.10 bis 11

Ex-ante-Entwicklung der Fahrleistung nach Gewichtsklassen


Annahmen:

„Mauteffekt“ (Verlagerung von GK4 zu GK3) nicht weiter relevant

„Führerscheineffekt“ (Verlagerung von GK2 zu GK1) nicht weiter relevant



- Anteil der Gewichtsklasse **GK2** und **GK3 konstant** ab dem Jahr 2014
- Anteil der Gewichtsklasse **SZM** steigt mit **+0,4% jährlich** (Ø-Wachstum Anteil FL zwischen 2009 und 2014)
- Anteil der Gewichtsklasse **GK4** ergibt sich aus der Differenz zu 100%.

	2014	2020	2030	
Anteil an der gesamten FL 	GK2	0,4%	0,4%	0,4%
	GK3	8,3%	8,3%	8,3%
	GK4	27,8%	26,6%	24,2%
	SZM	63,5%	64,7%	67,1%

Quelle: eigene Berechnungen

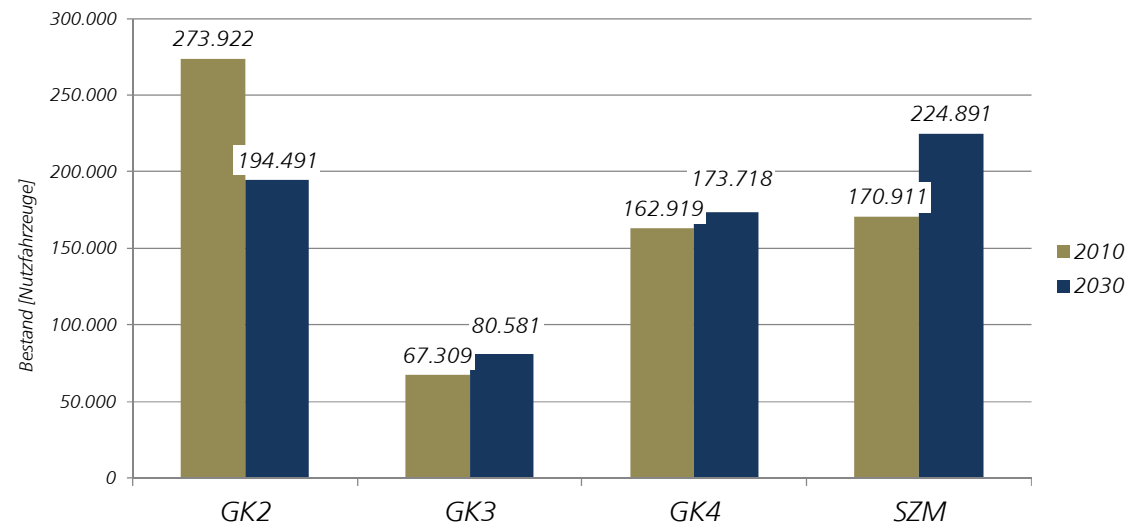
Ex-ante-Entwicklung des Nutzfahrzeugbestandes

Annahmen:

Jährliche Fahrleistung einzelner Nutzfahrzeuge konstant

→ Bestand an Nutzfahrzeuge wächst analog zur Fahrleistung

- Gewichtsklasse **GK1** wächst um jährlich **1,40%** (von 1,8 auf 2,4 Mio. Fzg.) (vgl. FL-Wachstum Verflechtungsprognose S. 334)
- Bestand **GK2** geht zurück
- Bestände **GK3, GK4** und **SZM** wächst



$$\text{Anzahl Neuzulassungen (t)} = [\text{Bestand (t)} - \text{Bestand (t-1)}] + \text{Ersetzungen (t)}$$

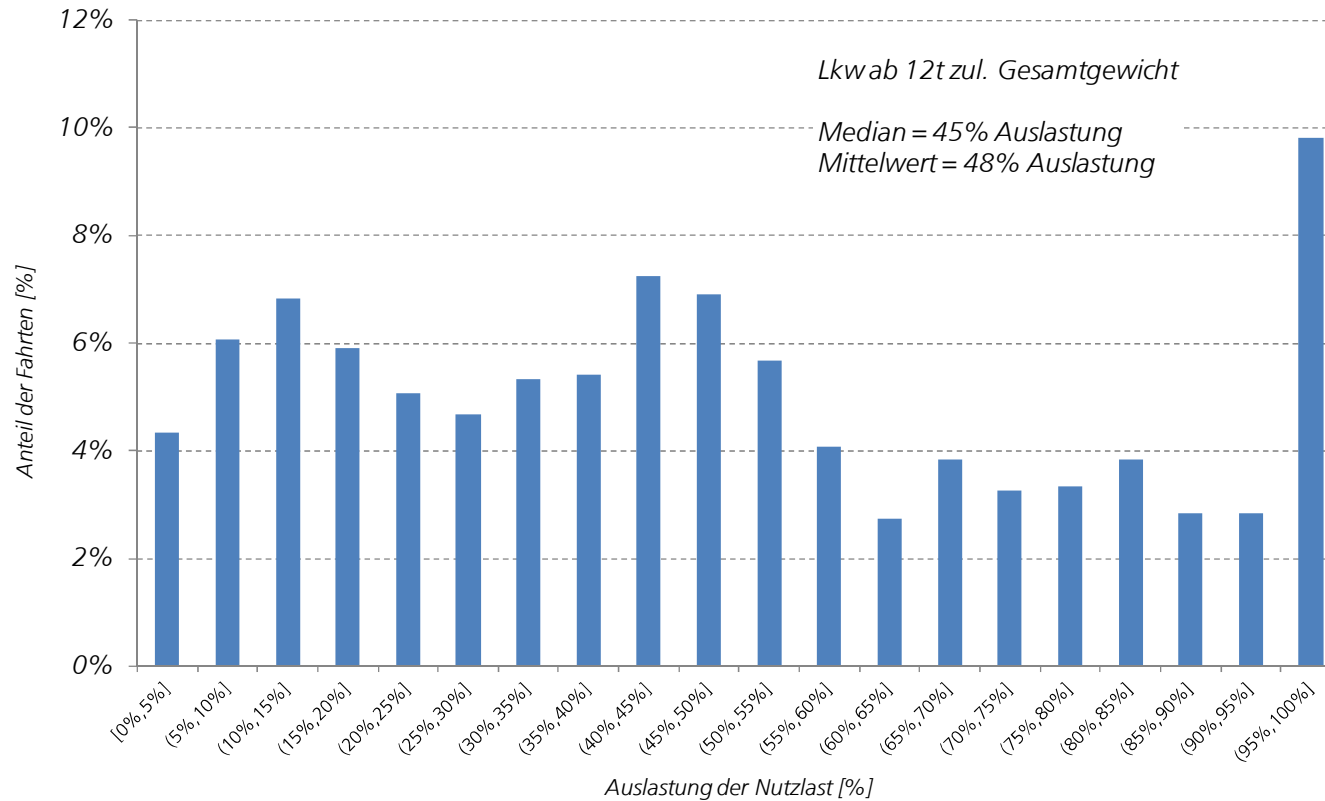
Quelle: eigene Berechnungen

Übersicht Parameter

Allgemeine und konventionelle Diesel-Lkw

1. Aufteilung der Fahrzeuge nach Gewichtsklassen
2. Fahrleistungsentwicklung je Gewichtsklasse
- 3. Wert von Volumen und Nutzlast**
4. Fahrleistungsverteilung
5. Entwicklung konventioneller Lkw bis 2030 (für heute, 2020 und 2030)
 1. Energieverbräuche der Fahrzeuge
 2. Nettopreise
 3. Nutzungsdauer der Fahrzeuge und Restwerte
 4. Maut
 5. Wartungskosten
 6. Personalkosten
 7. Sonstige

Auslastung der Nutzlast bei Fahrten von Lkw ab 12t zul. GGW



- **Etwa 16% aller Fahrten** von Lkw ab 12t zul. GGW erreichen eine **Nutzlastauslastung von mehr als 85%**
- Die restlichen **84%** der Fahrten sind entweder **nicht voll ausgelastet ODER** erreichen die **Nutzvolumen-Grenzen**

Quelle: Auswertung der Befragung „Kraftverkehr in Deutschland“ (KiD) für Fahrten mit zul. GGW. ab 12t

Betriebswirtschaftliche Bewertung von Nutzlast- und Nutzvolumeneinbußen

- Transporte können sowohl die **Nutzlast-** als auch die **Nutzvolumenbegrenzung** erreichen
→ Betriebswirtschaftliche Berücksichtigung beider Fälle

$$\text{Bestimmung der Fahrleistungsintensität (FLI)} = \frac{1}{\text{Transportkapazität}}$$

Tonnen pro Lkw Lademeter pro Lkw / m³ pro Lkw

- Ableitung von drei betriebswirtschaftlichen Kennzahlen durch **Multiplikation** der **FLI** mit den **Transportkosten pro Fzg.-km**:
 - **Transportkosten pro Tonnenkilometer,**
 - **Transportkosten pro Lademeter** und/oder,
 - **Transportkosten pro m³.**



Berücksichtigung der Auswirkungen auf Nutzlast und- volumen durch Berechnung der **drei Transportkosten-Kennzahlen**

Verknüpfung mit der Verteilung zur Nutzlastauslastung (vgl. KiD-Auswertung)

Anmerkung: Kennzahlen berücksichtigen nicht den zusätzlichen Bedarf an Fahrzeugen → Transportkosten pro Fzg.-km bleiben konstant

Übersicht Parameter

Allgemeine und konventionelle Diesel-Lkw

1. Aufteilung der Fahrzeuge nach Gewichtsklassen
2. Fahrleistungsentwicklung je Gewichtsklasse
3. Wert von Volumen und Nutzlast
- 4. Fahrleistungsverteilung**
5. Entwicklung konventioneller Lkw bis 2030 (für heute, 2020 und 2030)
 1. Energieverbräuche der Fahrzeuge
 2. Nettopreise
 3. Nutzungsdauer der Fahrzeuge und Restwerte
 4. Maut
 5. Wartungskosten
 6. Personalkosten
 7. Sonstige

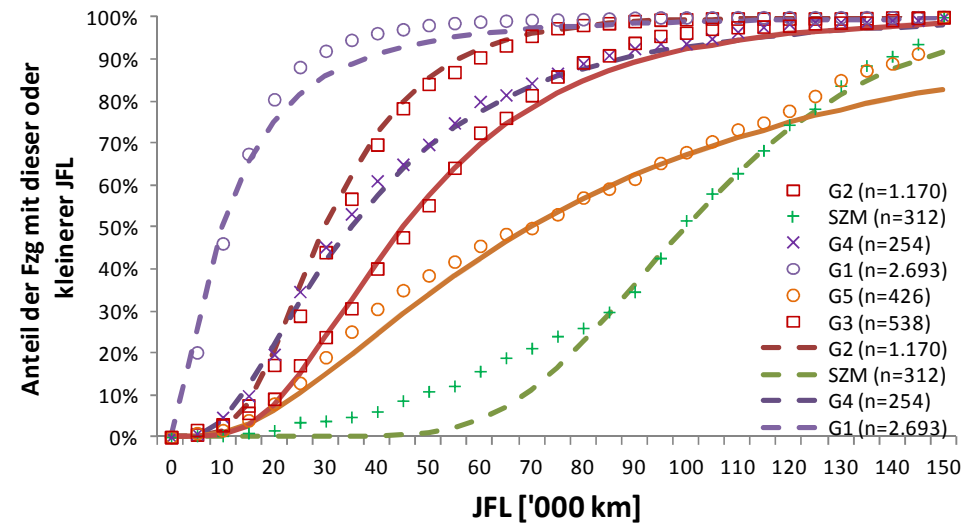
Ermittlung der Jahresfahrleistungen auf Basis einer Stichprobe von Gebrauchtfahrzeugen

- **KBA-Kraftverkehrsstatistik** liefert keine detaillierten Fahrleistungsverteilungen
 - **Stichprobe gebrauchter deutscher Nutzfahrzeuge** auf dem Portal truckscout24.de (Erhebungszeitraum: 11/2012 bis 02/2014)
 - **Stichprobengröße: 5.393 Fzg.** in sieben Gewichtsklassen (Aufbauarten: Seitenplaner, Kühlkoffer, Wechselbrücke, Kipper)
- Mit steigendem Gesamtgewicht wächst die Jahresfahrleistung; Mittelwert der FL leicht über dem Wert der KBA-Statistik



Verwendung der Stichprobe aus truckscout24 zur Bestimmung der Anteile der JFL

Verteilung der Jahresfahrleistung (JFL):



Mittelwert JFL _{SZM} Stichprobe:	98.300 km/a
Mittelwert JFL _{SZM} KBA (nur Inland):	81.371 km/a ¹
Mittelwert JFL _{SZM} KiD:	124.714 km/a

¹ Mittelwert aus den Jahren 2012 bis 2014

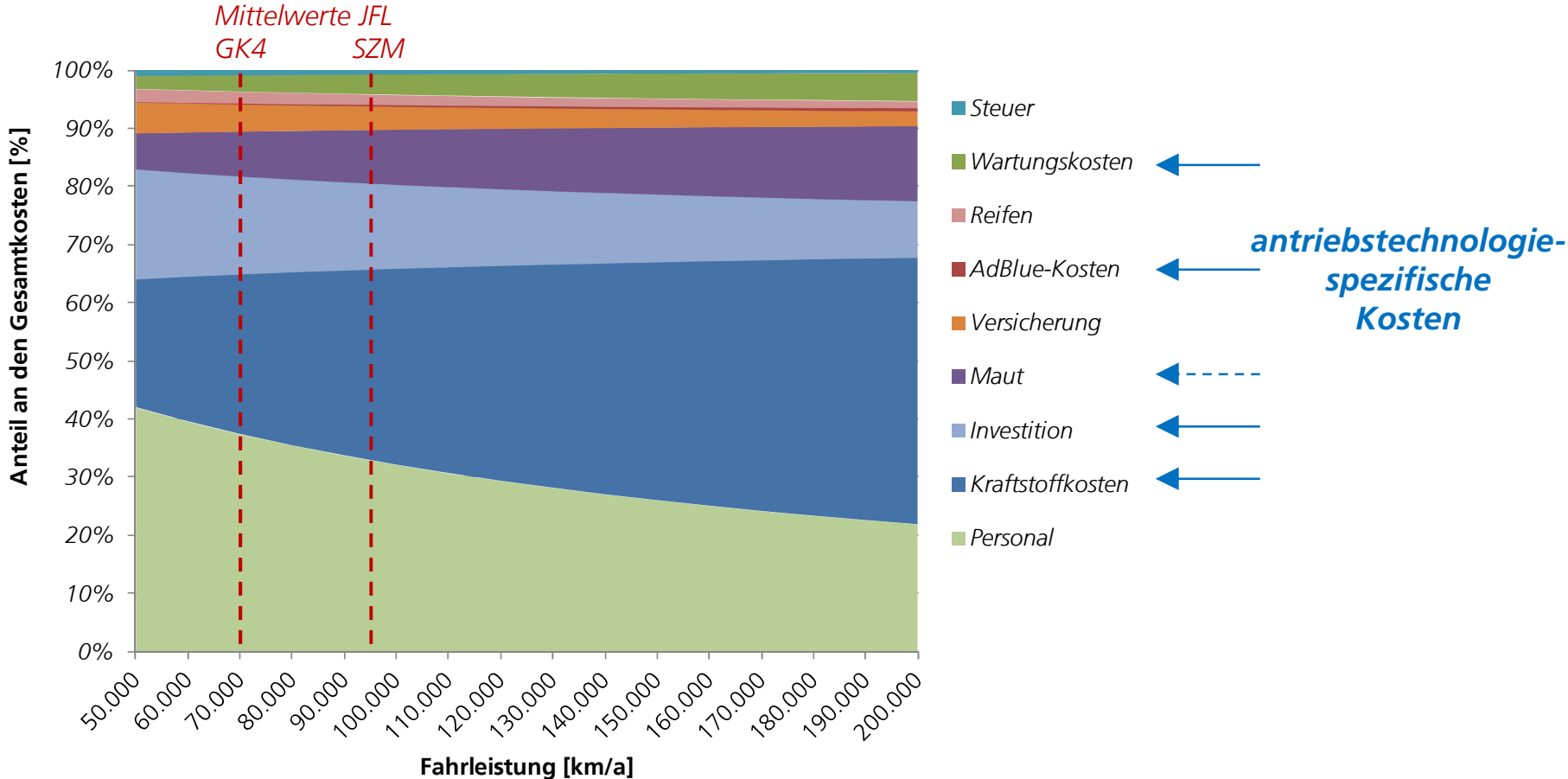
Quellen: KBA VD3; Kraftverkehr in Deutschland (KiD) sowie truckscout24.de

Übersicht Parameter

Allgemeine und konventionelle Diesel-Lkw

1. Aufteilung der Fahrzeuge nach Gewichtsklassen
2. Fahrleistungsentwicklung je Gewichtsklasse
3. Wert von Volumen und Nutzlast
4. Fahrleistungsverteilung
- 5. Entwicklung konventioneller Lkw bis 2030 (für heute, 2020 und 2030)**
 1. Energieverbräuche der Fahrzeuge
 2. Nettopreise
 3. Nutzungsdauer der Fahrzeuge und Restwerte
 4. Maut
 5. Wartungskosten
 6. Personalkosten
 7. Sonstige

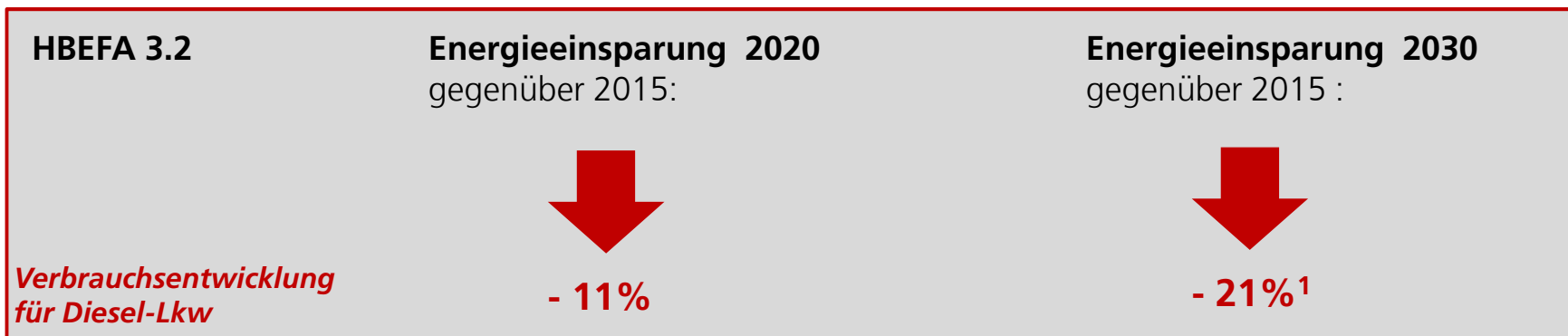
Struktur der Transportkosten aus Sicht der Nutzer



Quellen: eigene Berechnungen basierend auf Lastauto Omnibus Katalog 2015; HBEFA 3.2 sowie Wittenbrink (2011)

Realer Energieverbrauch der Fahrzeuge (TTW) Datenquellen

Heute (2015)	2020	2030
Handbuch der Emissions- faktoren (HBEFA 3.2)	Maßnahmen, die bereits heute verfügbar sind oder leicht eingeführt werden können: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aerodynamische Maßnahmen ▪ Leichtlaufreifen ▪ Sparsame Nebenverbraucher 	Maßnahmen, die in den kommenden zehn Jahren Marktreife erlangen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Weitere aerodynamische Maßnahmen ▪ Zukünftige Leichtlaufreifen ▪ Getriebeoptimierung ▪ Motoroptimierung

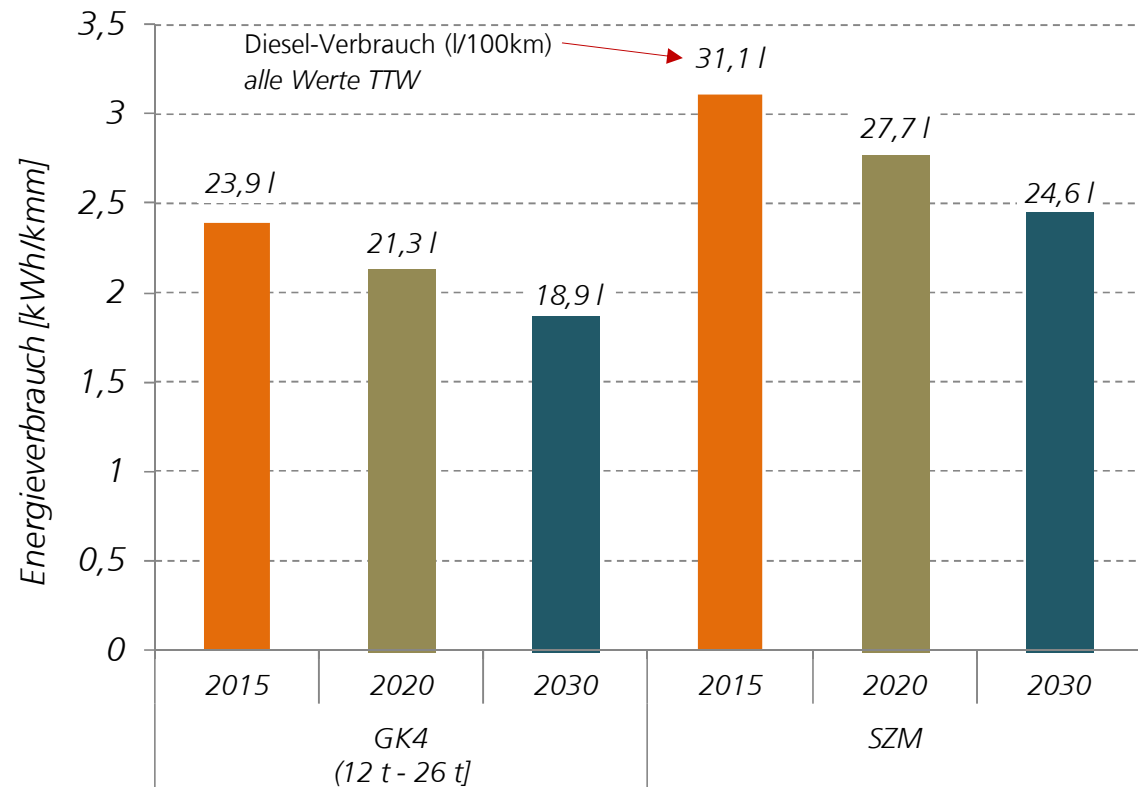


Quelle: Ifeu-Studie „Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen“ (Dünnebeil et al. 2015)

¹Davon etwa 16%-Punkte unabhängig vom Antrieb

Realer Energieverbrauch der Fahrzeuge und Nettolistenpreise

- Angenommene **Auslastung** der Nutzlast: **50%**
- **Effizienztechnologien** (aerodynamisch und motorseitig) **senken** die **Kraftstoffverbräuche** zwischen den Jahren 2015 und 2030 **um etwa 21%** (vgl. Dünnebeil et al. 2015)
- **Durch den Einsatz von Effizienztechnologien erhöhen** sich die **Nettolistenpreise** (NLP) um etwa **26%** bis 2030 (vgl. Dünnebeil et al. 2015)
- **Nettolistenpreise** der GK:
 - GK 4:
65.000 € (2015) → 83.000 € (2030)
 - SZM:
102.000 € (2015) → 129.000 € (2030)



Quellen: Werte für 2015: HBEFA 3,2 (TTW); Werte für 2020 u. 2030: Dünnebeil et al. 2015

Nutzungsdauern und Restwert

- Nach dem **Ende der Nutzungsdauer** beträgt der **Restwert 0 Euro**
- **Lebensdauer \neq Nutzungsdauer \neq Haltedauer**
- Nutzungsdauer abhängig von Fahrleistung (FL):
Je **höher die FL** desto **geringer die Nutzungsdauer**
- **Bestimmung der Nutzungsdauer** anhand des dt. Bestandes **kritisch** (z.B. SZM werden im Durchschnitt nach etwa 4 bis 5 Jahren¹ veräußert; eventuell exportiert)
- Annahmen für Nutzungsdauer basieren daher auf **KBA-Bestand² und Schätzungen**

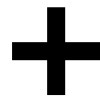
Gewichtsklassen	Jährliche Ersetzungen in % des Gesamtbestandes	Nutzungsdauer [a]
GK4	10,0%	10
SZM	12,5%	8

Quelle: ¹Stichprobe truckscout24 ²KBA-Fahrzeugbestand (FZ25) und Neuzulassungen (FZ26) der Jahre 2009 bis 2013

Straßenbenutzungsgebühr für Lkw ab 7,5t zul. Gesamtgewicht

Auszug aus dem Bundesfernstraßenmautgesetz – BFStrMG (alle Wert in €/ct/km):

Beitrag zur Luftverschmutzung



Beitrag zur Belastung der Infrastruktur

	Kategorie A	Kategorie B	Kategorie C	Kategorie D
Schadstoffklasse	S6	EEV Klasse 1, S5	S4, S3 mit PMK 2*	S3, S2 mit PMK 1*
Euro-Schadstoffklasse	Euro 6	EEV 1, Euro 5	Euro 4, Euro 3 + PMK 2*	Euro 3, Euro 2 + PMK 1*
Kosten für Luftverschmutzung [€/ct]	0	2,1	3,2	6,3
Achszahl	2	3	4	ab 5
Mautsatz-Anteil [€/ct]	8,1	11,3	11,7	13,5

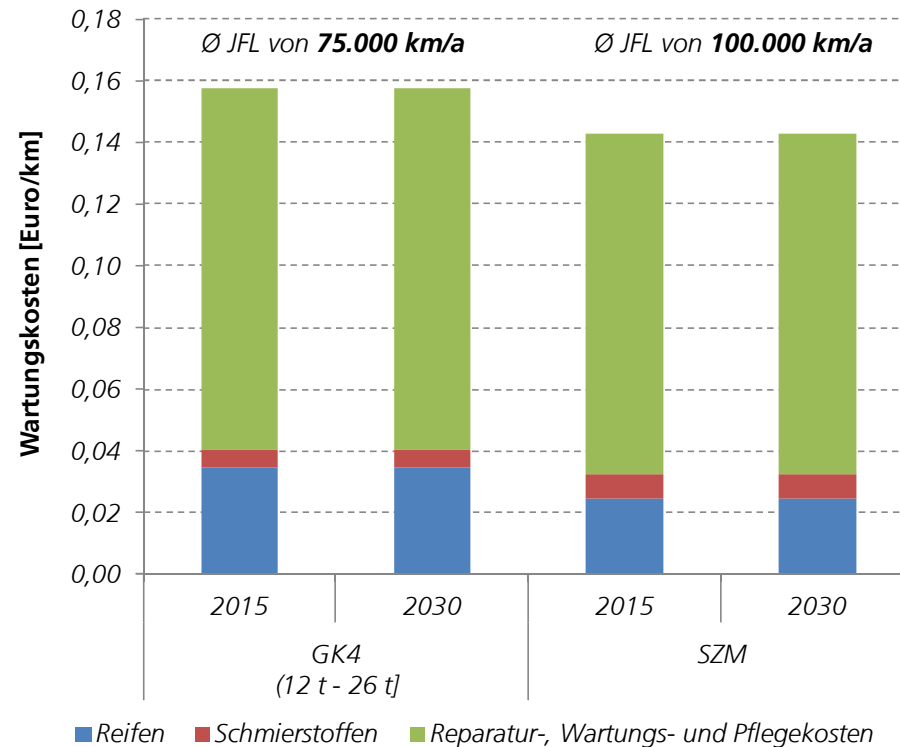


Mit Euro 6-Norm sinken die **Kosten für Luftverschmutzung auf 0**
 → **Antriebstechnologie-unabhängig** wird der Mautsatz durch die **Anzahl Achsen bestimmt**

Quelle: Bundesfernstraßenmautgesetz – BFStrMG

Wartungskosten

- Wartungskosten setzen sich aus **variablen und fixen Komponenten** zusammen
- **Variable** Kosten sind beispielsweise Reifenkosten
- **Fixe** Bestandteile sind beispielsweise Inspektion oder Ölwechsel
- Keine Aussagen über zukünftige Entwicklung
→ **Werte konstant** bis 2030



Quelle: Lastauto Omnibus Katalog 2015

Personalkosten zur Bestimmung der Gesamtkosten pro Fzg.-km

- Gesamtkosten (**antriebstechnikspezifische + antriebstechnikunspezifische**) relevant zur Bestimmung der **Wirkung veränderter Nutzlast- /Nutzvolumen**
 - **Personalkosten** mit Abstand **größter Bestandteil** der antriebstechnikunspezifischen Kosten
-
- **Bruttolohn** Fernverkehrsfahrer: etwa 27.000 €/a
 - **Spesen**: 15 Euro/Einsatztag
 - Einsatztage: 250 d/a
 - **Personalfaktor**: 1,2-1,3 (Urlaub, Krankheit, Lenk- und Ruhezeiten)
 - **Arbeitgeberbeiträge** Sozialversicherung: 20 – 25 % der direkten Personalkosten

$$\text{Personalkosten} = (\text{Bruttolohn} * (1 + \text{Arbeitgeberbeiträge}) + \text{Spesen} * \text{Einsatztage}) * \text{Personalfaktor}$$



Personalkosten / Lkw: etwa 48.750 Euro pro Jahr

Unter Berücksichtigung der Personalkosten entstehen bei einer JFL von 100.000 km /a **Transportkosten** in einer Höhe von **etwa 1,30 Euro pro Fzg.-km.**

Quelle: Wittenbrink 2011: Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr

Sonstige Kosten

- **Längere Standzeiten für Wartung/Instandhaltung?**
- **Einsatzflexibilität?**
- **Handlingskosten?**
- **Schulungskosten Fahrer?**
- **Verschärfung der Personalengpässe durch Fahrermangel?**



Quellen:

Dünnebeil, Frank; Reinhard, Carsten; Lambrecht, Udo; Kies, Antonius; Hausberger, Stefan; Rexeis, Martin (2015): Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasreduzierung bei schweren Nutzfahrzeugen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Hg. v. Umweltbundesamt. Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH (Heidelberg). Dessau-Roßlau.

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2013): Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kfz-Anhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) (FZ 25). Stichtag: 1. Januar 2013. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2014): Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kfz-Anhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) (FZ 26). Stichtag: 1. Januar 2013. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2014): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) Inlandsverkehr (VD 3). Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Lastauto Omnibus-Katalog 2015 (2014). 1. Aufl. Stuttgart: Motorbuch.

Wittenbrink, P. (2011): Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr. Grundlagen - Optimierungspotenziale - Green Logistic. Wiesbaden: Gabler.

Backup

Voraussichtlicher Einsatz von Antriebstechnologien

Größenklasse	GK1	GK2	GK3	GK4	Sattelzüge
Zul. GGW [t]	[0 ; 3,5t]	(3,5t ; 7,5t]	(7,5t ; 12t]	(12t ; 26t]	40t
Ø Jahreslaufleistung [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.
potentielle Antriebstechnologie	BEV / PHEV				
	Brennstoffzelle				
	CNG / LNG				
				HO-Lkw	

enthält Gliederzüge
(3 + 2 Achsen)

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

Ex-ante-Entwicklung der Neuzulassungen

$$\text{Anzahl Neuzulassungen (t)} = [\text{Bestand (t)} - \text{Bestand (t-1)}] + \text{Ersetzungen (t)}$$

Gewichtsklassen	Jährliche Ersetzungen in % des Gesamt- bestandes	Nutzungsdauer [a]	Durchschnittliche jährliche Zunahme (2014 bis 2030) Bestand [%] analog zur Zunahme der Fahrleistung	Zulassungen 2014 (laut KBA FZ26)		Zulassungen 2030	
				[Lkw/Jahr]			
GK1	12,5%	8	0,70%	224.000	333.000		
GK2	8,3%	12	-1,54%	13.000	13.000		
GK3	10,0%	10	0,05%	7.000	9.000		
GK4	10,0%	10	0,64%	14.000	18.000		
SZM	16,7%	6	1,11%	34.000	40.000		



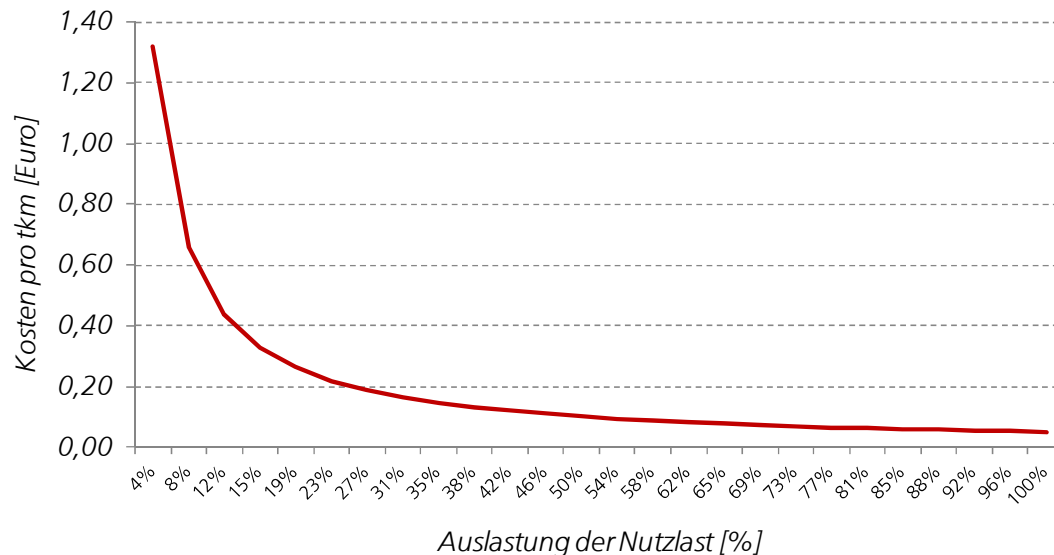
↑
abgeleitet aus den Beständen und
Neuzulassungen der Jahre 2009 bis 2014 (KBA FZ25 u. FZ26)

↑
aus Verflechtungsprognose

Quelle: eigene Berechnungen

Transportkosten in Abhängigkeit von der Nutzlastauslastung

Kostenkurve pro Tkm bei einer Nutzlast von 26t (Sattelzug) und Transportkosten von 1,30 Euro pro Fzg.-km

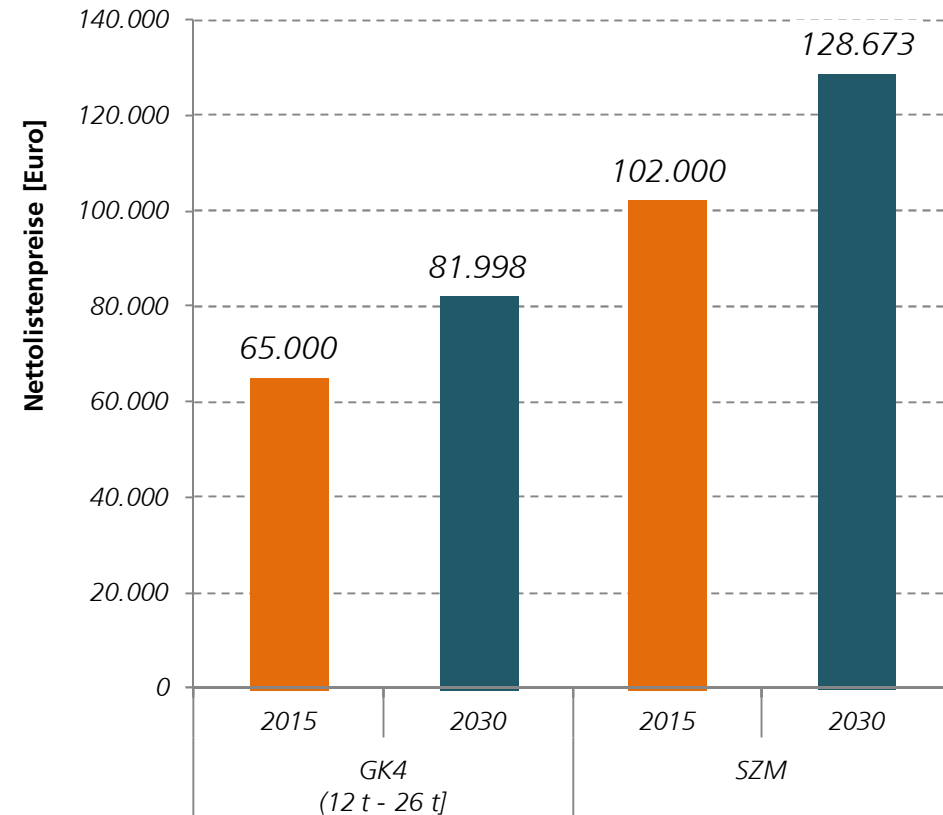


- **Frage:** Wie wirkt sich eine **Veränderung der Nutzlast / des Nutzvolumens** durch den Einsatz alternativer Antriebe auf die **Transportkosten** aus?
 - **Kosten** pro Tkm **sinken** mit **steigender Auslastung** der Nutzlast
 - Kosten nehmen **exponentiell** ab
- **Kostendifferenzen bei hohen Nutzlastauslastungen gering**

Quelle: eigene Berechnungen unter der Annahme von Transportkosten pro Fzg.-km von 1,30 Euro (vgl. Wittenbrink 2011)

Entwicklung der Nettolistenpreise bis 2030

- **Effizienztechnologien** (aerodynamisch und motorseitig) **erhöhen** die **Nettolistenpreise (NLP)**
- **Steigerung** der NLP zwischen den Jahren 2015 und 2030 **um etwa 26%** basierend auf Ifeu-Studie „Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen“ (Dünnebeil et al. 2015)



Quellen: Dünnebeil et al. (2015); lastauto omnibus Katalog 2015

Auslastung von Nutzlast und Nutzvolumen

- Transporte können sowohl die **Nutzlast-** als auch die **Nutzvolumenbegrenzung** erreichen
 - **Die Mehrzahl** der Fahrten ist vermutlich bei **Lkw ab 12t** zul. GGW. durch das **Nutzvolumen begrenzt**
- Wirkung von **verminderten Nutzvolumen** vermutlich **stärker**, dennoch sollten beide Effekte berücksichtigt werden



Bestimmung der Fahrleistungsintensität (Ableitung der Fahrleistung aus der GBL¹)

$$FLI = \frac{1}{\text{Transportkapazität}}$$

Tonnen pro Lkw Lademeter pro Lkw / m³ pro Lkw

¹ Güterbeförderungsleistung in tkm

MKS-HYBRID-OBERLEITUNGS-LKW

Dr. Sebastian Stütz
Maximilian Schellert, MSc.



Berlin, 01. März 2016

INHALT

- Übersicht Technologien
 - Systeme
 - Batterie
- Oberleitungstechnologie
 - Technische Details
 - Wirtschaftliche Details
- Stromschiene
 - Technische Details
 - Wirtschaftliche Details
- Induktionsspulen
 - Technische Details
 - Wirtschaftliche Details

Übersicht Technologien

E-Motor vs. Diesel-Traktion allgemein



	Elektro-Lkw ¹	Diesel-Lkw ²
Leistung	200-300 kW (270 – 407 PS)	300-350 kW (407-475 PS)
Wirkungsgrad	95 – 98 %	30 – 40 %
max. Drehmoment	700 – 800 Nm	ca. 2.100 Nm
Max. Geschwindigkeit	80 – 87 km/h	85 – 90 km/h
Übersetzung	Direktantrieb: kein Schalten, keine Kupplung	Automatisiertes Schaltgetriebe
Reichweite	Bis 200 km	Bis zu 1.900 km

Motivation des HO-Konzepts: Nutzung der Effizienz elektrischer Traktion bei hoher Reichweite

1) eforce: Der bessere Lastwagen 2) Verkehrsrundschau, 6/2016, S.35
Terberg Benschop KFZ-tech, Wirkungsgrad

Übersicht Technologien Systeme

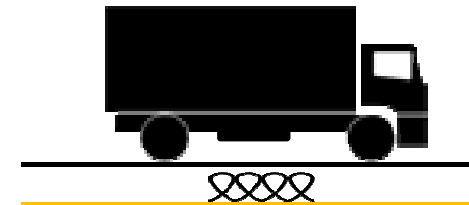
Oberleitungs-Lkw



Stromschienen-
Lkw



Induktiv
geladener-Lkw



Zwei denkbare Ausführungsvarianten

Elektromotor und
Traktionsbatterie 200 kWh

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

Quelle Fotos: Scania, Volvo, Siemens

Übersicht Technologien Traktionsbatterie

Annahmen für vollelektrisches Fahrzeug
(Elektromotor + Traktionsbatterie)

- Kapazität Traktionsbatterie: 200 kWh
- Reichweite: ca. 100 km¹ bei 85% DOD,
d.h. Fahrstromverbrauch 1,7 kWh/km
- Gewicht:
 - Batterie allein: 200 kWh = 2.000 kg²
 - Batteriepack komplett:
200 kWh = 2.500 kg
- Lebensdauer der Batterie in Ladezyklen³:
 - 2015: 3.000 Zyklen
 - 2030: 5.000 Zyklen
- Stärkere Batterieabnutzung bei häufiger Schnellladung verkürzt Lebensdauer



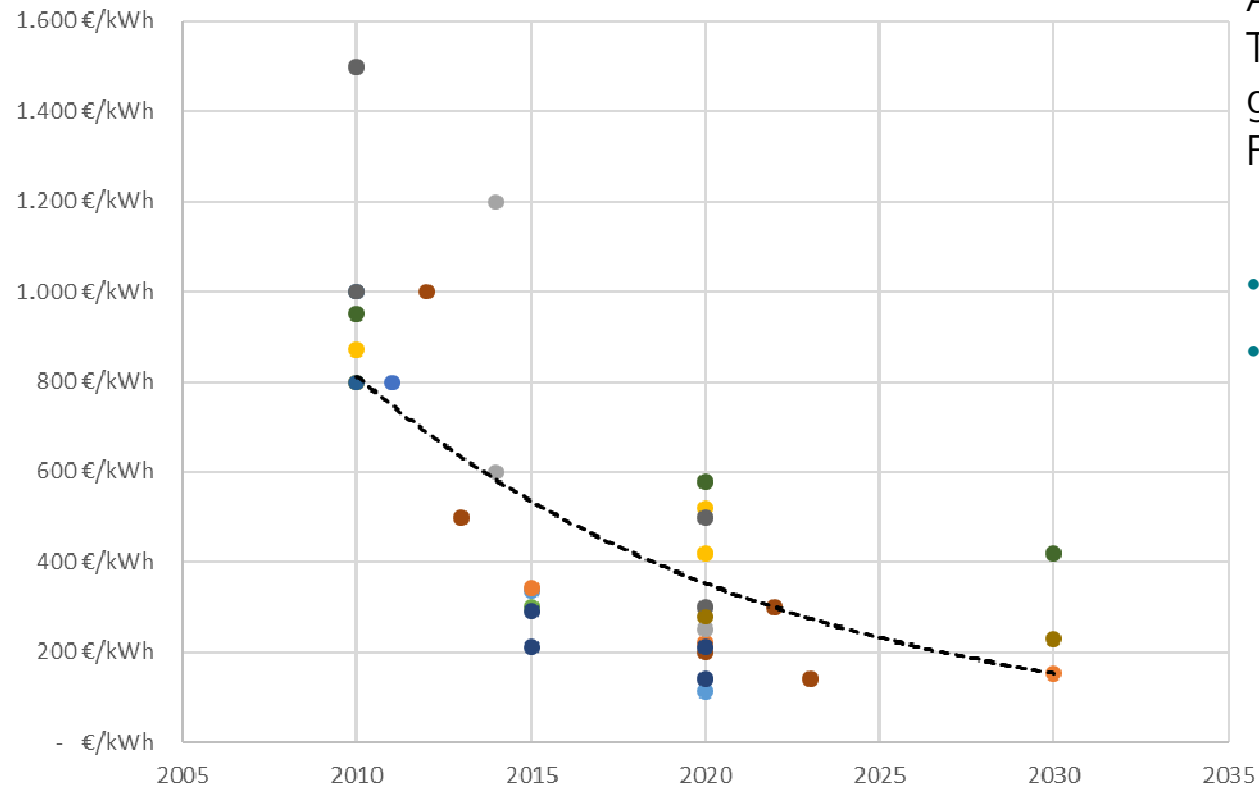
1) Umwelt-Bundesamt, S. 29 Bild: Fraunhofer IML

2) Umwelt-Bundesamt, S. 58

3) Fraunhofer ISI, S. 7f.

© Fraunhofer ISI

Preisentwicklung Traktionsbatterien



Anschaffungspreise
Traktionsbatterie (netto)
gemäß Meta-Studie
Fraunhofer IML:

- 2015: 530 €/kWh
- 2030: 178 €/kWh

Energieversorgung via Oberleitung

Technische Details

Oberleitungs-Lkw



- Komponenten
 - Permanentmagnet-Synchrongenerator und Motor (200 kW)
 - Im Hybrid-Fall zzgl. Dieselmotor (300 kW)
 - **Stromabnehmer (Pantograph)**
 - Ultrakondensatoren (Supercaps) für die Energiespeicherung
 - Leistungs- und Steuerungselektronik
 - Im Nicht-Hybrid-Fall: Traktionsbatterie
- Spannungsversorgung des Antriebs: 750-900 V¹
 - Zum Vergleich: E-Pkw: 400 V)²
- Fahrzeug allein erledigt An- und Abbügeln des Pantographen
- Nutzlastverlust durch zusätzliche Komponenten zu erwarten
- Nutzvolumenverlust⁴: abzgl. 50 cm Zusatzlänge → ca. 3m³

1) Öko-Institut e.V.2

4) Siemens AG

2) Öko-Institut e.V., S. 59

3) Umwelt Bundesamt, S. 68

© Fraunhofer ISI

Energieversorgung via Oberleitung

Wirtschaftliche Details

Oberleitungs-Lkw



- Anschaffungspreis Fahrzeug:
 - 2015: ca. 170.000 € bis 200.000 €¹ ,davon 40.000 €⁴ für den Pantographen
 - 2030: ca. 103.000 € bis 201.000 €³ ,davon 10.000 €⁴ für den Pantographen
- Realer Energieverbrauch
 - 2015: ca. 1,48⁴ - 2,21 kWh/km⁵ 2030: ca. 1,27 – 2,00 kWh/km⁵
 - Zum Vergleich: Trolleybus
 - Typischer Verbrauch Stadtverkehr: 1,4-1,9 kWh/km⁶
 - Ausnahmesituation: 2,0-2,6 kWh/km⁶
- Lebensdauer
 - Ausführung „Diesel-Hybrid“:
vergleichbar Diesel-LKW ~8 Jahre
 - Ausführung Elektromotor mit Traktionsbatterie:
vergleichbar Trolleybus: ~15-20 Jahre⁷ (nicht: Batterie!)
- Restwert:
 - unbekannt, keine Erfahrungswerte,
aktuell kein nennenswerter Sekundärmarkt für E-LKW
 - Modellrechnungen erfolgen ohne Restwert

1) Öko-Institut e.V., S. 61; Umwelt Bundesamt, S. 43; CE Delft, S. 77
2) IFEU, Fraunhofer IBP & IWES, S. 216; CE Delft, S. 77
3) CE Delft, S. 77; Umwelt Bundesamt, S. 43

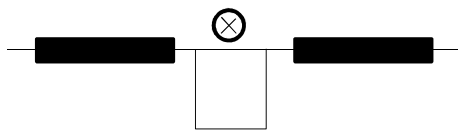
4) Siemens AG
5) CE Delft, S. 46
6) Sun et al.; Ioan et al.; Toth

7) Restrepo; Wolek
Foto: Jan van Buer, IPF Münster

Energieversorgung via Stromschienen

Varianten

1.) Flachschiensystem

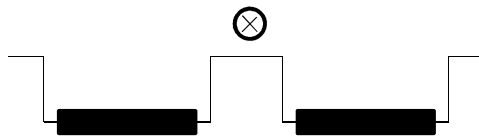


2 Flachschielen, montiert parallel zur Fahrtrichtung auf Höhe der Fahrbahn

Für Stromabnehmer leicht zugänglich

Problem: Sicherheit für Personen bei Unfällen oder Staus

2.) Abgesenktes Flachschiensystem



2 Flachschielen, montiert parallel zur Fahrtrichtung. Aus Sicherheitsgründen in der Fahrbahndecke versenkt

Problem: Störanfällig → Kontinuierliche Reinigung erforderlich

Schnee und Eis wirken isolierend: Gefahr von Lichtbögen

Problem: Verkehrsgefahr für Motorradfahrer

3.) Einschiensystem



Ähnlich Flachschielenansatz, jedoch segmentiert, montiert parallel zur Fahrtrichtung auf Höhe der Fahrbahn. Sobald Fahrzeug ein Segment überfährt, wird dies unter Strom gesetzt

Vorteil: Geringere Gefahr des Spannungsverlustes bei Nässe

Nachteil: Systemkomplexität! Jedes Segment ist einzeln anzusteuern, und zwar in Millisekunden, d.h. intensive Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation nötig

Quelle: Olsson, Pettersson, Sebestyen

Energieversorgung via Stromschienen

Technische Details

Stromschienen- Lkw



- Komponenten
 - Permanentmagnet-Synchrongenerator und Motor (200 kW)
 - Im Hybrid-Fall zzgl. Dieselmotor (300 kW)
 - **Schleifer (Stromabnehmer)**
 - Ultrakondensatoren (Supercaps) für die Energiespeicherung
 - Leistungs- und Steuerungselektronik
 - **Kommunikationstechnik**
- Spannungsversorgung des Antriebs: 750-900 V
- Besonderheiten
 - Fahrzeug erledigt Ein- und Ausfädeln des Schleifers
 - Effizienz- und Sicherheitsanforderungen: präzises Zu- und Abschalten der Stromschiene (unter Fahrzeug)
 - Millisekunden genaue Synchronisation von Fahrzeug und stromführender Infrastruktur

Energieversorgung via Stromschienen

Wirtschaftliche Details



- Anschaffungspreis Fahrzeug:
 - Konventionelles Fahrzeug zzgl. ca. 100.000 € für Retrofitting¹
 - Preis je Schleifer ca. 750 € - 1.000 € (mehrere Schleifer pro Fahrzeug notwendig)²
- Lebensdauer
 - Erfahrungswerte fehlen
- Restwert:
 - unbekannt, System pilotiert, nicht weiter vermarktet
 - Modellrechnungen erfolgen ohne Restwert

Quelle Foto: Luca F./Wikipedia

1) Systra, S. 33

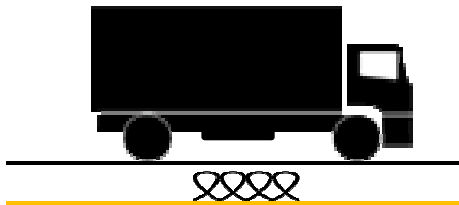
2) Olsson, Pettersson, Sebesyen

© Fraunhofer IML
Seite 85

Energieversorgung via Induktionsspulen

Technische Details

Induktiv
geladener-Lkw



- Komponenten
 - Permanentmagnet-Synchrongenerator und Motor (200 kW)
 - Im Hybrid-Fall zzgl. Dieselmotor (300 kW)
 - **Energieempfänger-System (Pick-Up)**
 - Ultrakondensatoren (Supercaps) für die Energiespeicherung
 - Leistungs- und Steuerungselektronik
 - Im Nicht-Hybrid-Fall: Traktionsbatterie
 - **Kommunikationstechnik**
- Übertragungsleistung:
 - Übertragungsverluste gegenüber konduktiver Übertragung
 - Praxisnahes Umfeld: 60 kW bei 30 kHz¹
 - Laborbedingungen: 200 kW bei bis zu 35 kHz²

1) Wolfgang Kempkens 2) INTIS, S. 1

Energieversorgung via Induktionsspulen

Wirtschaftliche Details

Induktiv
geladener-Lkw



Fahrzeugpreis ¹	2015	2030
■ Elektromotor:	ca. 6.500 €	ca. 5.200 €
■ Energieempfänger-System:	ca. 9.200 €	ca. 7.800 €
■ Steuereinheit:	ca. 9.100 €	ca. 6.000 €
■ Zzgl. Batterie	kapazitätsabhängig	
■ z.B. 200 kWh Batterie ²	ca. 206.000 €	ca. 36.000 €
■ Realer Energieverbrauch LKW		
■ ca. 2,21 kWh/km ¹ (Batteriebetrieb)		
■ Übertragungsverluste		
■ ca. 15-30 % bei 17 cm Nennluftspalt ³		
■ Vergleich: Induktionsbus (KAIST): >17% bei 20 cm Nennluftspalt		
■ Lebensdauer wie Diesel (i.d.R. 8 Jahre)		
■ Restwerte: unbekannt, Modellrechnungen ohne Restwert		

1) CE Delft, S. 76

2) Berechnung Fraunhofer IML

3) Jin Huh Chun-Taek Rim, S. 2

© Fraunhofer ISI

Übersicht Hybrid-Diesel-LKW vs. Diesel-LKW

	Oberleitung		Stromschiene		Induktionsspulen		Diesel	
	2015	2030	2015	2030	2015	2030	2015	2030
Anschaffungspreis Fahrzeug	ca. 170.000 € bis 200.000 €	ca. 103.000 € bis 201.000 €	ca. 202.000 €		ca. 210.000 €	ca. 150.000 €	ca. 102.000 €	ca. 129.000 €
Annahme	185.000 €	152.000 €	202.000 €	166.000 €	210.000 €	150.000 €	102.000 €	129.000 €
Realer Energieverbrauch (inkl. Übertragungsverlust)	ca. 1,48 kWh bis 2,21 kWh	ca. 1,27 kWh bis 2,00 kWh	(Wie bei Oberleitung)	(Wie bei Oberleitung)	(Wie bei Oberleitung, 70% Effizienz)	(Wie bei Oberleitung, 85% Effizienz)	ca. 3,11 kWh	ca. 2,46 kWh
Annahme	1,8 kWh/km	1,6 kWh/km	1,8 kWh/km	1,6 kWh/km	2,5 kWh/km	1,9 kWh/km	3,11 kWh/km	2,46 kWh/km
Wartungskosten	0,14 €/km	0,14 €/km	0,14 €/km	0,14 €/km	0,14 €/km	0,14 €/km	0,14 €/km	0,14 €/km

Übersicht

Voll-Elektrischer-LKW vs. Diesel-LKW

	Oberleitung		Stromschiene		Induktionsspulen		Diesel	
	2015	2030	2015	2030	2015	2030	2015	2030
Anschaffungspreis Fahrzeug (zzgl. 200 kWh Traktionsbatterie)	ca. 276.000 € bis 306.000 €	ca. 136.000 € bis 237.000 €	ca. 308.000 €		ca. 316.000 €	ca. 186.000 €	ca. 102.000 €	ca. 129.000 €
Annahme	291.000 €	187.600 €	308.000 €	200.600 €	316.000 €	186.000 €	102.000 €	129.000 €
Realer Energieverbrauch (inkl. Übertragungsverlust)	ca. 1,48 kWh bis 2,21 kWh	ca. 1,27 kWh bis 2,00 kWh	(Wie bei Oberleitung)	(Wie bei Oberleitung)	(Wie bei Oberleitung, 70% Effizienz)	(Wie bei Oberleitung, 85% Effizienz)	ca. 3,11 kWh	ca. 2,46 kWh
Annahme	1,8 kWh/km	1,6 kWh/km	1,8 kWh/km	1,6 kWh/km	2,5 kWh/km	1,9 kWh/km	3,11 kWh/km	2,46 kWh/km
Ersetzung der Traktionsbatterie nach	300.000 km (4 Jahre)	500.000 km (6 Jahre, 8 Monate)	300.000 km (4 Jahre)	500.000 km (6 Jahre, 8 Monate)	300.000 km (4 Jahre)	500.000 km (6 Jahre, 8 Monate)	./.	./.
Wartungskosten	0,35 €/km	0,07 €/km	0,35 €/km	0,07 €/km	0,35 €/km	0,07 €/km	0,14 €/km	0,14 €/km

Quellen

- CE Delft: An overview of state-of-the-art technologies and their potential. Delft, 2013
- Eforce: Der bessere Lastwagen
- Fraunhofer ISI: Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe 2015
- H. Huppertz: Wirkungsgrad, <http://www.kfz-tech.de/Formelsammlung/Wirkungsgrad.htm>, letzter Zugriff: 29.02.2016
- IFEU, Fraunhofer IBP & IWES: INTERAKTION EE-STROM, WÄRME UND VERKEHR. Kassel, Heidelberg, Würzburg 2015
- INTIS: Erprobungsmöglichkeiten für induktive Energieübertragungssysteme der Elektromobilität. 2014
- Ioan et al.: Assessment of Energy Efficiency for urban electric transport systems. 2010
- Jin Huh Chun-Taek Rim: Trends of Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles. 2014
- Öko-Institut e.V.: Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050, 2014
- Öko-Institut e.V. 2: Working Paper Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. 2014
- Olsson, Pettersson, Sebestyen: Poly Segment Monorail, a conductive method as an alternative for highway electrification. 2012
- Restrepo: Strategy to electrify public transportation systems in Colombia. 2010
- Siemens AG
- Sun et al.: Analysis of Energy Consumption Characteristics of Dual-source Trolleybus. 2014
- Systra: Feasibility of Alternative Power Supply Systems for the LUAS BXD. 2012
- Terberg Benschop. YT202-EV,4x2, technische Spezifikationen
- Toth: Trolley sustainable mobility. 2012
- Umwelt-Bundesamt: Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050.
- Martin Schmied, Philipp Wüthrich INFRAS AG – Forschung und Beratung, Bern, Schweiz; Rainer Zah, Hans-Jörg Althaus Quantis, Zürich, Schweiz; Christa Friedl, Wissenschaftsjournalistin, 2014
- Vekehrsrundschau: Der „Alte“ will es nochmal wissen“, 6/2016, S.35
- Wołek, Wyszomirski: The Trolleybus as an Urban Means of Transport in the Light of the Trolley Project. 2013
- Wolfgang Kempkens: Briten testen induktive Ladetechnik für Autobahnen. 2015
-

BACKUP

Offene Fragen aus Nutzersicht

Robustheit, Sicherheit und Verlässlichkeit

- Störanfälligkeit der Stromabnehmer im laufenden Betrieb, etwa durch Witterungseinflüsse (z.B. Eis), Tiere (z.B. Vogelschlag) oder Fremdkörper (Bodenabstand bei Induktion: 0,2-0,3m)
- Sicherstellung der Mobilität bei Netzausfällen/Unfällen
- Haftung bei Netzausfällen und resultierenden Verspätungen
- Haftung bei Überspannungsschäden
- Größe der Knautschzone durch Pantograph reduziert?
- Einschränkung bei Gefahrguttransporten?

Organisatorische Aspekte

- Zusätzliche Schulungen (Arbeitsschutz) für Fahrer nötig?
- Zusätzliche Kommunikation zwischen Infrastruktur, Fahrzeug und Fahrzeugeinsatzplanung?

Offene Fragen aus Nutzersicht

Wirtschaftliche Aspekte

- Garantien zur Bereitstellung des Netzes/Einsatzgarantie für HO-LKW auf bestimmten Strecken?
- Wiederveräußerung nur an andere HO-Nutzer, sonst Umbau- oder Abwrackkosten
- Aktuelle Sub-Unternehmerstrukturen mit HO-Nutzung machbar?

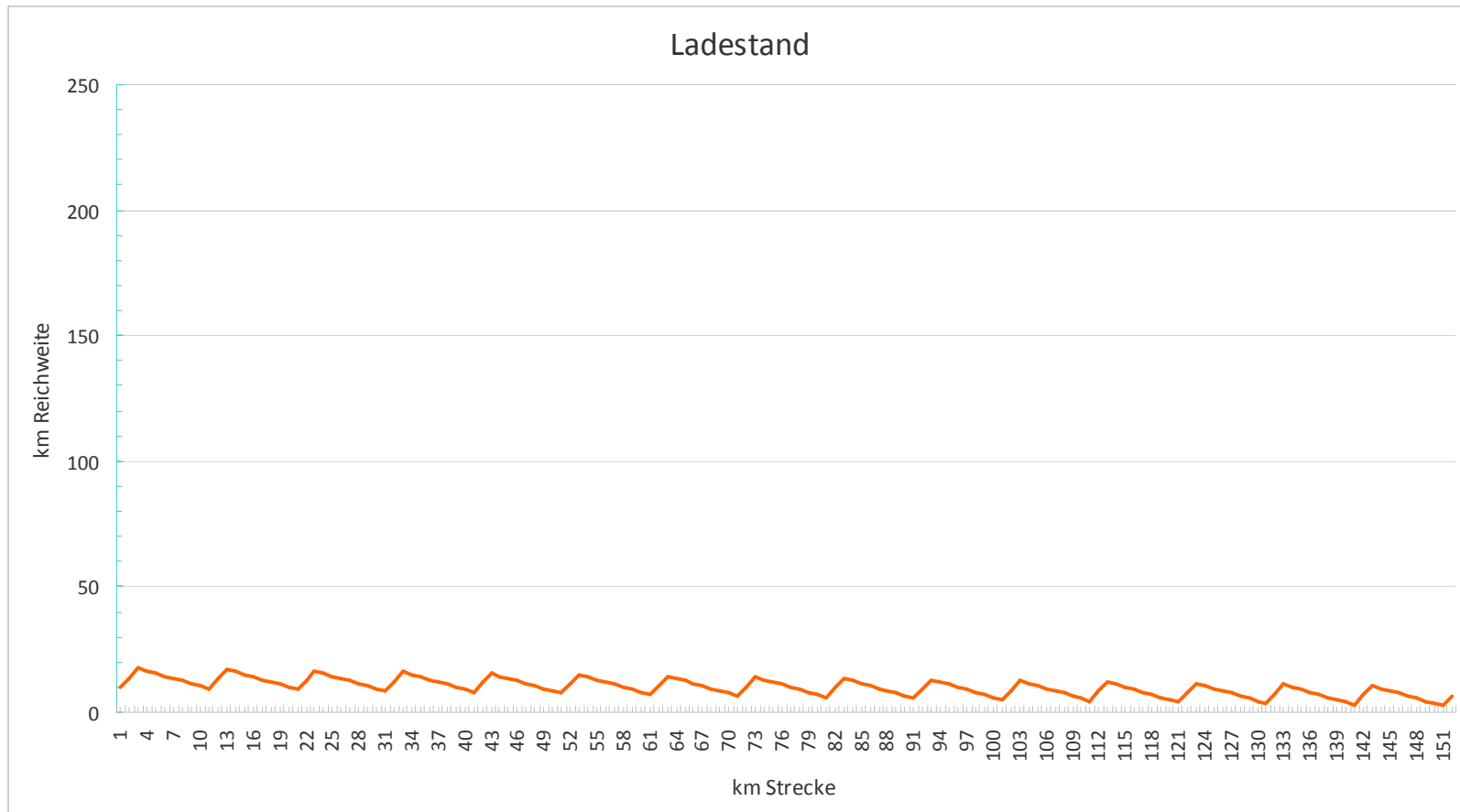
Anschaffungsrisiken HO-LKW

- Geringere Modellvielfalt bei HO-LKW?
- Alternativverwendung von HO-LKW kaum möglich, d.h. Zweckbindung des Fahrzeugs an Netz
- Hohes Risiko = mögliche Diskriminierung mittelständischer Speditionen?

Teil 3:
Verlauf von Ladezuständen bei
unterschiedlichen Randbedingungen

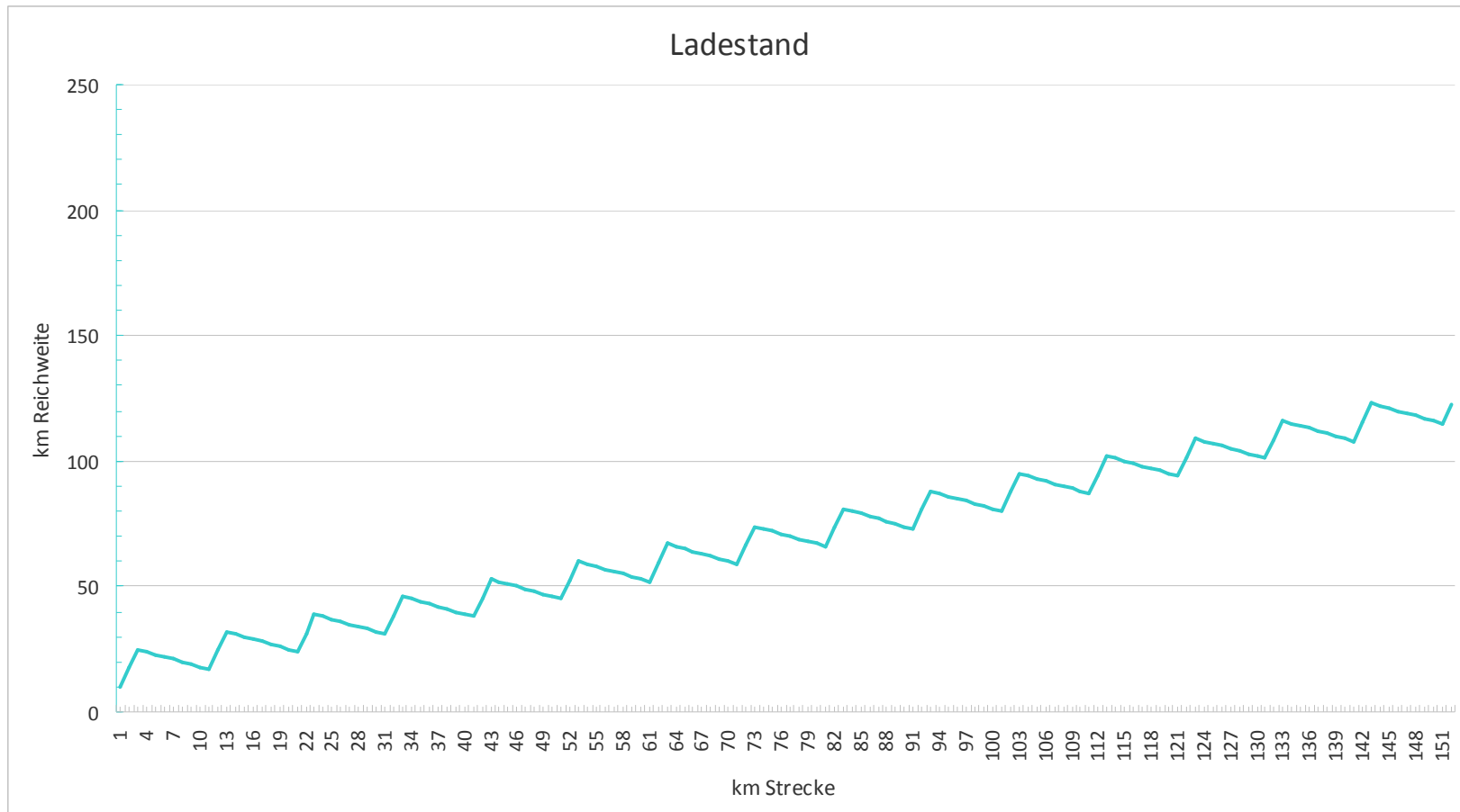
MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit Akku für 100km, 20% Netzabdeckung mit Oberleitung, flache Fahrbahn, keine Leistungsbegrenzung beim Strombezug



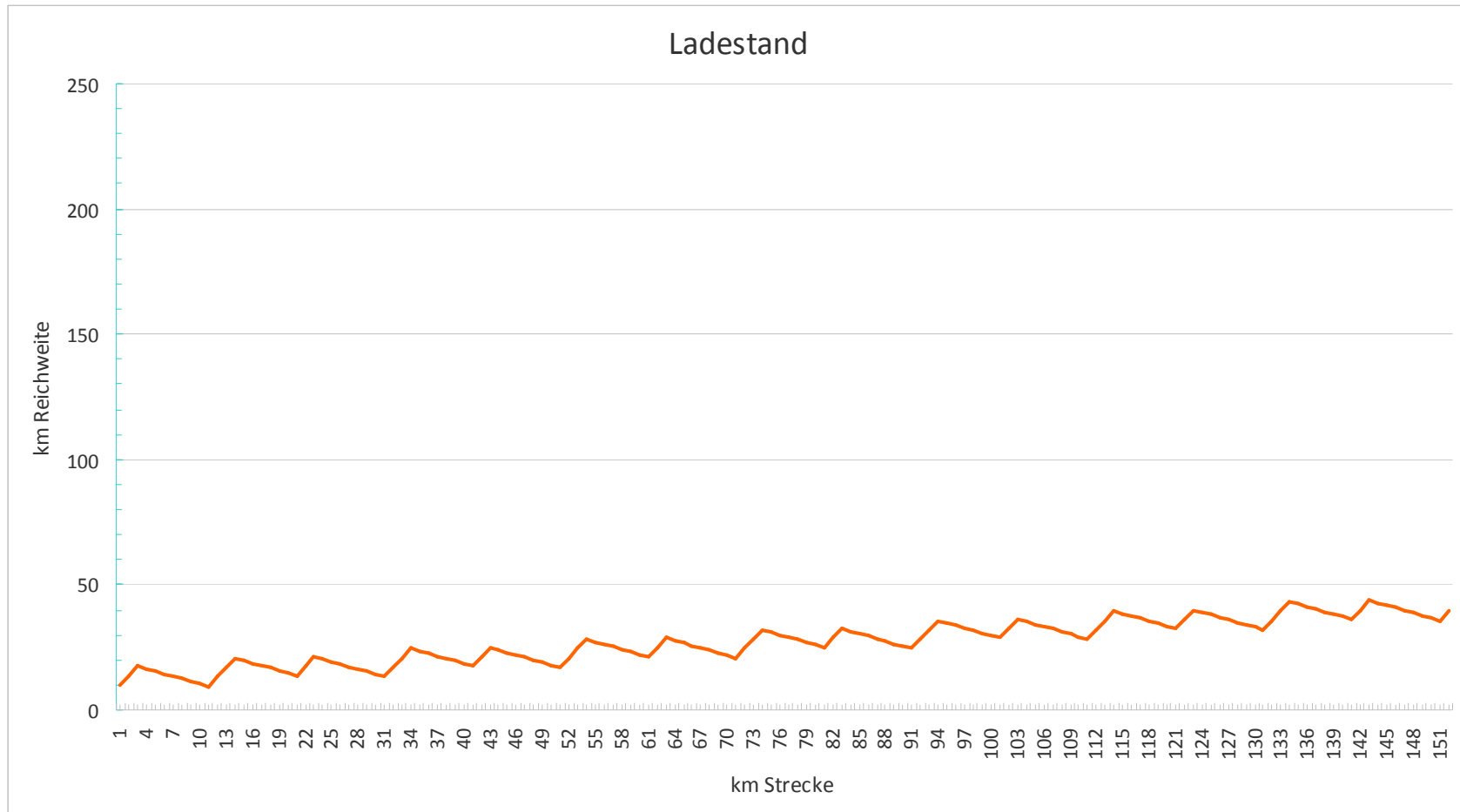
MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit 200km Reichweite, 20% Netzabdeckung, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung



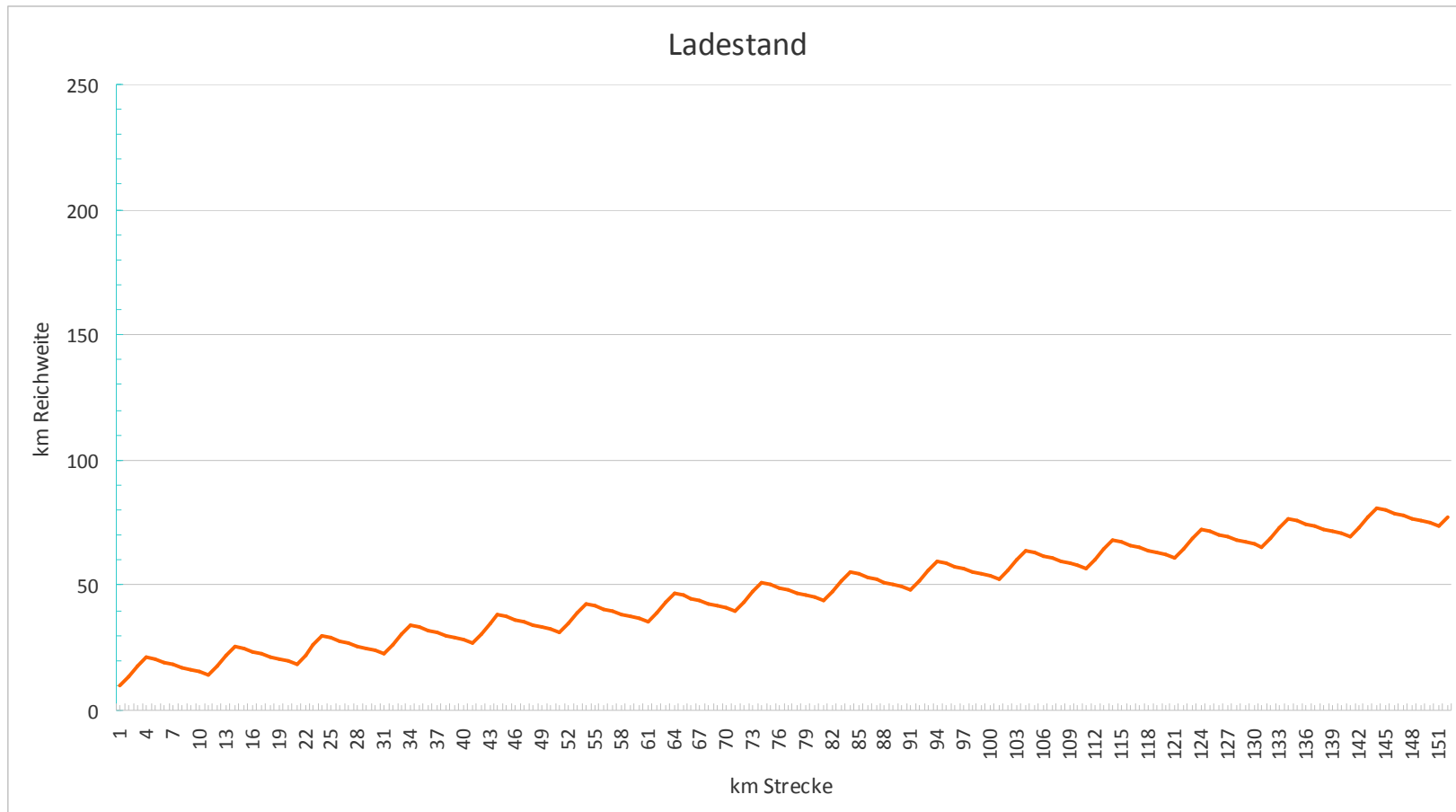
MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit 100km Reichweite, 25% Netzabdeckung, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung



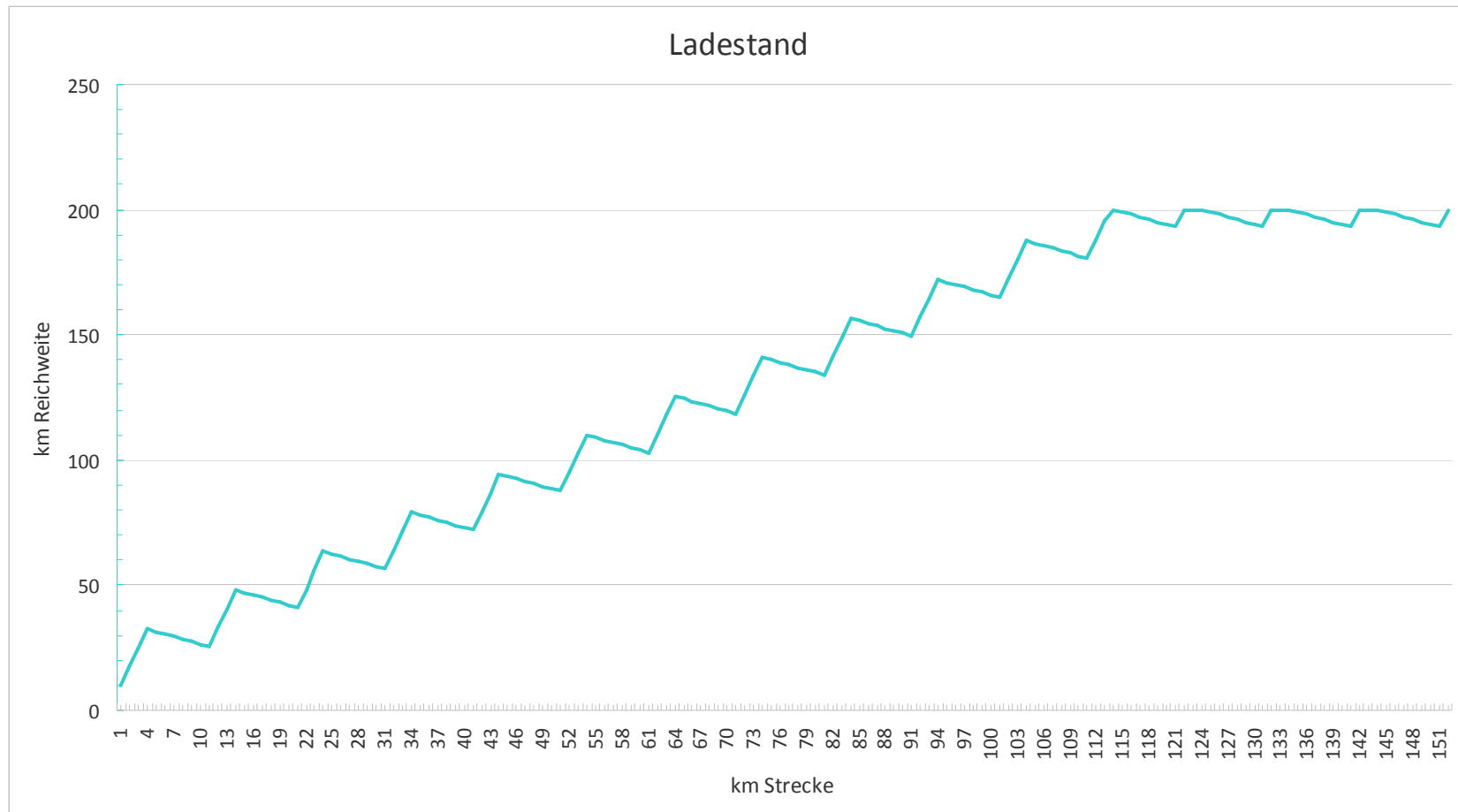
MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit 100km Reichweite, 30% Netzabdeckung, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung



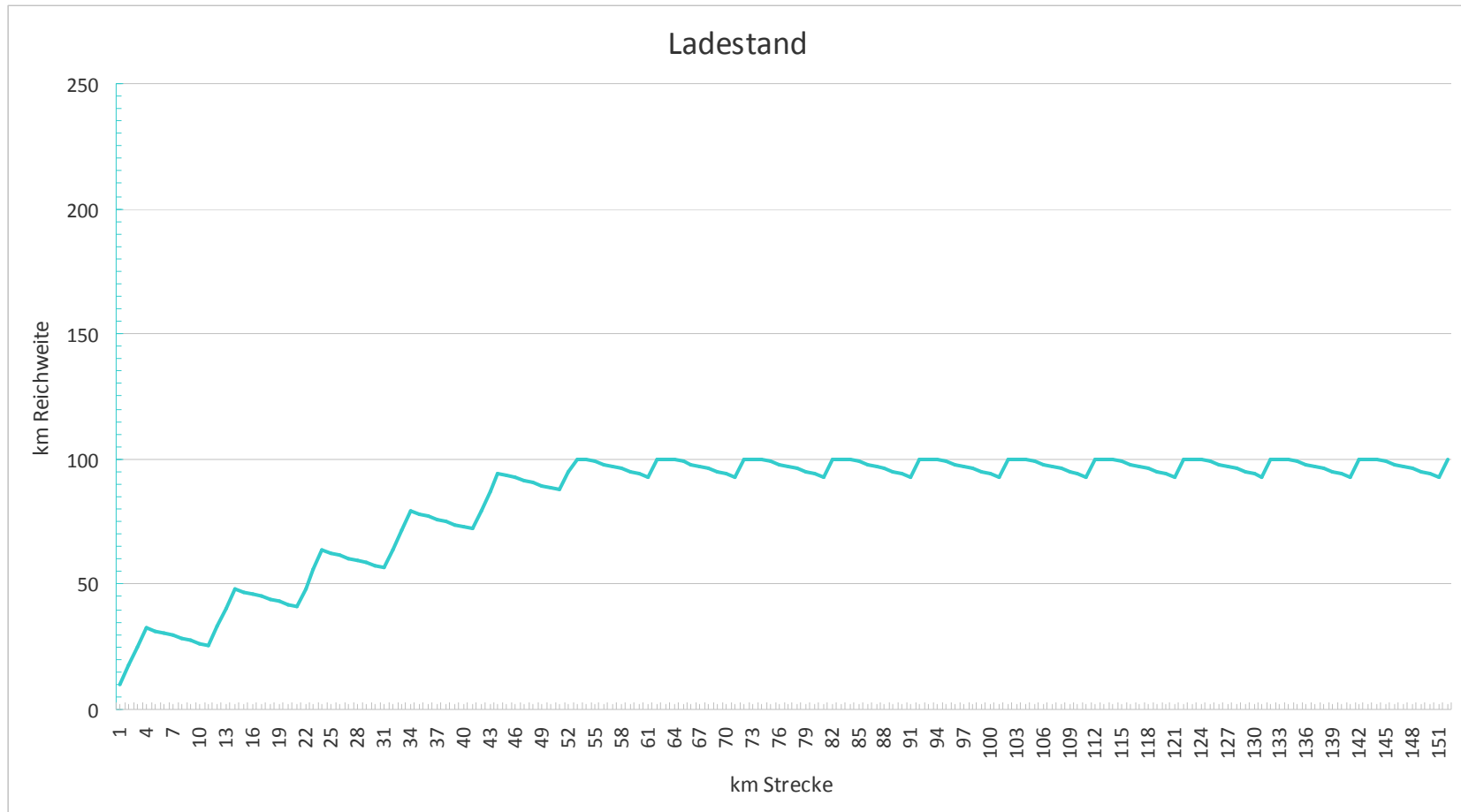
MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit 200km Reichweite, 30% Netzabdeckung, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung



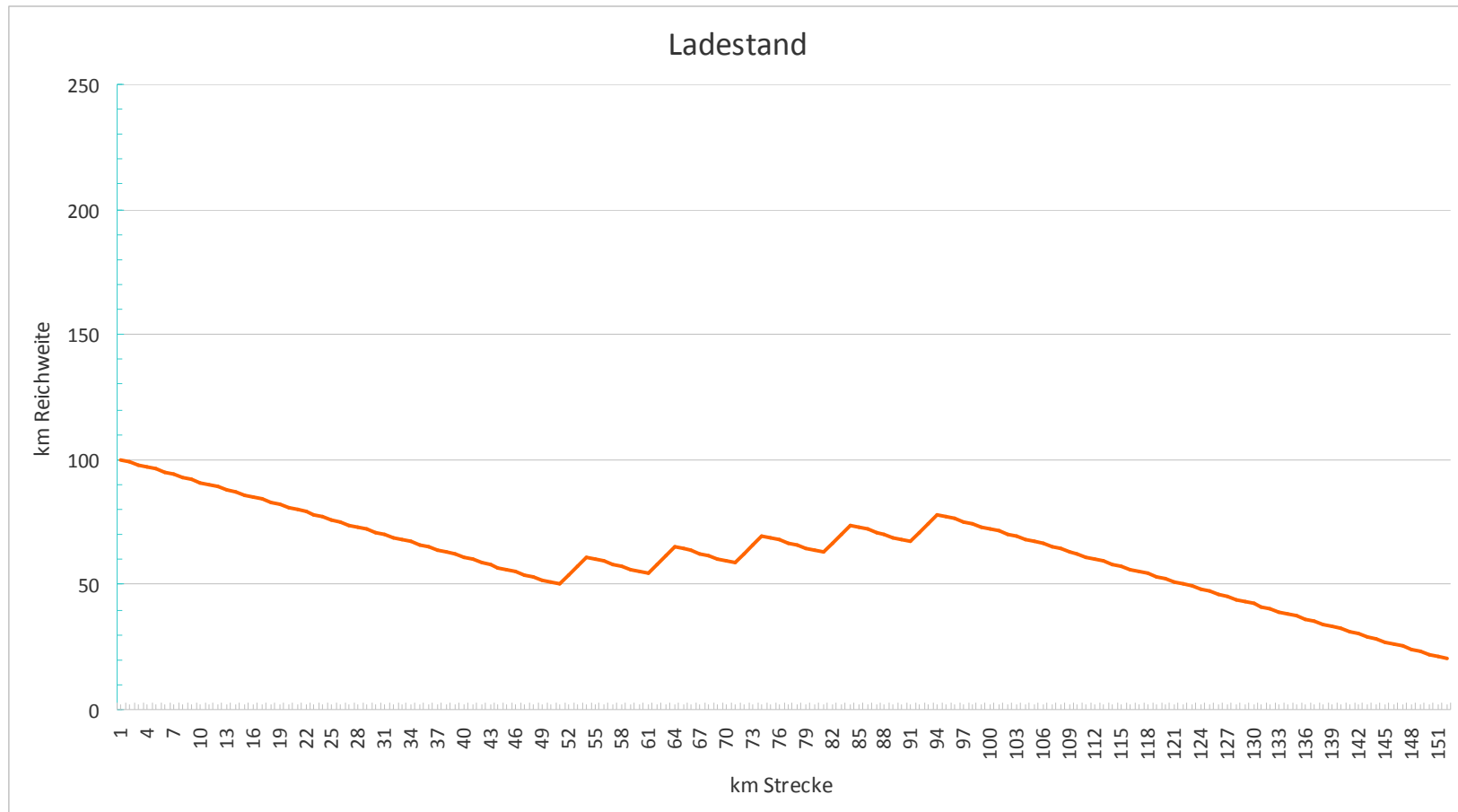
MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit 100km Reichweite, 6C Ladestrom, 30% Netzabdeckung, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung



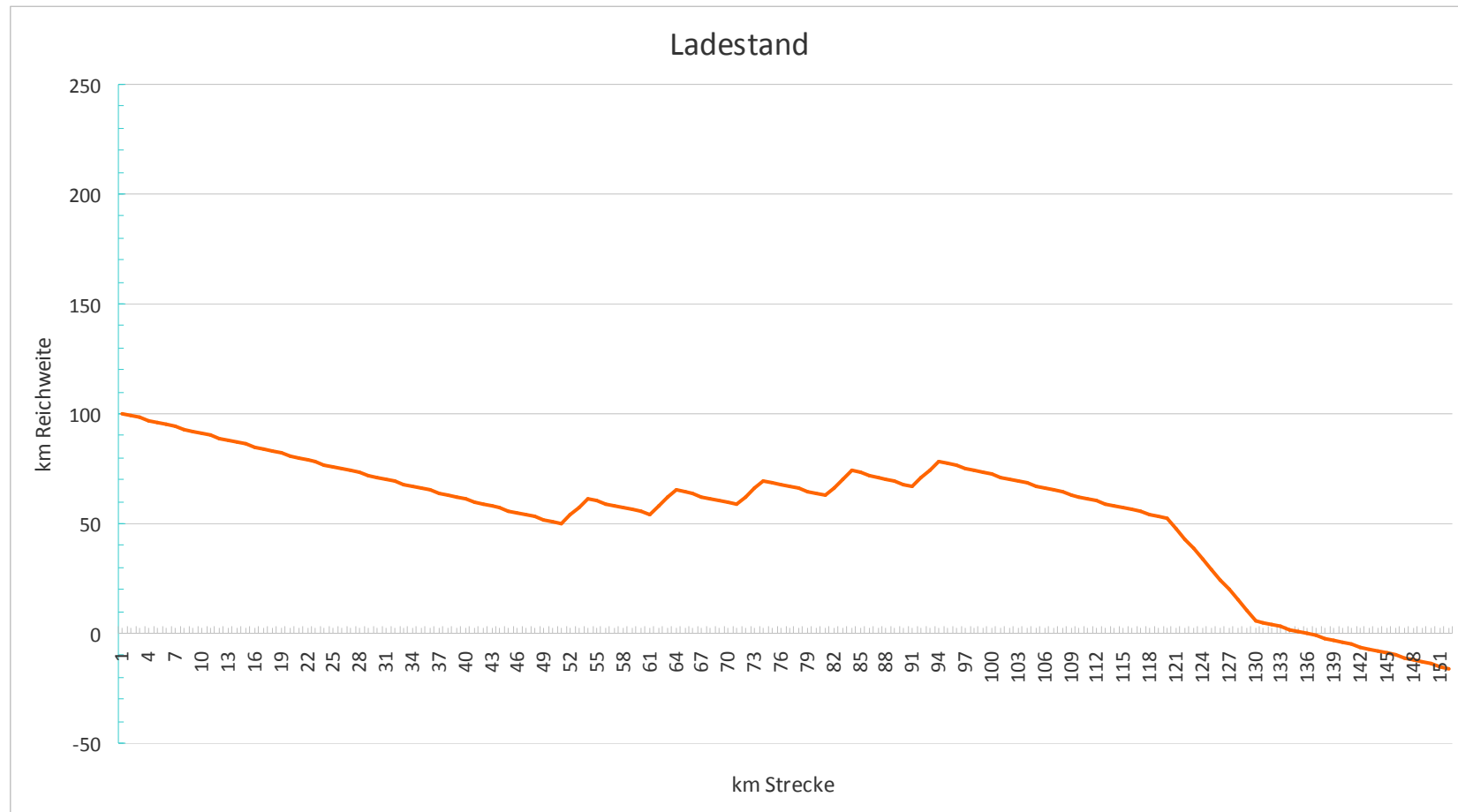
MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit 100km Reichweite, 3C Ladestrom, 30% Netzabdeckung, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung, Zyklus: 50km Sekundärnetz, 50km Autobahn, 50km Sekundärnetz



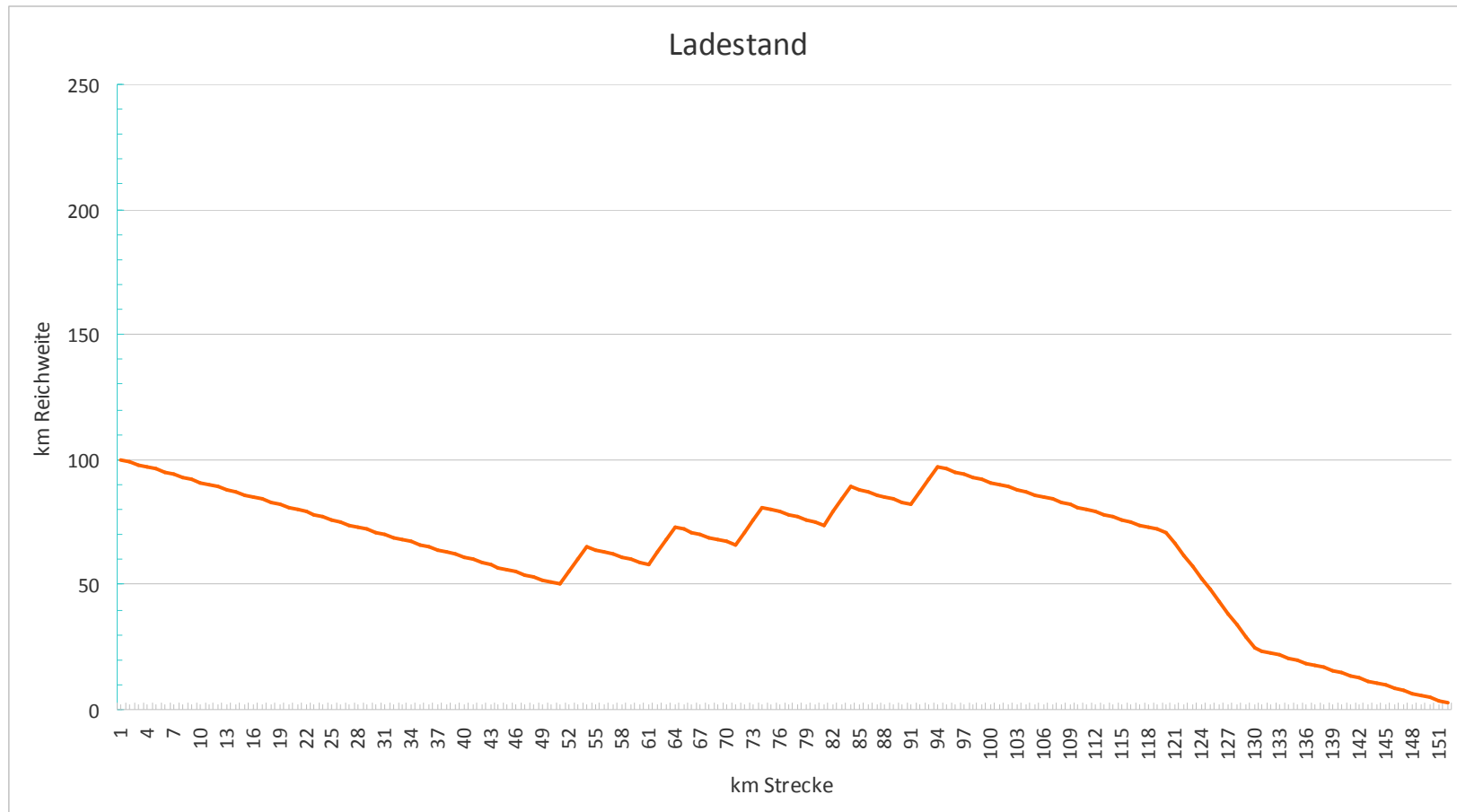
MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit 100km Reichweite, 3C Ladestrom, 30% Netzabdeckung, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung, Zyklus: 50km Sekundärnetz, 50km Autobahn, 50km Sekundärnetz, 500m Steigung



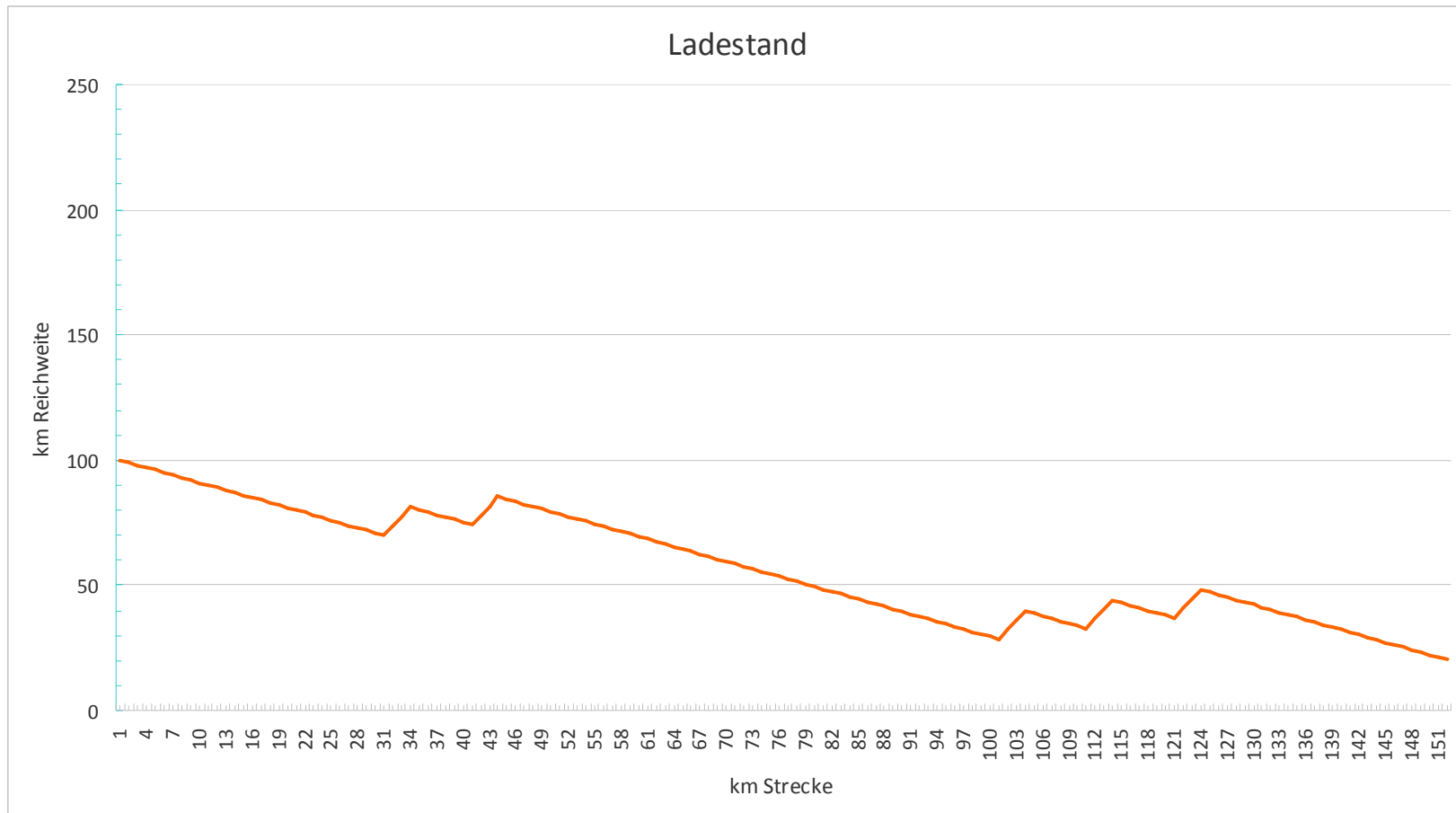
MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit 100km Reichweite, 3C Ladestrom, 30% Netzabdeckung, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung, Zyklus: 50km Sekundärnetz, 50km Autobahn, 50km Sekundärnetz, 500m Steigung, 60km/h / Ladepause, 12,5 min auf Parkplatz



MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit 100km Reichweite, 3C Ladestrom, 30% Netzabdeckung, keine Begrenzung der aufgenommenen Leistung, Zyklus: 25km Sekundärnetz, 25km Autobahn, 2x25km Sekundärnetz, 25km Autobahn, 25km Sekundärnetz



MKS-HO-LKW, Ladezustände

LKW mit 100km Reichweite, 3C Ladestrom, 30% Netzabdeckung, Begrenzung der aufgenommenen Leistung auf 200kW auf 30km (Ballungsraum)

