

# StratON

## Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge

Endbericht

Berlin, Februar 2020

### Autorinnen und Autoren

Florian Hacker (Projektleitung), Ruth Blanck, Wolf Görz  
Öko-Institut e.V.

Prof. Tobias Bernecker, Jonas Speiser  
Hochschule Heilbronn

Felix Röckle  
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)

Dr. Markus Schubert, Gregor Nebauer  
Intraplan Consult GmbH

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>1. Zusammenfassung</b>	<b>15</b>
<b>2. Executive Summary</b>	<b>29</b>
<b>3. Einleitung</b>	<b>43</b>
<b>4. Gütertransportmarkt – Stand und Perspektiven</b>	<b>46</b>
<b>4.1. Einleitung</b>	<b>46</b>
<b>4.2. Kennzahlen und Eckwerte zum Straßengüterverkehr in Deutschland</b>	<b>46</b>
<b>4.3. Das verkehrslogistische Märkte-Modell</b>	<b>49</b>
4.3.1. Der Gütermarkt	51
4.3.2. Der Speditionsmarkt	51
4.3.3. Der Verkehrsmarkt	52
4.3.4. Der Infrastrukturmarkt	53
<b>4.4. Treiber der Entwicklung auf dem Transportmarkt</b>	<b>54</b>
4.4.1. Güterstruktureffekt	55
4.4.2. Logistikeffekt	55
4.4.3. Deregulierungseffekt	55
4.4.4. Integrationseffekt	56
4.4.5. Digitalisierungseffekt	56
4.4.6. Nachhaltigkeitseffekt	57
<b>4.5. Rechtliche Grundlagen und Regulierung des Straßengüterverkehrs</b>	<b>57</b>
4.5.1. Marktliberalisierung	57
4.5.2. Frachtführer und Spediteur	59
4.5.3. Gewerblicher Verkehr und Werkverkehr	60
4.5.4. Nutzfahrzeugklassen, Bestand und Fahrleistungen	61
4.5.5. Der Lkw im Kombinierten Verkehr Straße/Schiene/Schiff	64
<b>4.6. Die Transportdurchführung im Güterkraftverkehr</b>	<b>66</b>
4.6.1. Ladungsverkehre	66
4.6.2. Stückgutverkehre	66
4.6.3. Tramp-, Linien- und Systemverkehre	67
<b>4.7. Unternehmensstrukturen</b>	<b>70</b>

<b>4.8.</b>	<b>Innovationen auf dem Transportmarkt</b>	<b>73</b>
4.8.1.	Industrialisierung von Verkehren	74
4.8.2.	Automatisierung und autonomes Fahren	75
4.8.3.	Fahrzeugmaße und Gewichte	76
4.8.4.	Aerodynamik	77
4.8.5.	Leichtbau	78
<b>5.</b>	<b>O-Lkw im Kontext alternativer Technologieoptionen</b>	<b>78</b>
<b>5.1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>78</b>
<b>5.2.</b>	<b>Übersicht über die Antriebskonzepte</b>	<b>79</b>
5.2.1.	Diesel-Lkw	79
5.2.2.	LNG-Lkw	79
5.2.3.	Brennstoffzellen-Lkw	80
5.2.4.	Elektrischer Antrieb mit direkter Stromnutzung	80
<b>5.3.</b>	<b>Treibhausgasminderungspotenzial und Kosten der Technologieoptionen im Vergleich</b>	<b>84</b>
5.3.1.	Treibhausgasminderungspotenzial	84
5.3.2.	Kostenbetrachtung aus Nutzerperspektive	85
5.3.3.	Kostenbetrachtung aus volkswirtschaftlicher Perspektive	87
<b>5.4.</b>	<b>Ausgestaltung der Oberleitungsinfrastruktur</b>	<b>87</b>
<b>5.5.</b>	<b>Mögliche Synergien von O-Lkw und -Infrastruktur mit anderen elektrischen Antriebskonzepten</b>	<b>88</b>
<b>5.6.</b>	<b>Fazit</b>	<b>89</b>
<b>6.</b>	<b>Verkehrliche Analysen zur möglichen Netzbildung der Oberleitungsinfrastruktur</b>	<b>90</b>
<b>6.1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>90</b>
<b>6.2.</b>	<b>Identifikation von Pilotstrecken anhand verkehrlicher Kriterien</b>	<b>90</b>
6.2.1.	Vorgehensweise	90
6.2.2.	Erschließung und Hochrechnung der quantitativen Grundlagen	90
6.2.3.	Kriterien für die Vorauswahl der Strecken	95
6.2.4.	Streckenspezifische Datenanalysen	99
6.2.5.	Ergebnisse – Beispielstrecke A61	100
<b>6.2.6.</b>	<b>Ergebnisse alle Strecken</b>	<b>103</b>
<b>6.3.</b>	<b>Übertragung auf den Gesamtverkehr (Netzbetrachtung)</b>	<b>109</b>
6.3.1.	Bildung Kernnetz	109
6.3.2.	Ergebnisse mögliches Kernnetz	112
6.3.3.	Netzentwicklungsstrategien – Achse versus Teilnetz	114

6.3.4.	Ergebnisse der achsenorientierten Netzentwicklung	118
6.3.5.	Ergebnisse der teilnetzorientierten Netzentwicklung	119
6.3.6.	Vergleich der Ergebnisse der achsenorientierten und der teilnetzorientierten Netzentwicklung	121
<b>6.4.</b>	<b>Fazit</b>	<b>122</b>
<b>7.</b>	<b>Geschäftsmodelle für Infrastruktur und Fahrzeuge</b>	<b>122</b>
<b>7.1.</b>	<b>Betrachtungsperspektiven und Beurteilungskriterien</b>	<b>122</b>
<b>7.2.</b>	<b>Geschäftsmodelle für die Fahrzeugbereitstellung</b>	<b>124</b>
7.2.1.	Varianten der Fahrzeugbereitstellung	124
7.2.2.	Fahrzeugbereitstellungs-Optionen für den Oberleitungs-Lkw	125
<b>7.3.</b>	<b>Geschäftsmodelle für die Infrastrukturbereitstellung</b>	<b>128</b>
7.3.1.	Kosten für Oberleitungsbau im Vergleich	128
7.3.2.	Refinanzierung der Infrastruktur	128
7.3.3.	Beschaffungs- und Organisationsmodelle	130
7.3.4.	Vergütungs- und Finanzierungsmodelle	132
<b>7.4.</b>	<b>Abrechnungsmodelle für die Infrastruktur</b>	<b>134</b>
7.4.1.	Heutiges System der Maut- und Kraftstoffabrechnung	134
7.4.2.	Denkbare Varianten im Oberleitungs-Modell	135
7.4.3.	Bemessungsgrundlagen	137
7.4.4.	Technisch-organisatorische Herausforderungen	137
<b>7.5.</b>	<b>Fazit</b>	<b>138</b>
<b>8.</b>	<b>Markthochlaufszzenarien</b>	<b>140</b>
<b>8.1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>140</b>
<b>8.2.</b>	<b>Methodik</b>	<b>140</b>
8.2.1.	Überblick über das Vorgehen	140
8.2.2.	Definition von Nutzerprofilen	143
8.2.3.	Ermittlung von Fahrzeugbestand, Endenergiebedarf und THG-Emissionen	152
8.2.4.	Einordnung der für die Modellierung getroffenen Prämissen und Annahmen	154
<b>8.3.</b>	<b>Szenarien und Sensitivitäten zum Markthochlauf von O-Lkw</b>	<b>155</b>
8.3.1.	Ziel und Vorgehensweise	155
8.3.2.	Ausgangsszenario mit Aufbau eines Oberleitungsnetzes (M0)	156
8.3.3.	Einfluss der Amortisationszeiten auf den Markthochlauf	165
8.3.4.	Szenarien zur Lkw-Maut und der Wirkung von CO <sub>2</sub> -Preisen	168
8.3.5.	Variation der Attraktivität von O-BEV	180
8.3.6.	Variation von Dieselpreis und Strompreis	188

8.3.7.	Variation des Netzausbaus	193
8.3.8.	Wechselwirkung mit den EU-Lkw-Standards	196
<b>8.4.</b>	<b>Strombedarf und THG-Minderungsbeitrag in den Szenarien</b>	<b>202</b>
8.4.1.	Einleitung und Übersicht über die Szenarien	202
8.4.2.	Zur Einordnung der Ergebnisse und Zusatzpotenziale durch Fahrten mit kurzem Hauptlauf	203
8.4.3.	Elektrische Fahrleistungen der O-Lkw	205
8.4.4.	Strombedarf	208
8.4.5.	THG-Minderungsbeitrag	209
8.4.6.	Einordnung des THG-Minderungsbeitrags zu anderen Studien	215
<b>8.5.</b>	<b>Ausgewählte ökonomische Effekte</b>	<b>216</b>
8.5.1.	Abschätzung der Wirkung auf die Maut- und Energiesteuereinnahmen	216
8.5.2.	Volkswirtschaftliche Kosten von Oberleitungs-Lkw im Vergleich zur Dekarbonisierung mittels strombasierter Kraftstoffe	218
<b>9.</b>	<b>Wechselwirkung von O-Lkw mit dem Stromsektor</b>	<b>220</b>
<b>9.1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>220</b>
<b>9.2.</b>	<b>Modellierung der zusätzlichen Stromnachfrage</b>	<b>220</b>
9.2.1.	Methodik: Das PowerFlex-Modell	220
9.2.2.	Parametrisierung der Szenarien und Gesamtstromnachfrage	222
9.2.3.	Stündliche Auflösung der Stromnachfrage des Verkehrs in den Szenarien	224
9.2.4.	Ergebnisse zur Stromerzeugung	225
<b>9.3.</b>	<b>Untersuchung der regionalen Verteilung des Fahrstrombedarfs</b>	<b>228</b>
9.3.1.	Methodik	229
9.3.2.	Räumliche Verteilung von Stromverbrauch und Stromerzeugung	229
9.3.3.	Fahrstrombedarf der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge	231
9.3.4.	Fahrstrombedarf der O-Lkw	232
<b>9.4.</b>	<b>Fazit</b>	<b>233</b>
<b>10.</b>	<b>Weiterführende Forschungsfragen</b>	<b>234</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>237</b>
	<b>Anhang A: Detaildarstellung zu verkehrlichen Analysen</b>	<b>246</b>
	<b>Anhang B: Mitglieder des Projektbeirats</b>	<b>247</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1:	Das verkehrslogistische Märkte-Modell	50
Abbildung 4-2:	Marktstrukturelle Effekte	54
Abbildung 4-3:	Wesentliche Rechtsbeziehungen im Güterkraftverkehr	59
Abbildung 4-4:	Hubverkehr	67
Abbildung 4-5:	Depotverkehr	68
Abbildung 4-6:	Stafettenverkehr	68
Abbildung 4-7:	Begegnungsverkehr	69
Abbildung 4-8:	Verkehr über Wechsellpunkte	69
Abbildung 4-9:	Unternehmen des Straßengüterverkehrs nach Zahl der Fahrzeuge	71
Abbildung 5-1:	Konzepte der dynamischen Energieversorgung	82
Abbildung 5-2:	Schematischer Aufbau eines O-HEV und O-BEV	83
Abbildung 6-1:	Verkehrsverflechtungsprognose 2030, zugeordnet auf Fahrzeugarten, Binnen-, Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehrs Deutschland: Verkehrsbelastungen auf BAB mit Lkw > 3,5 t	92
Abbildung 6-2:	Verkehrsverflechtungsprognose 2030, zugeordnet auf Fahrzeugarten, Binnen-, Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehrs Deutschland: Verkehrsbelastungen auf BAB mit Lkw ab 4 Achsen	93
Abbildung 6-3:	Ergebnis der Streckenvorauswahl	98
Abbildung 6-4:	Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 17 – A61 zwischen Köln und Mannheim – bezogen auf 2050	101
Abbildung 6-5:	Bildung Kernnetz aus 17 Auswahlstrecken inklusive sinnvoller Lückenschlüsse im BAB-Netz	110
Abbildung 6-6:	Nachrichtlich: Bildung Kernnetz aus 17 Auswahlstrecken inklusive sinnvoller Lückenschlüsse im BAB-Netz mit möglichen Ergänzungen ins benachbarte Ausland	111
Abbildung 6-7:	Ergebnisse – Verkehre auf dem möglichen innerdeutschen Kernnetz – bezogen auf 2050	112
Abbildung 6-8:	Netzentwicklungsstrategie: Achsen versus Teilnetze	115
Abbildung 6-9:	Achsenbezogene Netzentwicklung am Beispiel A3-A7-A9 von Hamburg über Würzburg und Nürnberg bis München	116
Abbildung 6-10:	Teilnetzbezogene Netzentwicklung am Beispiel Hannover – A7 von Hamburg bis Kassel, A2 von Dortmund bis Berlin und A39 zwischen A7 und A2	117
Abbildung 6-11:	Ergebnisse – Verkehre im achsenorientierten Ansatz am Beispiel A7-A3- A9 Hamburg – Würzburg – Nürnberg - München – bezogen auf 2050	118
Abbildung 6-12:	Ergebnisse – Verkehre im teilnetzorientierten Ansatz am Beispiel Hannover: A7 Hamburg – Kassel, A2 Dortmund – Berlin und A39 Wolfsburg – Salzgitter – bezogen auf 2050	120
Abbildung 7-1:	Das System Oberleitungs-Lkw	123
Abbildung 7-2:	Betrachtungsperspektiven potenzieller Geschäftsmodelle	124

Abbildung 7-3:	Optionen der Fahrzeugbereitstellung: Überblick	126
Abbildung 7-4:	Optionen der Fahrzeugbereitstellung: Praxisbeurteilung	127
Abbildung 7-5:	Infrastrukturkosten im Vergleich	128
Abbildung 7-6:	Vor- und Nachteile unterschiedlicher Finanzierungsmodelle	129
Abbildung 7-7:	Lebenszyklusphasen in der Projektrealisierung	130
Abbildung 7-8:	Privatisierungsmodelle (Alfen & Buschmeier 2014)	131
Abbildung 7-9:	Abrechnungsmodell für fossile Kraftstoffe	135
Abbildung 7-10:	Abrechnungsmodell „Hausstrom“	136
Abbildung 7-11:	Abrechnungsmodell „Maut“	136
Abbildung 7-12:	Geschäftsmodell-Baukasten im Überblick	139
Abbildung 8-1	Übersicht über Einflussfaktoren auf den Markthochlauf von O-Lkw	141
Abbildung 8-2:	Schritte der Markthochlaufmodellierung	142
Abbildung 8-3:	Verteilung der Fahrten über den elektrischen Fahranteil je Jahresfahrleistungskategorie für das Kernnetz der Oberleitungsinfrastruktur	146
Abbildung 8-4:	Verteilung der Anzahl Fahrten am Tag pro Fahrzeug/Nutzer im O-Kernnetz	147
Abbildung 8-5 :	Hochlauf der elektrifizierten Kilometer im Ausgangsszenario	149
Abbildung 8-6:	Abnahme der Fahrleistung (Fahrzeuge im Bestand) und Abnahme des Bestands	153
Abbildung 8-7:	Vergleich der TCO für ein beispielhaftes Nutzerprofil (siehe Abbildung) im Jahr 2030 (Szenario M0)	157
Abbildung 8-8:	Beispielhafte TCO-Differenz im Jahr 2030, 5 Jahre Amortisationsdauer (Szenario M0)	158
Abbildung 8-9:	Beispielhafte TCO-Differenz im Jahr 2030, 1 Jahre Amortisationsdauer (Szenario M0)	159
Abbildung 8-10:	TCO-Mehrkosten eines O-HEV gegenüber einem Dieselfahrzeug je nach Jahresfahrleistung, Amortisationszeit und elektrischem Fahranteil im Jahr 2030 (Szenario M0)	160
Abbildung 8-11:	TCO-Mehrkosten eines O-BEV 200 gegenüber einem Dieselfahrzeug je nach Jahresfahrleistung, Amortisationszeit und elektrischem Fahranteil im Jahr 2030 (Szenario M0)	161
Abbildung 8-12:	Verlauf der Neuzulassungen von Last- und Sattelzügen (Szenario M0)	162
Abbildung 8-13:	Fahrzeugbestand an Last- und Sattelzügen (Szenario M0)	163
Abbildung 8-14:	Anteil elektrischer Fahrleistung von Last- und Sattelzügen nach Elektrifizierungsart (Szenario M0)	164
Abbildung 8-15:	TCO-Mehrkosten gegenüber einem Dieselfahrzeug nach Jahresfahrleistung und elektrischem Fahranteil im Jahr 2030 bei Amortisationszeit von 1 Jahr (Szenario M0)	166
Abbildung 8-16:	Entwicklung der Neuzulassungen (O-HEV + O-BEV) in Abhängigkeit des Amortisationszeitraums	167
Abbildung 8-17:	Elektrische Fahrleistung im Jahr 2030 in Abhängigkeit des Amortisationszeitraums	168

Abbildung 8-18:	Mittlere Mautsätze im Jahr 2025 in ct <sub>2010</sub> /km	171
Abbildung 8-19:	Beispielhafte TCO-Differenz des O-HEV gegenüber einem Diesel-Lkw im Jahr 2030 (Nutzerprofil: siehe Kasten)	172
Abbildung 8-20:	Entwicklung des Neuzulassungsanteils von O-Lkw (O-BEV und O-HEV)	173
Abbildung 8-21:	Entwicklung des Fahrzeugbestands von O-Lkw (O-BEV und O-HEV)	174
Abbildung 8-22:	Anteil der Antriebsarten an der Fahrleistung im Jahr 2030 bei Variation der Lkw-Maut	175
Abbildung 8-23:	Elektrische Fahrleistungen im Jahr 2030 bei Variation der Lkw-Maut	176
Abbildung 8-24:	Elektrische Fahrleistungen im Jahr 2040 bei Variation der Lkw-Maut	177
Abbildung 8-25:	Entwicklung der Mauteinnahmen von Last- und Sattelzügen in den Szenarien	178
Abbildung 8-26:	Kumulierte Veränderung der Mauteinnahmen bis 2040 in Milliarden €	179
Abbildung 8-27	TCO-Differenz des O-BEV 200 gegenüber dem Diesel-Lkw im Jahr 2030 bei Variation des Fahrzeugpreises (Nutzerprofil: siehe Abbildung)	182
Abbildung 8-28:	Entwicklung des Neuzulassungsanteils bei Variation der O-BEV-Anschaffungspreise im Szenario M0 und M80 (O-BEV und O-HEV)	183
Abbildung 8-29:	Elektrische Fahranteile bei Variation des Anschaffungspreis von O-BEV im Jahr 2030	184
Abbildung 8-30:	Entwicklung des Neuzulassungsanteils bei Variation der Nachlademöglichkeit im Szenario M80 (O-BEV und O-HEV)	185
Abbildung 8-31:	Elektrische Fahranteile bei Variation der Nachlademöglichkeit von O-BEV im Jahr 2030	186
Abbildung 8-32:	Entwicklung des Neuzulassungsanteils bei Variation der Verfügbarkeit von O-BEV im Szenario M0 und M80	187
Abbildung 8-33:	Elektrische Fahranteile bei Variation der O-BEV-Verfügbarkeit im Szenario M0 und M80 im Jahr 2030	188
Abbildung 8-34:	Entwicklung des Diesel- und Strompreises in ct <sub>2010</sub> /kWh	189
Abbildung 8-35:	TCO-Vergleich: TCO-Differenz eines O-BEV200 gegenüber einem Diesel-Lkw	191
Abbildung 8-36:	Anteil der elektrischen Fahrleistung bei Variation der Kraftstoff- und Strompreise im Jahr 2030	192
Abbildung 8-37:	Anteil der elektrischen Fahrleistung bei Variation der Kraftstoff- und Strompreise im Jahr 2030	193
Abbildung 8-38:	Varianten der Netzausbaugeschwindigkeit	194
Abbildung 8-39:	Entwicklung der Neuzulassungen (O-HEV und O-BEV) bei Variation des Netzausbaus	195
Abbildung 8-40:	Elektrische Fahrleistungen im Jahr 2030 bei Variation des Netzausbaus	196
Abbildung 8-41:	Entwicklung der spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionen neu zugelassener Last- und Sattelzüge, 2019-2040	197

Abbildung 8-42:	Reduktion der spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionen neu zugelassener Last- und Sattelzüge zwischen 2019 und 2030	198
Abbildung 8-43:	Beispielhafter TCO-Vergleich von Diesel und O-BEV 200 im Jahr 2030 mit und ohne Lkw-Standards (Nutzerprofil: siehe Abbildung)	199
Abbildung 8-44:	TCO-Differenz des O-BEV 200 gegenüber dem Diesel-Lkw im Jahr 2030 mit und ohne Lkw-Standards (Nutzerprofil: siehe Abbildung)	200
Abbildung 8-45:	Entwicklung der Neuzulassungen (O-HEV und O-BEV) mit und ohne Effizienzstandards	201
Abbildung 8-46:	Verteilung der territorialen Fahrleistung von Last- und Sattelzügen je nach Bezug zum O-Kernnetz	204
Abbildung 8-47:	Entwicklung des elektrischen Fahranteils von Last- und Sattelzügen	206
Abbildung 8-48:	Elektrischer Fahranteil im Jahr 2030	207
Abbildung 8-49:	Elektrischer Fahranteil im Jahr 2050	208
Abbildung 8-50:	Entwicklung des Strombedarfs durch O-Lkw in TWh	209
Abbildung 8-51:	Direkte THG-Emissionen der Last- und Sattelzüge	210
Abbildung 8-52:	Reduktion der THG-Emissionen gegenüber dem Dieselszenario im Jahr 2030	211
Abbildung 8-53:	Reduktion der THG-Emissionen gegenüber dem Dieselszenario im Jahr 2040	212
Abbildung 8-54:	Änderung der Transportkosten gegenüber dem Dieselszenario	213
Abbildung 8-55:	Reduktion der direkten THG-Emissionen (TTW) gegenüber dem Dieselszenario im Jahr 2030 mit und ohne Rebound bzw. Änderung der Fahrleistung	214
Abbildung 8-56:	Vergleich von elektrischer Fahrleistung im Schwerlastverkehr und Strombedarf im Jahr 2030	215
Abbildung 8-57:	Reduktion der THG-Emissionen im Jahr 2030 im Vergleich mit anderen Studien	216
Abbildung 8-58:	Veränderung Energiesteuer und Maut gegenüber dem Dieselszenario im Jahr 2040	217
Abbildung 8-59:	Veränderung Energiesteuer und Maut gegenüber dem Dieselszenario, kumuliert bis 2050	218
Abbildung 8-60:	Volkswirtschaftliche Kosten der Dekarbonisierung im Straßengüterverkehr: O-Lkw und strombasierte Kraftstoffe im Vergleich	219
Abbildung 9-1:	Gesamtstromnachfrage und Stromnachfrage des Verkehrs	223
Abbildung 9-2:	Stündliche Stromnachfrage des Verkehrs in einer Beispielwoche im Jahr 2050	225
Abbildung 9-3:	Jährliche Stromerzeugung im Szenario mit O-Lkw	226
Abbildung 9-4:	Stromerzeugung im Jahr 2050 im Vergleich der Szenarien	227
Abbildung 9-5:	Differenzstromerzeugung Fahrstrom O-Lkw im Jahr 2050	227
Abbildung 9-6:	Räumliche Verteilung von Stromnachfrage und erneuerbarer Stromerzeugung im Jahr 2050 (zentrale EE-Erzeugung)	230
Abbildung 9-7:	Räumliche Verteilung von Stromnachfrage und erneuerbarer Stromerzeugung im Jahr 2050 (lastnahe EE-Erzeugung)	231

- Abbildung 9-8: Räumliche Verteilung des Fahrstrombedarfs von Pkw und leichten  
Nutzfahrzeugen im Jahr 2050 232
- Abbildung 9-9: Räumliche Verteilung des Fahrstrombedarfs von O-Lkw im Jahr 2050  
233

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland, gemäß offizieller Statistik	47
Tabelle 4-2:	Straßengüterverkehr in Deutschland nach Güterabteilungen (NST 2007)	48
Tabelle 4-3:	Straßengüterverkehr in Deutschland nach Hauptverkehrsbeziehungen	49
Tabelle 4-4:	Entfernungsverteilung im Straßengüterverkehr Deutschlands	49
Tabelle 4-5:	Straßeninfrastruktur in Deutschland 2014: Länge und durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV)	53
Tabelle 4-6:	Nutzfahrzeugbestand Deutschland 2015	62
Tabelle 4-7:	Inlands-Fahrleistung mit Nutzfahrzeugen 2014	62
Tabelle 4-8:	Nutzfahrzeug- und Aufliegerbestand nach Herstellern 2017	63
Tabelle 4-9:	Top 10 größte Unternehmen im Ladungsverkehr (FTL)	72
Tabelle 4-10:	Top 10 größte Unternehmen im Stückgutverkehr (LTL)	73
Tabelle 5-1:	Fahrzeugspezifikationen O-Lkw im Jahr 2025	84
Tabelle 6-1:	Prämissen zur Fortschreibung der Prognose auf 2050	94
Tabelle 6-2:	Ergebnisse der Prognosefortschreibung	95
Tabelle 6-3:	Streckenvorauswahl: Gewählte Strecken mit genauer Definition	99
Tabelle 6-4:	Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 17 – A61 zwischen Köln und Mannheim 2050 im DTV-w	102
Tabelle 6-5:	Relevante Kennziffern der Auswahlstrecke 17 - A61 zwischen Köln und Mannheim 2050	103
Tabelle 6-6:	Relevante verkehrliche Kennwerte der Auswahlstrecken – Lkw-Verkehr, davon schwere Lkw ab 4 Achsen, die mindestens 100 km auf der Auswahlstrecke unterwegs sind, mittlere Fahrtweiten im Vor- und Nachlauf der Auswahlstrecke	104
Tabelle 6-7:	Kennwerte zum Verkehrspotenzial auf den Auswahlstrecken – schwere Lkw, die mindestens 100 km auf der Auswahlstrecke unterwegs sind, darunter Verkehr mit Vor- und Nachlauf bis 250 km und darunter bis 100 km	106
Tabelle 6-8:	Rangreihung der Auswahlstrecken nach Verkehrspotenzial beim Gesamtverkehr (Schwerverkehr, der mind. 100 km auf der Auswahlstrecke unterwegs ist), davon beim Verkehr mit Vor- und Nachlauf bis 250 km und bis 100 km	107
Tabelle 6-9:	Lückenschlüsse im BAB-Netz	109
Tabelle 6-10:	Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite im möglichen Kernnetz 2050 im DTV-w	113
Tabelle 6-11:	Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite im achsenorientierten Ansatz zur Netzentwicklung 2050 im DTV-w	119
Tabelle 6-12:	Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite im teilnetzorientierten Netzentwicklungsansatz 2050 im DTV-w	121

Tabelle 6-13:	Vergleich der Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite im achsenorientierten und im teilnetzorientierten Netzentwicklungsansatz 2050 im DTV-w	122
Tabelle 7-1:	Denkbare Fahrzeugbereitstellungsoptionen für den O-Lkw	126
Tabelle 7-2:	Möglichkeiten der funktionalen Privatisierung	131
Tabelle 7-3:	Vergütungsmodelle bei deutschen ÖPP-Modellen im Straßenverkehr	132
Tabelle 7-4:	Vergütungsmodelle und deren Eignung in der Errichtungs- und Nutzungsphase	133
Tabelle 7-5:	Mögliche Bemessungsgrundlagen für Infrastruktur- und Fahrstromabrechnung	137
Tabelle 8-1:	Anzahl und Struktur der Lkw-Nutzerprofile	143
Tabelle 8-2:	Kategorisierung der Jahresfahrleistung von Sattelzugmaschinen	144
Tabelle 8-3:	Reichweite der untersuchten O-BEV je nach Einsatzart	145
Tabelle 8-4:	Verteilung der Nutzerprofile auf den elektrischen Fahranteil und die Anforderung an die elektrische Reichweite (für das Kernnetz und die Jahresfahrleistungskategorie 120.000 km)	147
Tabelle 8-5 :	Zeitliche Zuordnung der Netzausbaustufen	148
Tabelle 8-6:	Fahrzeugpreise (ohne MwSt.) und Energieverbrauch im Vergleich	150
Tabelle 8-7:	Entwicklung des Batteriepreises	151
Tabelle 8-8:	Wartungskosten	151
Tabelle 8-9:	Diesel- und Strompreise in ct <sub>2010</sub> /kWh (ohne Mehrwertsteuer)	152
Tabelle 8-10:	Fahrleistung und Transportleistung von Last- und Sattelzugmaschinen	153
Tabelle 8-11:	WTW-Emissionsfaktoren für Strom und Diesel in gCO <sub>2</sub> /kWh	154
Tabelle 8-12:	Szenario M0	156
Tabelle 8-13:	Übersicht über die Szenarien zu Lkw-Maut	169
Tabelle 8-14:	Mittlere Mautsätze im Jahr 2025 in ct <sub>2010</sub> /km	170
Tabelle 8-15:	Übersicht über die Szenarien zu O-BEV	181
Tabelle 8-16:	Mehrkosten eines O-Lkw ggü. Dieselfahrzeug im Jahr 2030 in € <sub>2010</sub>	181
Tabelle 8-17:	Diesel- und Strompreise in ct <sub>2010</sub> /kWh (ohne Mehrwertsteuer)	189
Tabelle 8-18:	Übersicht über die Szenarien zu Kraftstoff- und Strompreis	190
Tabelle 8-19:	Durchschnittliche Energiekosten in ct <sub>2010</sub> /km im Jahr 2030	190
Tabelle 8-20:	Übersicht über die Szenarien	202
Tabelle 9-1:	Stromnachfrage des Verkehrs	222
Tabelle 9-2:	Entwicklung der installierten Leistung der Kraftwerke im Szenarienvverlauf	223
Tabelle 9-3:	Emissionsfaktor der Stromerzeugung [MtCO <sub>2</sub> ]	228

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
\$	US-Dollar (Währung)
€	Euro (Währung)
AEUV	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
AfA	Abschreibungstabelle (Absetzung für Abnutzung)
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle)
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CAPEX	capital expenditures
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> e	CO <sub>2</sub> -Äquivalent (equivalent)
C-Rate	Ladeleistung in Bezug auf die Batteriekapazität (capacity)
ct	Cent (hundertstel Euro)
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
EE	Erneuerbare Energien
E-Lkw	Elektrischer Lkw
ERS	Elektrifizierte Straße, z. B. per Oberleitung (electric road system)
EU	Europäische Union
Euro VI	Aktuelle europäische Abgasnorm für Nutzfahrzeuge ab 3,5 t
FCEV	Brennstoffzellen-Fahrzeug (fuel cell electric vehicle)
FTL	Komplettladung (Full Truck Load)
GU-Vertrag	Generalunternehmer-Vertrag
GüKG	Güterkraftverkehrsgesetz
GW	Gigawatt (10 <sup>9</sup> Watt), Leistungseinheit
HEV	Hybrid-Fahrzeug mit Verbrennungsmotor als Hauptantrieb (hybrid electric vehicle)
HGB	Handelsgesetzbuch
KraftStG	Kraffahrzeugsteuergesetz
kWh	Kilowattstunde (10 <sup>3</sup> Wattstunde), Energie- bzw. Arbeitseinheit
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Verflüssigtes Erdgas (liquefied natural gas)
LTL	Teilladung (Less truck load)
MaaS	mobility as a service

MJ	Megajoule ( $10^6$ Joule), Energieeinheit
MW	Megawatt ( $10^6$ Watt), Leistungseinheit
MwSt.	Mehrwertsteuer
NTC	Net Transfer Capacities
O-BEV	Oberleitungsgebundenes batterieelektrisches Fahrzeug
O-BEV 100	Oberleitungsgebundenes batterieelektrisches Fahrzeug mit 100 km elektrischer Reichweite
O-HEV	Oberleitungsgebundenes Hybrid-Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
O-Infrastruktur	Oberleitungsinfrastruktur
O-Lkw	Oberleitungs-Lkw (Oberbegriff für O-BEV und O-HEV)
O-System	Oberleitungssystem
ÖPP	Öffentlich-private Partnerschaft
OPEX	operating expenditures
p.a.	Pro Jahr (per annum)
PHEV	Hybridfahrzeug mit Möglichkeit zur externen Batterieladung (plug-in hybrid electric vehicle)
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Feinstaub (particulate matter)
PtX	Technologie zur Nutzung von Strom (Power-to-X)
REEV	Elektrofahrzeug mit Aggregat zur Reichweitenverlängerung (range extended electric vehicle)
StratON	Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge (Forschungsvorhaben)
StVG	Straßenverkehrsgesetz
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SZM	Sattelzugmaschine
TCO	Anschaffungs- und Betriebskosten aus Nutzersicht (total cost of ownership)
THG	Treibhausgas(e)
tkm	Tonnenkilometer
TTW	Bilanzraum „Tank bis Rad“ (tank to wheel)
TUL	Transport-, Umschlag- und Lagerdienstleistungen
TWh	Terrawattstunde ( $10^{12}$ Wattstunde),
V <sub>Dc</sub>	Spannung (Volt) im Gleichspannungssystem (direct current)
WTW	Bilanzraum „(Energie-)Quelle bis Rad“ (well to wheel)

## 1. Zusammenfassung

Der Straßengüterverkehr hat in Deutschland einen Anteil von etwa einem Drittel an den verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen. Der Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs kommt daher für die Erreichung der Klimaschutzziele ein hoher Stellenwert zu. Da selbst in ambitionierten Verlagerungsszenarien auf die Schiene weiterhin mehr als die Hälfte der Güterverkehrsleistung auf der Straße erfolgt, ist es dringend geboten, **Alternativen zum bisher dominierenden Diesel-Lkw** zu entwickeln. Bisher konnte im schweren Straßengüterfernverkehr keine Antriebsalternative zum Diesel-Lkw die Serienreife erreichen und sich am Markt etablieren.

Oberleitungsgebundene Fern-Lkw (O-Lkw) konnten sich in ersten Praxiserprobungen als mögliche Lösung im Straßengüterfernverkehr bewähren und wurden in ersten Analysen als vielversprechende Technologieoption bewertet. Aktuell werden erste Pilotstrecken für die Erprobung der Technologie im öffentlichen Straßenraum etabliert und eine erste Strecke wurde im Frühjahr 2019 in der Nähe von Frankfurt auf der Autobahn A5 in Betrieb genommen.

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit geförderten Forschungsvorhabens „**StratON – Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge**“ haben die drei Verbundpartner Öko-Institut e.V., Hochschule Heilbronn und Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO in Zusammenarbeit mit der Intraplan Consult GmbH unter Einbindung von Experten und Begleitung durch einen Projektbeirat in den vergangenen dreieinhalb Jahren die Potenziale des O-Lkw-Systems vertieft analysiert.

Die Projektergebnisse zeigen, dass das O-Lkw-System **hohe Potenziale für die Minderung der Treibhausgasemissionen des schweren Straßengüterfernverkehrs** aufweist. Bei sehr schnellem Aufbau eines Oberleitungs-Netzes kann der THG-Minderungsbeitrag im Jahr 2030 bei **bis zu 3-6 Mio. t** (tank to wheel) bzw. 2-4 Mio. t (well to wheel, d. h. inklusive der Mehremissionen im Stromsektor) liegen. Längerfristig liegen die Treibhausgaseminderungsbeiträge nochmal deutlich höher.

Durch die Elektrifizierung eines Autobahn-Kernnetzes von rund 4.300 Kilometern (zu 90 % elektrifiziert - 3.800 elektrische km) können bereits große Verkehrsmengen erschlossen werden. Die Kosten für den Netzaufbau sind mit rund 12 Mrd. Euro als moderat zu bewerten, gerade auch im Vergleich zu anderen Dekarbonisierungsoptionen des Straßengüterverkehrs wie strombasierten Kraftstoffen.

Aufgrund unterschiedlichster Anforderungsprofile erscheint zukünftig ein Mix an Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr wahrscheinlich. Die Förderung von Antriebsalternativen und erforderlicher Infrastruktur sollte sich auf Optionen konzentrieren, die perspektivisch Klimaneutralität zu möglichst geringen volkswirtschaftlichen Kosten ermöglichen. Die externe Stromzuführung über die Oberleitung ist geeignet, um den hohen Anforderungen schwerer Nutzfahrzeuge an die Leistung und Reichweite sowie dem daraus resultierenden hohen Energiebedarf zu genügen. Gleichzeitig kann auf eine aufwändige und kostspielige Energiespeicherung im Fahrzeug (mittels Batterie oder Wasserstofftank) verzichtet werden.

Angesichts des hohen Handlungsdrucks zur Reduktion der THG-Emissionen sollten marktnahe Technologien wie der O-Lkw frühzeitig in größerem Stil erprobt werden, um wichtige Praxiserfahrungen zu sammeln. Damit muss nicht zwangsläufig eine Technologiefestlegung verbunden sein.

Um einen Markterfolg von vielversprechenden Technologien wie dem O-Lkw sicherzustellen und damit der Zielstellung einer deutlichen Minderung der Treibhausgasemissionen näherzukommen, sind jedoch deutlich veränderte Rahmenbedingungen notwendig, die staatliche Initiative erfordern.

- **Richtungssicherheit geben:** Die Einführung von O-Lkw im Straßengüterverkehr ist bei allen Marktakteuren mit großen Veränderungen und relevanten Investitionen verbunden. Die notwendigen Veränderungen im Verhalten der Akteure erfordert Planungssicherheit bezüglich der politischen Ziele und der zukünftigen Rahmenbedingungen. Eine klare und langfristige Ausrichtung der politischen Instrumente im Straßengüterverkehr an der Treibhausgasminde- rung ist hierfür erforderlich.
- **Infrastrukturausbau garantieren:** Eine verfügbare Oberleitungsinfrastruktur ist Grundvoraussetzung für den Einsatz von O-Lkw. Für einen rein privatwirtschaftlichen Aufbau und Betrieb der Infrastruktur sind die Investitionsrisiken jedoch zu hoch. Analog zum Aufbau anderer Energieversorgungsinfrastrukturen (z. B. Stromnetz) erfordert dieser eine staatliche Risiko- übernahme und einen verlässlichen Entwicklungsplan. Ein staatlich garantierter Infrastrukturausbauplan gibt einen klaren Rahmen für das Einsatzspektrum der Fahrzeuge vor und schafft so Planungssicherheit für die Fahrzeugbetreiber.
- **Rahmenbedingungen für die Angebotsseite setzen:** Der Markterfolg der Technologie ist vom Angebot marktreifer und ökonomisch konkurrenzfähiger Fahrzeuge abhängig. Für die Serienfertigung sind keine technologischen „Durchbrüche“ erforderlich, jedoch muss es für Hersteller Anreize für deren Produktion geben. So können durch ambitionierte Lkw-CO<sub>2</sub>- Standards die Investitionen in O-Lkw und andere Antriebsalternativen angereizt werden.
- **Rahmenbedingungen für die Nachfrager setzen:** Fahrzeugbetreiber im Güterverkehrs- markt werden auf O-Lkw nur umsteigen, wenn sich der Betrieb im Vergleich zu den Alternativen rechnet und dieser auch technisch sichergestellt werden kann. Durch eine CO<sub>2</sub>-basierte Mautspreizung kann der Betriebskostenvorteil von O-Lkw sichergestellt werden.
- **Praktische Erfahrungen sammeln:** Das O-Lkw-System weist bereits einen hohen Techno- logiereifegrad auf und wird in Pilotvorhaben im öffentlichen Straßenraum erprobt. Um einen verlässlichen Regelbetrieb perspektivisch sicherzustellen, sind jedoch in einem nächsten Schritt größere, marktnahe Pilotvorhaben notwendig.
- **Internationale Kooperation sicherstellen:** Der Straßengüterverkehr zeichnet sich durch eine hohe internationale Verflechtung aus. Die grenzüberschreitende, technische Kompatibi- lität der Systeme ist daher von zentraler Bedeutung. Internationale Kooperationen bei der Technologieentwicklung und -erprobung sollten frühzeitig angestrebt und wichtige Schnitt- stellen frühzeitig international standardisiert werden.

## **Oberleitungs-Lkw können bereits im Jahr 2025 einen signifikanten Klimavorteil gegenüber Diesel-Lkw erreichen, auch bei Nutzung des deutschen Strommixes.**

Die erforderliche, drastische Minderung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs ist die politische Haupttriebfeder für die Diskussion von Antriebsalternativen im Straßengüterfernverkehr zum etablierten Diesel-Lkw. Bei Fern-Lkw werden die Treibhausgasemissionen angesichts der hohen Fahrleistungen noch stärker als bei Pkw von der Nutzungsphase dominiert, während die Fahrzeugherstellung weniger ins Gewicht fällt.

Im Vergleich der Antriebstechnologien zeigen die elektrischen Fahrzeugvarianten (O-Lkw und BEV) bis zum Jahr 2030 die höchsten Treibhausgas-Minderungspotenziale. Im Vergleich zu heutigen Diesel-Fern-Lkw können O-Lkw unter Berücksichtigung des jüngst beschlossenen Kohleausstiegs die betriebsbedingten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2025 nahezu halbieren (minus 46 %) und bis 2030 eine Minderung um 60 % erreichen. Rein batterieelektrische Lkw (BEV) können sogar noch minimal höhere Emissionsminderungen im Betrieb erzielen, allerdings bei einem höheren fahrzeugseitigen Ressourcenbedarf und tendenziell höheren Emissionen in der Herstellungsphase. Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) haben bei Herstellung von Wasserstoff auf Basis des deutschen Strommixes angesichts der geringeren Gesamtenergieeffizienz aktuell mehr als doppelt so hohe Treibhausgasemissionen wie Diesel-Lkw. Im Jahr 2025 wird trotz Berücksichtigung des Kohleausstiegs und eines weiter zunehmenden Anteils der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung lediglich ein geringfügiger Emissionsvorteil von etwa 10 % gegenüber heutigen Diesel-Lkw erreicht. Das Minderungspotenzial von Brennstoffzellen-Lkw bis zum Jahr 2030 auf Basis des deutschen Strommixes liegt mit rund 30 % im Bereich des maximalen technischen Treibhausgasminderungspotenzials von Diesel-Lkw.

LNG-Lkw können zwar kurzfristig (in 2025) eine Treibhausgas (THG)-Minderung der WTW-Emissionen gegenüber Diesel-Lkw erzielen. Allerdings sind LNG-Lkw im Gegensatz zu den elektrischen Alternativen, bei welchen sich der THG-Minderungsbeitrag bei zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien im Stromsektor noch deutlich weiter erhöht, keine langfristige Dekarbonisierungsoption. Eine zunehmende Nutzung von synthetischem Methan auf Basis von EE-Strom (Strom aus erneuerbaren Energien) wäre zwar denkbar, aber nach heutigem Kenntnisstand auch jenseits von 2030 mit sehr hohen Kraftstoffkosten verbunden und hätte keinen signifikanten Vorteil gegenüber dem Einsatz von synthetischen Kraftstoffen in Diesel-Lkw.

Insgesamt weisen die elektrischen Fahrzeugvarianten (BEV, O-BEV) die höchste Energieeffizienz unter den genannten Antriebsalternativen auf. Ihr Endenergiebedarf ist etwa halb so hoch wie bei Diesel- und LNG-Fahrzeugen. Brennstoffzellenfahrzeuge sind im Betrieb zwar ebenfalls (etwa 15 bis 20 %) effizienter als konventionelle Lkw. Die Wasserstoffherstellung führt aber je gefahrenem Kilometer zu einem zwei- bis dreimal so hohen Gesamtenergiebedarf (WTW) im Vergleich zur direkten Stromnutzung. Bei der gleichen Menge an eingesetztem Strom aus erneuerbaren Energien können Fahrzeuge mit direkter Stromnutzung daher auch die größte Minderung an Treibhausgasemissionen generieren.

## **Oberleitungs-Lkw können bereits im Jahr 2025 über eine Nutzungsdauer von 5 Jahren geringere Nutzerkosten erzielen als vergleichbare Dieselfahrzeuge.**

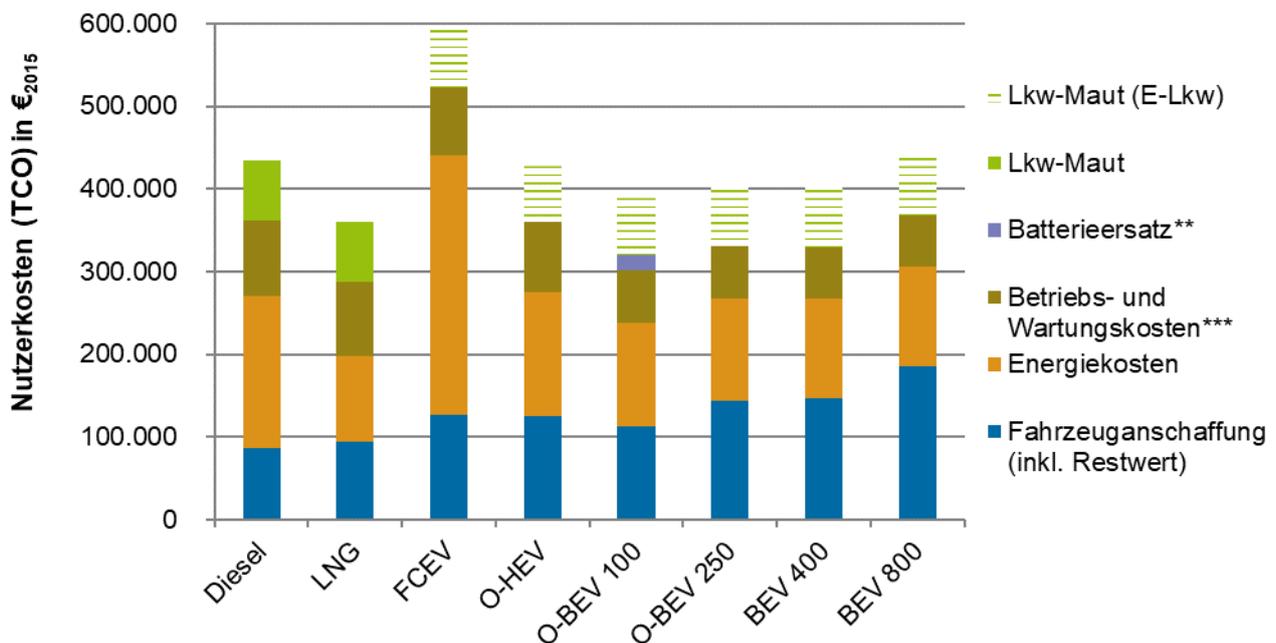
Der wirtschaftliche Betrieb von Lkw im Straßengüterfernverkehr ist eine zentrale Voraussetzung für deren Markterfolg. Die vergleichende Analyse der Nutzerkosten (TCO) für unterschiedliche Antriebskonzepte zeigt für eine typische Nutzungsdauer einer Sattelzugmaschine im Fernverkehr von 5 Jahren, dass O-Lkw unter bestimmten Rahmenbedingungen bereits im Jahr 2025 Kostenvorteile gegenüber Dieselfahrzeugen erzielen können.

Den größten Einfluss auf die Nutzerkosten von alternativen Antriebssystemen haben die kilometerabhängigen Kosten, d. h. Energiepreise, fahrleistungsabhängige Straßenbenutzungsgebühren und Wartungskosten. Die Unsicherheit des Fahrzeugrestwertes und auch der Batteriepreisentwicklung – mit Ausnahme von Fahrzeugen mit sehr großer Traktionsbatterie – sind hingegen von deutlich geringerem Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.

In der vorteilhaftesten Fahrzeugkonfiguration als O-Lkw mit vergleichsweise kleiner Traktionsbatterie mit 100 Kilometer Reichweite (O-BEV 100) können sich die Mehrkosten von 25 bis 50 % gegenüber einem Diesel-Lkw bereits nach wenigen Jahren im Betrieb amortisieren. O-Lkw mit konventionellem Hybridantrieb (O-HEV) liegen bei hohen elektrischen Fahrleistungen in der Fünfjahresbetrachtung mindestens auf dem Kostenniveau von Diesel-Lkw, bei sehr hohem elektrischen Fahrleistungsanteil sogar darüber.

Auch rein elektrische Fern-Lkw mit 400 und 800 km Reichweite (BEV 400/800) könnten schon bis 2025 die Wirtschaftlichkeitsschwelle erreichen, während Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) weiterhin deutlich höhere Kosten aufweisen. Hauptursachen sind die hohen Bereitstellungskosten von Wasserstoff mittels Elektrolyse und der – im Vergleich zur direkten Stromnutzung – höhere Energieverbrauch. Lkw, die mit verflüssigtem Erdgas (LNG) angetrieben werden, können im Jahr 2025 die günstigsten Gesamtkosten aufweisen, zumindest unter der Annahme, dass sich der Erdgaspreis auf dem Weltmarkt nicht wesentlich gegenüber dem heutigen Niveau erhöht.

**Abb. 1: Antriebsabhängige Kosten von Sattelzugmaschinen im Jahr 2025\***



\* Kosten exkl. MwSt., 5 Jahre Nutzungsdauer, 120.000 km p.a. O-Lkw mit 50 % Fahranteil unter Oberleitung

FCEV: Brennstoffzellen-Lkw, O-HEV: Oberleitungsgebundener Hybrid-Lkw mit Verbrennungsmotor, O-BEV 100: Oberleitungsgebundener batterieelektrischer Lkw mit 100 km elektrischer Reichweite; BEV 400/800: Batterieelektrischer Lkw mit 400/800 km Reichweite

\*\* Austausch der Batterie nach Erreichen der maximalen Zyklenzahl

\*\*\* Wartung, Reparatur, Schmierstoffe, AdBlue

Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut (Kühnel et al. 2018)

**Insbesondere Zulaufstrecken zu logistischen Umschlagpunkten eignen sich für die frühe Elektrifizierung und können relevante Verkehrsmengen erschließen.**

Mehr als 65 % des Lkw-Fernverkehrs auf der Autobahn findet auf einem Kernnetz statt, das rund ein Drittel des deutschen Autobahnnetzes umfasst. Diese etwa 4.000 km Strecke umfassen im Wesentlichen die einstelligen Autobahnen A1 bis A9. Über dieses Kernnetz lassen sich die meisten großen Wirtschaftszentren in Deutschland mit Kantenlängen von ca. 200 bis 250 km untereinander vernetzen. Damit ist dieses Netz fernverkehrsrelevant. Dennoch unterscheiden sich die einzelnen Streckenzüge teilweise deutlich voneinander, u.a. hinsichtlich der Fahrzeugzahlen, der Homogenität des Verkehrsflusses („Korridorcharakter“) sowie parallellaufender Schienengüterverkehre.

Versucht man die Frage zu beantworten, wie viele Oberleitungs-Lkw diese Strecke nach einer Elektrifizierung tatsächlich nutzen könnten, so spielt der Zu- und Nachlauf zur Oberleitungsstrecke in Verbindung mit der Fahrzeugkonfiguration die zentrale Rolle: je weiter sich das Fahrzeug aufgrund der individuellen Fahrzeugkonfiguration (Batteriegröße bzw. Hybridisierung) und der vorhandenen Infrastruktur (Nachlademöglichkeit am Zielpunkt) von der Oberleitung entfernen kann, umso größer das Potenzial. Umgekehrt gilt: je enger das Netz, desto geringer wird die Bedeutung der Reichweite der Fahrzeuge nach Verlassen der Oberleitung.

Im Ergebnis lassen sich aus den durchgeführten Analysen 17 Auswahlstrecken identifizieren, die sich durch eine besonders hohe Bündelungswirkung beim Güterfernverkehr auszeichnen, und die vorrangig auf eine Elektrifizierung zu prüfen sind.

Das höchste Fahrtenpotenzial mit Oberleitung-Lkw weisen dabei die Zulaufstrecken zu den großen logistischen Umschlagpunkten auf, insbesondere die Zuläufe zum Hafen Hamburg (A 1, A7), aber auch in die Ballungsräume Rhein/Ruhr und Hannover/Braunschweig/Wolfsburg sowie nach Berlin und im Rhein-Main-Gebiet. Dort führen viele Vor- und Nachläufe über verhältnismäßig kurze Distanzen, sodass bereits mit verhältnismäßig kleinen Batterien viele Fernverkehrskunden entlang der Oberleitungsstrecke tatsächlich bedient werden können.

**Ein Kernautobahnnetz von etwa 4.300 km Länge bietet sich als Zielnetz für den Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur an. Durch eine zunehmende Vernetzung von Einzelabschnitten kann dieses Ziel auf unterschiedlichen Wegen erreicht werden.**

Durch Verknüpfung der 17 Auswahlstrecken mit sinnhaften „Netzergänzungen“ (Lückenschlüssen) lässt sich für Deutschland ein rund 4.300 km langes Oberleitungs-Kernnetz definieren, das durch ein besonders gutes Nutzen-Kosten-Verhältnis geprägt ist. Dieses Netz muss dabei nicht gleichzeitig errichtet und in Betrieb genommen werden. Vielmehr ist eine stufenweise Inbetriebnahme möglich und sinnvoll. Zudem kann das Netz zunächst auch nur auf Teilstrecken elektrifiziert und sukzessive verdichtet werden.

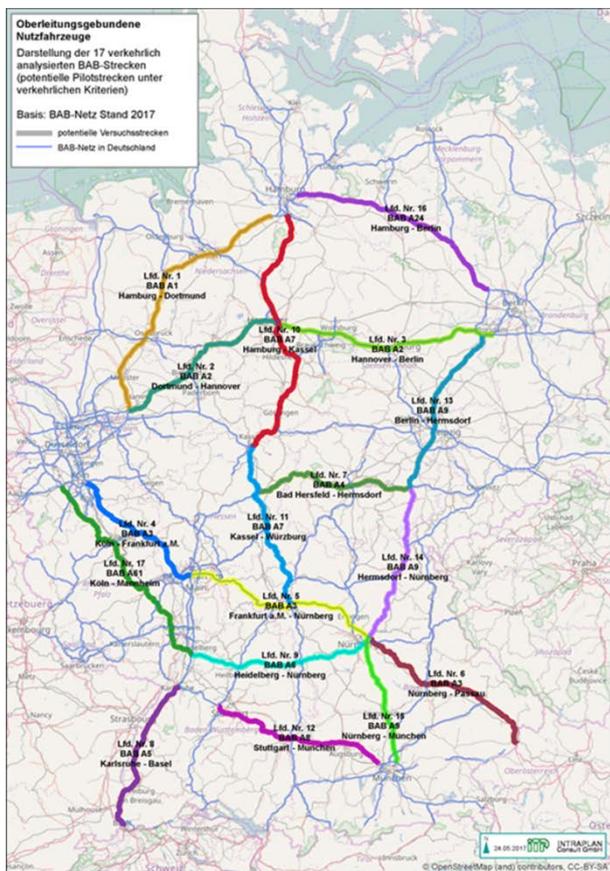
Auch weil sich die 17 Auswahlstrecken in der zu erwartenden oberleitungselektrischen Fahrleistung durchaus voneinander unterscheiden, kommt der Entscheidung über die Ausbaureihenfolge eine wichtige Bedeutung zu. Dabei erscheint es auf Grundlage der Verkehrsmengen sowohl möglich, an verschiedenen Stellen, z. B. an den Seehäfen und im Rhein/Main-Gebiet, mit dem Aufbau von Strecken zu beginnen und diese später zu einem Netz zusammenwachsen zu lassen, als auch von Beginn an ein zusammenhängendes Netz zu entwickeln. Insbesondere wenn mit zunächst voneinander getrennten Teilstrecken begonnen wird, ist es wichtig, dass die technische Interoperabilität zwischen allen Strecken uneingeschränkt gewährleistet ist.

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass mit der Aufbauvariante eines „Sterns“ rund um Hannover (A2, A7, A39) größere Fahrleistungsanteile erschlossen werden können als mit einem vergleichbar

langen Korridor wie Hamburg – München. Das untersuchte Beispiel spricht also dafür, dass mit dem Aufbau von regionalen Teilnetzen bei vergleichbarer elektrifizierter Streckenlänge schneller höhere Fahrleistungsanteile erschlossen werden könnten.

Die ELISA-Teststrecke auf der A5 zwischen den Anschlussstellen Langen/Mörfelden und Weiterstadt wurde nicht in die ersten 17 Auswahlstrecken mit aufgenommen, dies ist jedoch nicht mit einer mangelnden Eignung dieses Streckenabschnitts für eine Elektrifizierung gleichzusetzen. Bei der Bildung eines möglichen Gesamtnetzes elektrifizierter Autobahnen wurde die A5 als wichtiger Lückenschluss erkannt (zwischen Bad Hersfeld – Frankfurt – Heidelberg bis Karlsruhe) und entsprechend bei den verkehrlichen Analysen berücksichtigt (siehe Abb. 2, rechts). Die verkehrlichen Analysen des Kernnetzes weisen auf die hohe Verkehrsstärke und damit die besonders große Bedeutung dieses Abschnitts für den Fernverkehr hin.

**Abb. 2: Oberleitungsinfrastruktur in Deutschland: Auswahlstrecken (links) und Kernnetz mit Lückenschlüssen (rechts)**



Quelle: Eigene Darstellung



Quelle: Eigene Darstellung

**Bei Aufbau des Kernnetzes bis zum Jahr 2035 könnten im Jahr 2040 rund 1/3 der Fahrleistung von Last- und Sattelzügen elektrisch erfolgen. Die Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs in Deutschland könnten dann um 9-12 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2040 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion der THG-Emissionen um 25 %.**

Unter der Voraussetzung, dass die Wirtschaftlichkeit von O-Lkw durch entsprechende politische Instrumente sichergestellt wird und das Oberleitungs-Kernnetz von 4.300 km bis 2035 (70 % elektrifiziert, 3.000 km Oberleitung) aufgebaut wird, kann im Jahr 2040 (90 % elektrifiziert, 3.800 km

Oberleitung) allein durch langlaufende Verkehre (>100 km auf dem Netz) rund 1/3 der Inlandsfahrleistung schwerer Lkw in Deutschland elektrisch erfolgen. Dadurch können je nach Szenario THG-Emissionen in Höhe von 9-12 Mio. t im Jahr 2040 eingespart werden (Tank-to-Wheel, d. h. ohne Mehrmissionen im Stromsektor). Bis 2050 steigt der THG-Minderungsbeitrag in den untersuchten Szenarien auf 10-13 Mio. t. Dazu kommt ein zusätzliches Potenzial durch Verkehre mit geringem Streckenanteil auf dem Oberleitungsnetz sowie weitere Potenziale im Falle von grenzüberschreitender Verfügbarkeit einer Oberleitungsinfrastruktur.

**Falls es gelingt, das Kernnetz von 4.300 Kilometern bereits bis zum Jahr 2030 zu 70 % zu elektrifizieren, könnten auch schon im Jahr 2030 relevante THG-Minderungspotenziale in Höhe von rund 2-4 Mio. t (Well-to-Wheel) bzw. 3-6 Mio. t (Tank-to-Wheel) gehoben werden.**

Grundsätzlich sind im Straßengüterverkehr die Haltedauern der Fahrzeuge deutlich kürzer als im Personenverkehr und die Umstellung des Fahrzeugbestandes auf alternative Antriebskonzepte kann somit schneller erfolgen. In der Anfangsphase können bestimmte geeignete Verkehre (z. B. Pendelverkehre) auch mit vergleichsweise geringem Netzausbau elektrifiziert werden. Damit jedoch O-Lkw für einen relevanten Anteil der Verkehre und der Nutzer attraktiv werden und entsprechende THG-Minderungspotenziale gehoben werden können, muss das Kernnetz möglichst zeitnah elektrifiziert werden.

**Der Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur ist mit verhältnismäßig geringen Investitionen verbunden. Eine Kostenumlegung auf die Nutzer würde einen wirtschaftlichen Fahrzeugeinsatz in der frühen Marktphase jedoch verhindern.**

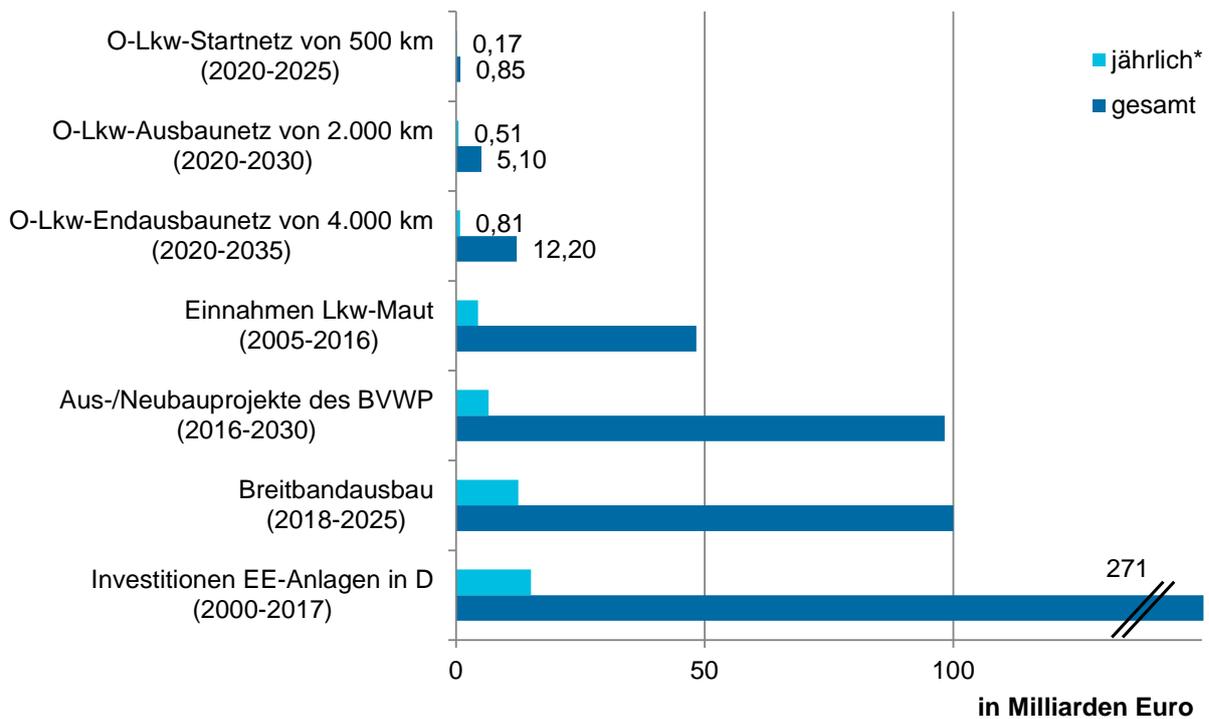
Der Aufbau und die Verfügbarkeit der erforderlichen Energieversorgungsinfrastruktur ist für den Markterfolg einer alternativen Antriebstechnologie im Straßengüterverkehr von zentraler Bedeutung, um mit der etablierten Dieselschnologie und dem flächendeckenden Tankstellennetz konkurrieren zu können. Die frühe Marktphase stellt sich dabei als besonders kritisch dar, da zum einen eine geringe Infrastrukturdichte die Attraktivität des alternativen Energieversorgungssystems schmälert und zum anderen eine zunächst geringe Auslastung sich negativ auf den wirtschaftlichen Betrieb der Infrastruktur auswirkt.

Der Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur ist im Vergleich zu den anderen betrachteten Energieversorgungssystemen (LNG, Wasserstoff, stationsbasierte Stromversorgung) mit den voraussichtlich höchsten Investitionskosten pro Fahrzeug verbunden. Die Infrastrukturkosten für ein Startnetz, das auf eine vergleichbare Fahrzeuganzahl ausgelegt ist, betragen für LNG etwa ein Zehntel, für Wasserstoff etwa ein Drittel und für Hochleistungs-ladestationen für batterieelektrische Lkw knapp zwei Drittel der Kosten für eine frühe Ausbaustufe des Oberleistungssystems (Kühnel et al. 2018). Im Vergleich zu anderen Investitionen in Zukunftstechnologien stellt sich der Investitionsbedarf für den Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur jedoch moderat dar. Ein rascher Ausbau des Netzes bis zum Jahr 2035 (Kernnetz zu 90 % elektrifiziert) wäre mit mittleren jährlichen Investitionskosten von etwa 800 Millionen € verbunden. Zum Vergleich: allein durch die seit Juli 2018 gültige Mautausweitung wird eine Erhöhung der jährlichen Mauteinnahmen von über 2 Mrd. € erzielt.

Eine Umlegung der Investitionskosten für den Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur auf die Nutzer könnte den wirtschaftlichen Betrieb der Lkw in der frühen Marktphase verhindern. Auch wenn die O-Infrastruktur ausgelastet ist, würde die zusätzliche Umlage etwa 10 % der Gesamtnutzerkosten darstellen. Insbesondere in der frühen Marktphase erscheint es daher ratsam, den Infrastrukturaufbau nicht den Fahrzeugen mit alternativem Antrieb anzulasten, sondern auf andere Weise zu refinanzieren – z. B. über einen CO<sub>2</sub>-Aufschlag auf die Lkw-Maut. Ein CO<sub>2</sub>-Aufschlag von 80 €/t über 10 Jahre auf der Lkw-Maut würde ausreichen, um die Investitionskosten zu refinanzieren.

Die Anfangsinvestitionen in den Aufbau der erforderlichen Energieversorgungsinfrastruktur relativieren sich im Kontext der längerfristigen volkswirtschaftlichen Kosten der Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs, da diese von den Energie- und Fahrzeugkosten wesentlich bestimmt werden und die Infrastrukturkosten nur eine nachrangige Rolle spielen.

**Abb. 3: Investitionskosten für den Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur\*\* im Kontext von Lkw-Mauteinnahmen und Investitionen in andere Infrastrukturvorhaben**



Quelle: \*durchschnittliche jährliche Maut-Einnahmen bzw. Infrastrukturinvestitionen im angegebenen Zeitraum

\*\*die ansteigenden Infrastrukturkosten pro Kilometer mit zunehmendem Netzausbau (vom Start- bis zum Endausbaunetz) begründen sich mit der unterstellten zunehmenden Leistungsfähigkeit der Infrastruktur.

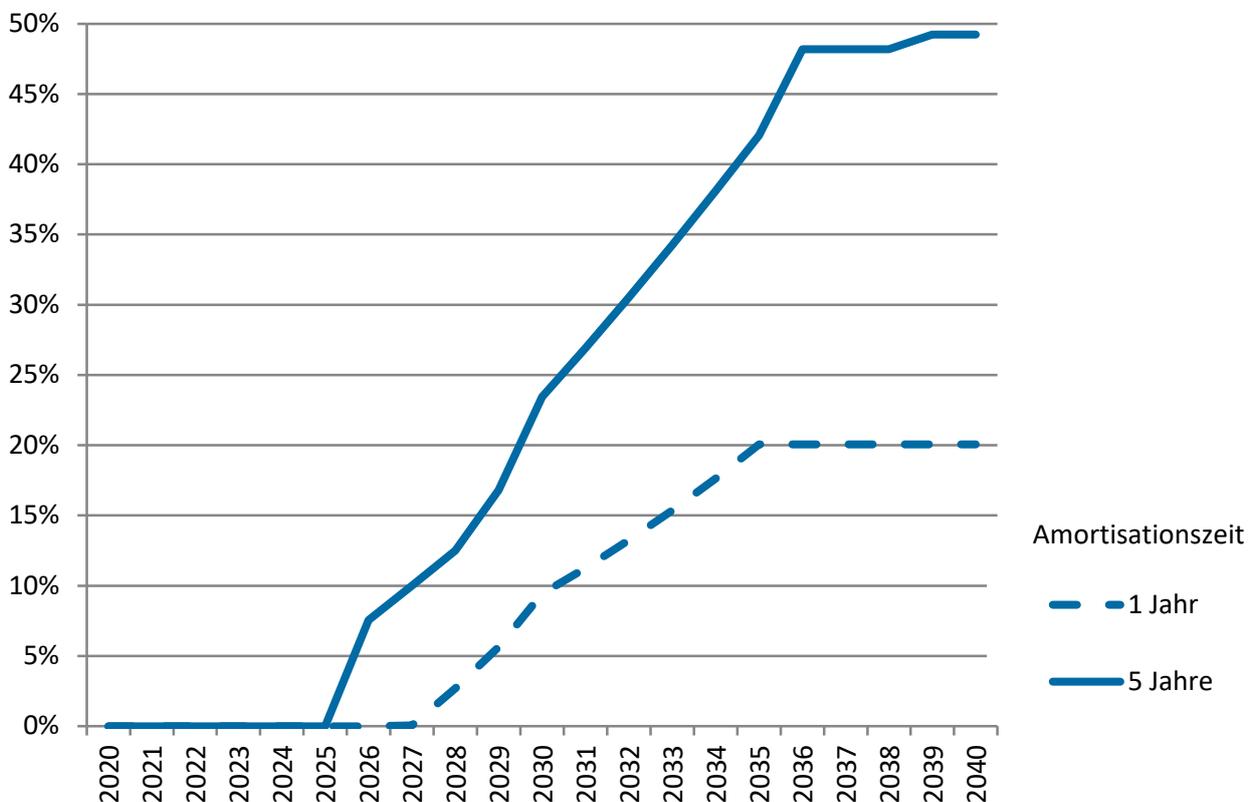
Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

**Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Rahmenbedingungen, Risikoaversion der Marktteilnehmer und kurze Vertragslaufzeiten in der Logistik können Hemmnisse für den Markterfolg von elektrischen Lkw darstellen. Durch politische Instrumente lässt sich die Planungssicherheit erhöhen.**

Die Mehrinvestitionen in elektrische Lkw können sich während der Betriebsphase innerhalb einiger Jahre amortisieren – jedenfalls dann, wenn es durch Skaleneffekte zu einer Kostendegression elektrischer Lkw kommt und bei einem günstigen Verhältnis von Dieselpreisen und Strompreisen. Die Fahrzeugverfügbarkeit und die Entwicklung der Energiepreise sind jedoch mit Unsicherheit verbunden, was ein Hemmnis für Investitionsentscheidungen darstellen kann. Politische Instrumente wie eine CO<sub>2</sub>-Spreizung der Lkw-Maut sowie ambitionierte CO<sub>2</sub>-Standards für Lkw können helfen, die Planungssicherheit für die Marktakteure (und die Politik) zu erhöhen und Anreize für Hersteller zu schaffen, effiziente Fahrzeuge zu konkurrenzfähigen Preisen anzubieten. Durch einen CO<sub>2</sub>-Aufschlag auf der Maut von 80-200 €/t würde sich für die meisten Lkw-Einsatzprofile ein stabiler TCO-Vorteil ergeben, unabhängig von moderaten Energiepreisschwankungen.

Eine Herausforderung ergibt sich daraus, dass die Anschaffungsinvestition in ein elektrisches Fahrzeug zunächst um 25 bis 50 % höher liegt als die Investition in ein vergleichbares Dieselfahrzeug. Die Bereitschaft der Marktteilnehmer, auch längere Amortisationszeiten und damit ein höheres Risiko in Kauf zu nehmen, dürfte also einen wichtigen Faktor für den Markterfolg von O-Lkw darstellen. Modellierungen im Rahmen des Projekts StratON zeigen, dass bei einer Amortisationszeit von fünf Jahren ein Potenzial von knapp 50 % der Neuzulassungen erreicht wird und in diesem Fall nahezu alle auf dem Oberleitungsnetz fahrenden Fahrzeuge wirtschaftlich als O-Lkw einsetzbar sind. Wird der Amortisierungszeitraum auf ein Jahr gesenkt, weisen nur etwa halb so viele elektrische Lkw einen TCO-Vorteil gegenüber dem Dieselfahrzeug auf. Vor allem in der frühen Marktphase, in welcher das Oberleitungs-Netz noch nicht stark ausgebaut ist, wird dieses Hemmnis relevant, da die Fahrzeuge wenig flexibel eingesetzt werden können und andererseits typischerweise Vertragslaufzeiten in der Logistik deutlich kürzer sind als 5 Jahre.

**Abb. 4: Entwicklung der Neuzulassungen von O-Lkw in Abhängigkeit des Amortisationszeitraums**



Quelle: Eigene Darstellung

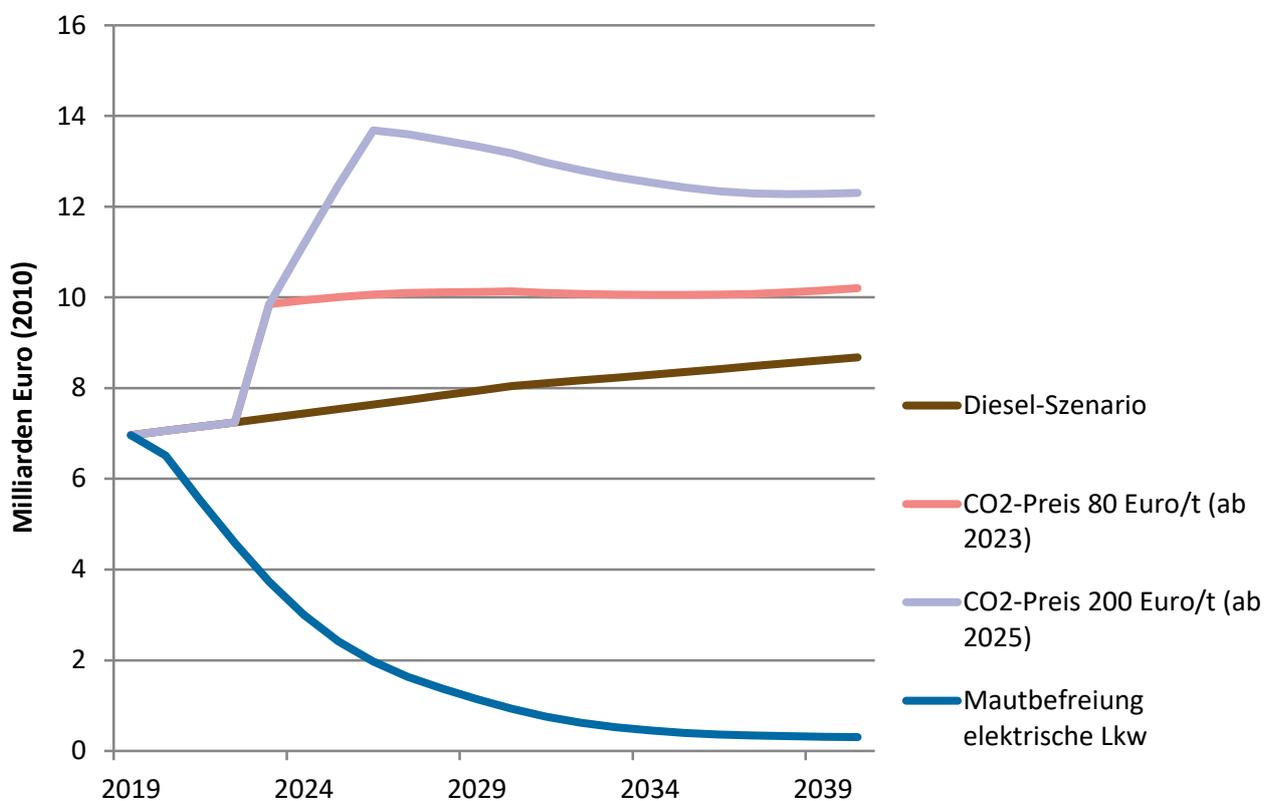
### **Ein zielgenaues politisches Instrument für die Förderung des Markthochlaufs von O-Lkw ist die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Aufschlags auf die Lkw-Maut.**

Derzeit sind elektrische und LNG-Lkw von der Lkw-Maut befreit, und die Anschaffung solcher Fahrzeuge wird zudem über Förderprogramme unterstützt sowie durch Energiesteuerermäßigung gefördert. Da LNG-Lkw allerdings nicht im erforderlichen Maße zur THG-Minderung beitragen, sollte deren Förderung über Lkw-Maut und Förderprogramme daher baldmöglichst auslaufen und die bis 2026 geltende Steuererleichterung auf Erdgas nicht verlängert werden, um die frei werdenden Mittel auf die strategischen Optionen zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs zu konzentrieren.

Förderprogramme für die Fahrzeuganschaffung bergen generell die Gefahr von hohen Mitnahmeeffekten (bei den Fahrzeugherstellern), sind mit hohen Förderkosten verbunden und wirken zudem nicht zielgenau, da es keinen Bezug der Förderung zur tatsächlichen elektrischen Fahrleistung gibt. Sie sollten daher nur in einer frühen Marktphase eingesetzt werden und baldmöglichst durch zielgenauere Instrumente ersetzt werden.

Ein solches Instrument ist ein CO<sub>2</sub>-Aufschlag auf die Lkw-Maut. Die Lkw-Maut kann als zentraler Stellhebel zur Förderung von CO<sub>2</sub>-armen Antrieben im Straßengüterverkehr dienen. Die Maut hat einen hohen Anteil an den Gesamtkosten und damit einen wesentlichen Einfluss auf die Kaufentscheidungen der Nutzer.<sup>1</sup> Zudem wirkt die Lkw-Maut direkt auf die Inlandsfahrleistung und damit auf die relevante Größe in Bezug auf die Absenkung der Treibhausgasemissionen.

**Abb. 5: Entwicklung der Lkw-Maut-Einnahmen in den Szenarien mit unterschiedlicher Mautausgestaltung**



Quelle: Eigene Darstellung. ZEV = Zero Emission Vehicle (Nullemissionsfahrzeuge)

Ein CO<sub>2</sub>-Aufschlag von 200 €/t auf der Lkw-Maut würde bei einem typischen Lkw-Fahrprofil im Straßengüterfernverkehr<sup>2</sup> über 5 Jahre Mehrkosten von über 80 Tsd. € verursachen. Damit ließen sich die höheren Anschaffungskosten eines Oberleitungs-Lkw gegenüber einem Dieselfahrzeug (in 2025 rund 30-50 Tsd. €) also bereits deutlich überkompensieren. Ein solcher Aufschlag wäre im Gegensatz z. B. zur unsicheren Ölpreisentwicklung als fixer Kostenbestandteil kalkulierbar und würde so die Planungssicherheit beim Fahrzeugkauf erhöhen. Optimalerweise sollte der CO<sub>2</sub>-Aufschlag nicht

<sup>1</sup> Anschaulich beobachten ließ sich das in der Vergangenheit daran, dass aufgrund der Differenzierung der Lkw-Maut nach Schadstoffklassen die Flotte zügig auf schadstoffarme Lkw umgestellt wurde.

<sup>2</sup> 120.000 km Fahrleistung, 5 Jahre Nutzungsdauer, 700 g CO<sub>2</sub>/km

in Abhängigkeit vom Fahrzeug erhoben werden (wie es im derzeitigen System der Fall ist), sondern von den tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. der tatsächlichen verbrennungsmotorischen Fahrleistung abhängen.

Eine vollständige Mautbefreiung von CO<sub>2</sub>-freien Lkw stellt keine langfristig tragfähige Lösung dar, da auch CO<sub>2</sub>-freie Lkw hohe Infrastrukturkosten verursachen und die Finanzierung der Straßeninfrastruktur sichergestellt werden sollte. Zudem würde eine Mautbefreiung mittelfristig zu sinkenden Transportkosten im Straßengüterverkehr führen, was wiederum zu Rebound führen kann und dem Ziel entgegensteht, Verkehr von der Straße auf die Schiene zu verlagern. Daher sollte die Mautbefreiung für elektrische Lkw sukzessive auslaufen und in einen CO<sub>2</sub>-Aufschlag überführt werden.

Die modellierten Szenarien zeigen, dass sich durch die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Aufschlags von 80 €/t die Anzahl der O-HEV im Markt und die elektrische Fahrleistung des O-Lkw-Bestands im Jahr 2030 unter den getroffenen Annahmen nahezu verdoppeln lassen.

### **Für Oberleitungs-Lkw sind neue Geschäfts-, Abrechnungs- und Finanzierungsmodelle erforderlich – richtig eingesetzt, können diese den Umstieg spürbar erleichtern.**

Der Aufbau einer Oberleitungs-Infrastruktur folgt einem Lebenszyklusmodell. Die Vielzahl der dabei wahrzunehmenden Aufgaben eröffnet verschiedene Möglichkeiten einer Aufgabenteilung zwischen Staat und Privatwirtschaft. Die zeitlich befristete Privatisierung von Teilaufgaben (Planung, Bau, Betrieb, Abrechnung) über Öffentlich-Private Partnerschaften (ÖPP), wie sie im Fernstraßenbau typisch sind, ist dabei nur eine Option. Denkbar ist es z. B. auch, die Oberleitungsinfrastruktur komplett in private Hand zu legen, wie es heute bei den Tankstellen entlang der Autobahnen üblich ist, und dem Staat nur eine Aufsichts- und Regulierungsfunktion zu übertragen.

Sobald Unternehmen der Privatwirtschaft eingebunden werden, ist ein Vergütungsmodell erforderlich, das Anreize für eine effiziente Aufgabenerfüllung setzt. Vor diesem Hintergrund sind rein leistungsorientierte Vergütungsmodelle zu vermeiden. In einem „Verfügbarkeitsmodell“ hingegen ergibt sich der Vergütungsanspruch aus der betriebsbereiten Bereitstellung der Infrastruktur. Das Mengenrisiko liegt hier in der Regel beim Staat, insofern keine nutzungsorientierten Vergütungskomponenten Teil der Vereinbarung sind.

Für die Abrechnung der Infrastrukturnutzung und des Strombezugs zwischen Infrastrukturbetreiber und Nutzern (d. h. den O-Lkw-Betreibern) stehen verschiedene Modelle zur Verfügung, die von einer exakten Strommessung auf dem Fahrzeug bis hin zu einer Pauschalierung (z. B. durch Einschluss in die Lkw-Maut) reichen, wobei in letztgenanntem Fall sogar Nicht-Nutzer in die Finanzierung der Oberleitungsinfrastruktur und des dort bereitgestellten Stroms eingebunden werden könnten. Für die Nutzer scheint vor allem entscheidend, dass der Aufwand für den Strombezug und die Abrechnung nicht höher ist als beim Tanken von Kraftstoff. Im Projekt StratON hat sich in Fachgesprächen auf der Nutzerseite eine tendenzielle Bevorzugung derartiger einfacher Pauschalabrechnungen gezeigt, während die Energiewirtschaft stärker zu exakten Abrechnungen tendiert. Eine exakte Abrechnung könnte langfristig Anreize für den Einsatz energieeffizienter Fahrzeuge setzen.

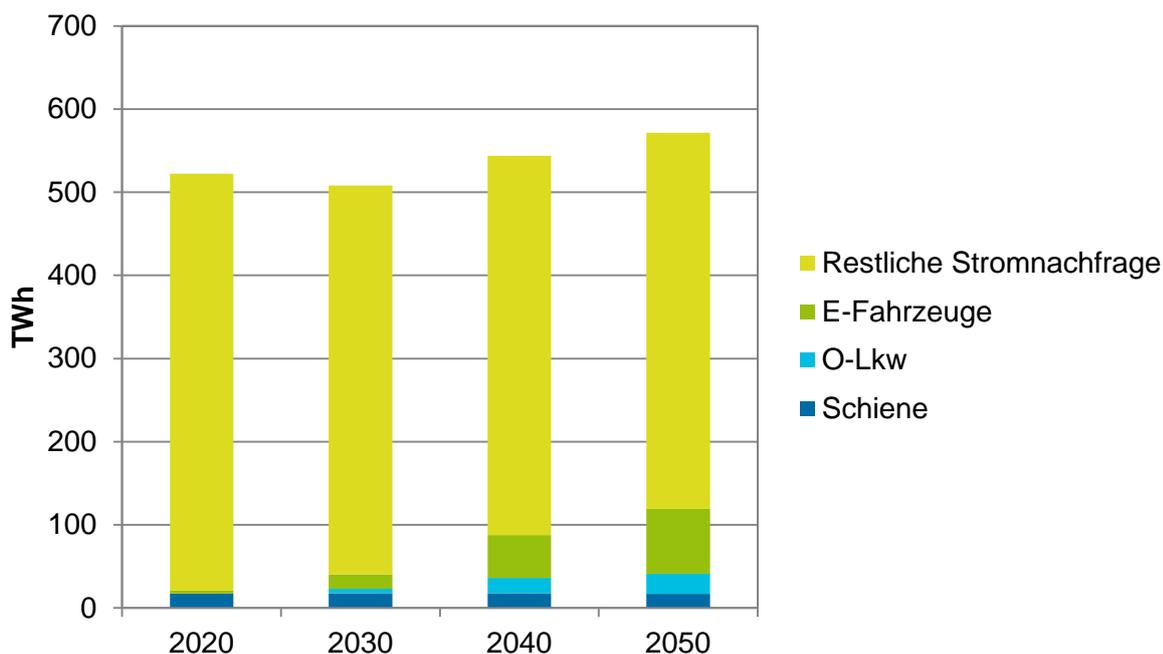
### **Der zusätzliche Strombedarf durch O-Lkw ist im Vergleich zur Gesamtstromnachfrage und im Vergleich zur zusätzlichen Stromnachfrage durch E-Pkw niedrig.**

Der Fahrstrombedarf der O-Lkw im Jahr 2050 macht in den untersuchten Szenarien selbst bei einer spürbaren Marktdurchdringung mit ca. 25 TWh/a im Jahr 2050 nur einen kleinen Anteil (etwa 5 %) des gesamten nationalen Strombedarfs aus. Elektrische Pkw könnten mit einem Anteil von mehr als 11 % bis zum Jahr 2050 eine mehr als doppelt so große Bedeutung für die Gesamtstromnachfrage haben. Über das gesamte Jahr betrachtet und bezogen auf die Gesamtstromerzeugung des

kompletten Landes sind die Auswirkungen von O-Lkw auf die Stromerzeugung sowie auf die Gesamtemissionen des Stromsektors daher vergleichsweise gering.

Um eine CO<sub>2</sub>-neutrale Bereitstellung des Fahrstroms für den Betrieb der O-Lkw sicherzustellen, ist ein zusätzlicher Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung erforderlich. Die Ergebnisse der Strommarktmodellierung zeigen, dass, wenn dieser zusätzliche Ausbau nicht stattfindet, die zusätzliche Stromnachfrage im Jahr 2050 zu einem kleinen Teil durch verstärkte Auslastung fossiler Kraftwerke und zum weitaus überwiegenden Teil durch zusätzliche Stromimporte aus benachbarten Ländern gedeckt wird.

**Abb. 6: Stromnachfrage von O-Lkw und Gesamtstromnachfrage**



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

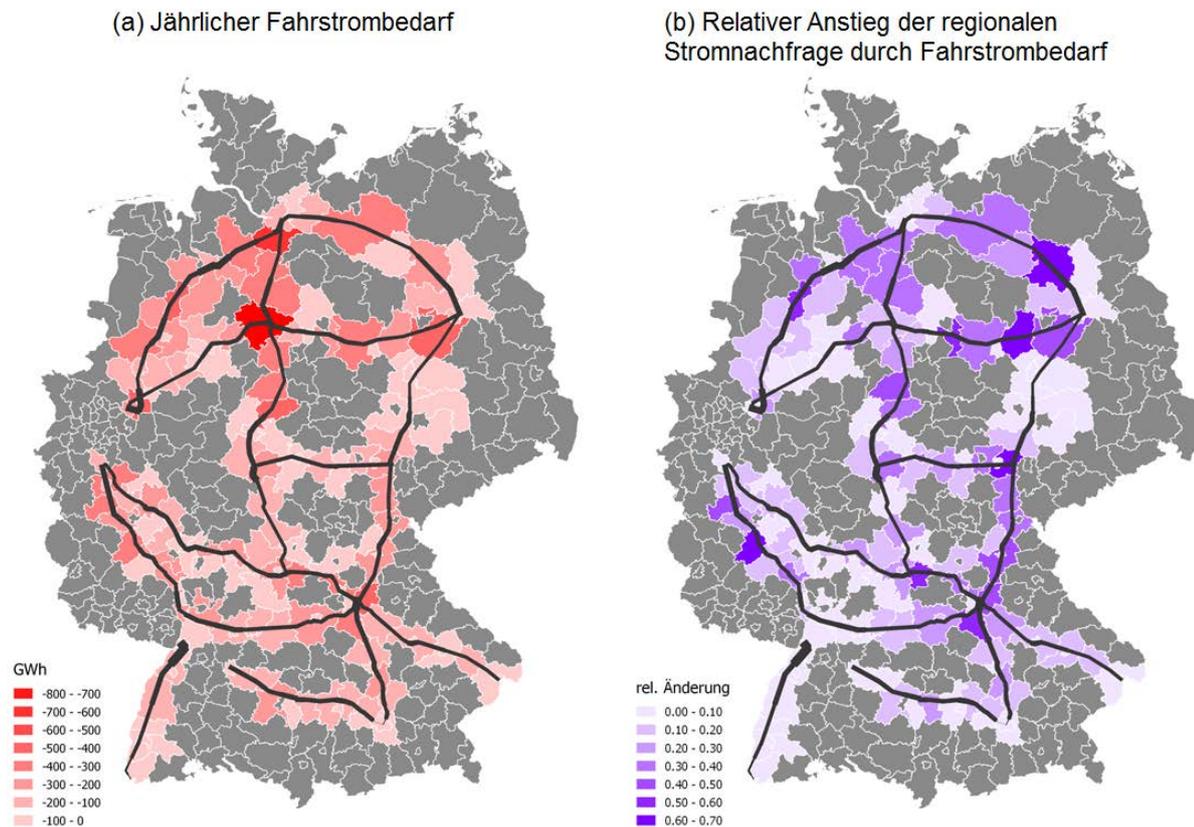
**Die regionale Lastnachfrage kann durch die Elektrifizierung von Autobahnen in ländlichen Räumen spürbar ansteigen – je nach Region können sich daraus Herausforderungen, aber auch Chancen ergeben.**

Die zusätzliche Gesamtstromnachfrage durch O-Lkw ist zwar vergleichsweise gering – die Auswirkungen des zusätzlichen Fahrstrombedarfs auf regionaler Ebene können aber erheblich sein. Während bei Pkw davon auszugehen ist, dass die räumliche Verteilung des Fahrstrombedarfs relativ ähnlich zur Verteilung der übrigen Stromverbraucher ist, sind durch den Fahrstrombedarf der O-Lkw, entsprechend der Streckenführung der elektrifizierten Trassen, auch dünn besiedelte Regionen mit niedriger Stromnachfrage betroffen. In diesen Regionen können die Effekte der zusätzlichen Stromnachfrage besonders stark ausfallen. In einigen, vor allem ländlichen Kreisen könnte durch Oberleitungs-Lkw der Strombedarf um 50 % oder mehr ansteigen. Je nach den regionalen Charakteristika kann der zusätzliche Strombedarf eine Herausforderung, aber auch eine Chance sein: Falls es sich um eine ländliche Regionen mit großen Wind-Erzeugungsmengen handelt, kann die zusätzliche Stromnachfrage unter Umständen fluktuierende EE-Erzeugung integrieren und den Bedarf an Leitungen und Flexibilität vermindern – eine hinreichende Korrelation der Erzeugungs- und Lastprofile vorausgesetzt. Hinzu kommt, dass der Ausbau erneuerbarer Energieträger im Stromsystem zu einer

zunehmend inhomogenen Verteilung von Erzeugungsüberschüssen und Erzeugungsdefiziten führt. Die räumliche Verteilung hängt dabei von der gewählten EE-Ausbaustrategie ab.

Beide Effekte legen nahe, dass die unter Umständen zur Integration des Fahrstrombedarfs erforderlichen Anpassungsmaßnahmen regional sehr unterschiedlich sein werden und eine Prüfung des regionalen Kontexts auf jeden Fall angezeigt ist.

**Abb. 7: Räumliche Verteilung des Fahrstrombedarfs von O-Lkw im Jahr 2050**



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut (Umlegung auf Einzelstrecken ohne Netzergänzungen)

### **Im Vergleich zu strombasierten Kraftstoffen sind Oberleitungs-Lkw die volkswirtschaftlich deutlich günstigere Option zur Dekarbonisierung des schweren Straßengüterverkehrs.**

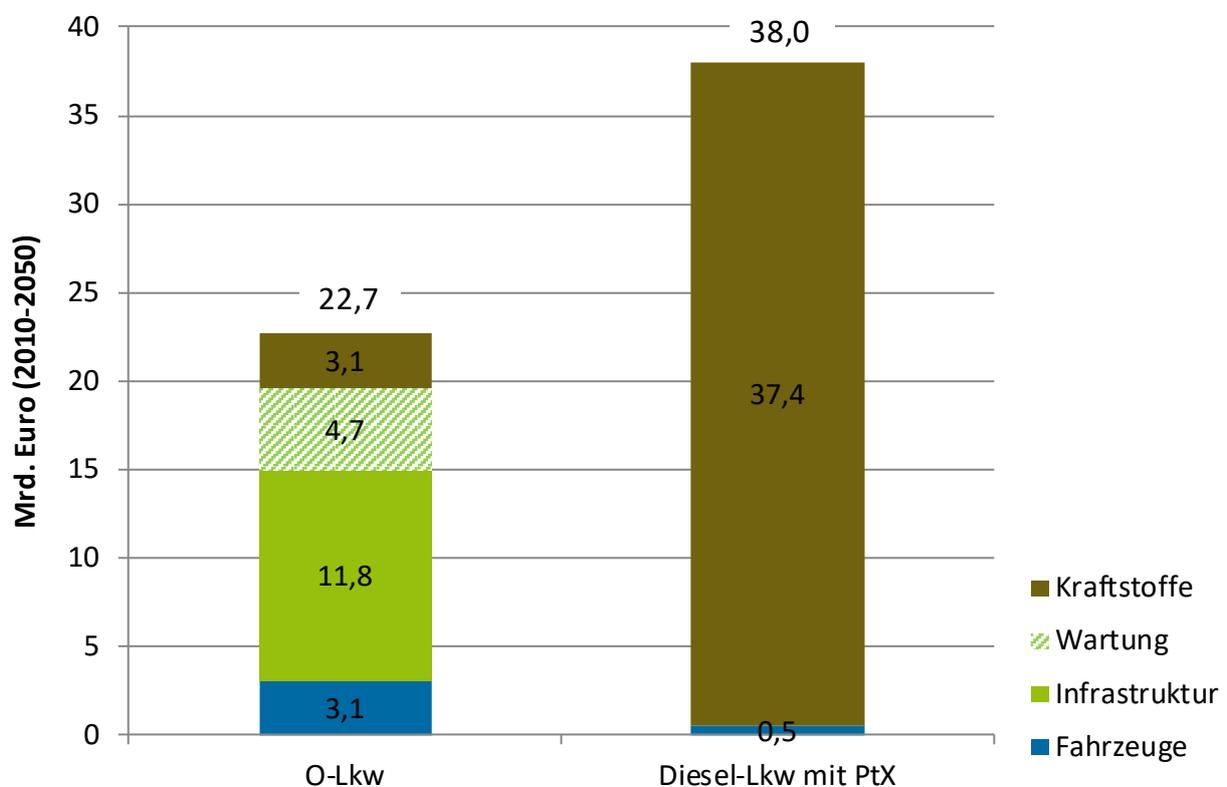
Sowohl für den Aufbau der Oberleitungs-Infrastruktur als auch für die elektrischen Fahrzeuge fallen zusätzliche Investitionskosten an. Die volkswirtschaftlichen Mehrkosten bis 2050 belaufen sich nach dem im Projekt untersuchten Ausgangsszenario M0 bis zum Jahr 2050 auf rund 23 Mrd. €, um einen elektrischen Fahranteil im Schwerlastverkehr von etwa einem Drittel zu erreichen. Demgegenüber stehen kumulierte THG-Einsparungen von rund 150 Mio. t über den gesamten Zeitraum. Das entspricht volkswirtschaftlichen Vermeidungskosten von 150 €/t CO<sub>2</sub>.

Andere Optionen zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs sind auf Basis des derzeitigen Kenntnisstandes mit deutlich höheren volkswirtschaftlichen Kosten verbunden. Um eine ähnlich hohe THG-Minderung wie durch O-Lkw durch den Einsatz strombasierter Kraftstoffe zu erreichen, sind die volkswirtschaftlichen Mehrkosten in etwa doppelt so hoch – sie liegen bei rund 250 €/t CO<sub>2</sub>. Ursache dafür sind die hohen Herstellungskosten von strombasierten Power-to-Liquid (PtL)-Kraftstoffen.

Zu ähnlichen Aussagen kommt auch der BDI in seiner Studie „Klimapfade für Deutschland“ (Gerbert et al. 2018). In dieser Studie werden sogar Vermeidungskosten von nur 60 €/t CO<sub>2</sub> für O-Lkw ermittelt (bei Aufbau einer Infrastruktur auf den meistbefahrenen 4.000 km Autobahnabschnitten). Grund für die niedrigeren Kosten ist die Annahme geringerer Investitionskosten für den Aufbau der Infrastruktur und eines höheren elektrischen Fahranteils.

Im StratON-Szenario M200, welches sich durch eine CO<sub>2</sub>-basierte Mautspreizung auszeichnet und dadurch eine höhere elektrische Fahrleistung und somit eine höhere THG-Minderung erzielt, liegen die Vermeidungskosten bei 120 €/t CO<sub>2</sub>. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist damit der Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur eine vergleichsweise kosteneffiziente Maßnahme.

**Abb. 8: Volkswirtschaftliche Kosten der Dekarbonisierung im Straßengüterverkehr: O-Lkw und strombasierte Kraftstoffe im Vergleich**



Quelle: Eigene Darstellung

## 2. Executive Summary

In Germany, road freight transport accounts for about one third of greenhouse gas emissions (GHG) from transport. The decarbonization of road freight transport is therefore of great importance for achieving climate protection goals. Since even in ambitious traffic shift scenarios to rail, more than half of freight transport continues to be by road, it is absolutely necessary to develop **alternatives to diesel trucks, which dominate the market to date**. So far, no alternative drive system to diesel trucks has been able to reach maturity and penetrate the market of heavy long-distance road haulage.

Long-distance trucks with overhead catenary (OC-trucks) have shown to be a possible solution for long-distance road freight transport in initial practical tests and were evaluated in first analyses as a promising technology option. The first pilot projects for testing the technology in public road space are currently being established. A first track was put into operation in spring 2019 near Frankfurt, Germany on the A5 motorway.

Within the framework of the research project "**StratON – Evaluation and Implementation Strategies for Overhead Catenary Heavy Duty Vehicles**" funded by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, the potential of the ERS system was analyzed in depth over the past three and a half years by the three affiliated partners Oeko-Institut e.V., Heilbronn University of Applied Sciences and Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO in cooperation with Intraplan Consult GmbH. The project was supported by experts and a project advisory board.

The project results show that the OC-truck system could significantly reduce GHG emissions from long-distance road haulage with heavy trucks. If an overhead line network is set up very rapidly, the GHG reduction contribution in 2030 can be up to 3-6 Mt (tank to wheel) or 2-4 Mt (well to wheel, i.e. including the additional emissions in the electricity sector). In the longer term, the contribution to GHG reduction will be significantly higher. The electrification of a core motorway network of around 4,300 kilometers (90 % electrified, 3,800 kilometers) covers a large volume of traffic. At around 12 billion euros, the costs of setting up the network are moderate, especially in comparison with other decarbonization options for road freight transport such as electricity-based fuels.

A mix of technologies is likely to emerge in the future due to the wide variety of requirements in the freight transport market. The promotion of alternative propulsion systems and the necessary infrastructure should concentrate on options that enable climate neutrality in the long term at the lowest possible economic cost. The external power supply via the overhead catenary is suitable for meeting the high requirements of heavy commercial vehicles in terms of performance and range as well as the resulting high energy demand. At the same time, no expensive and time-consuming energy storage in the vehicle by means of a battery or hydrogen tank is necessary.

In view of the high pressure to take action to reduce GHG emissions, technologies close to the market, such as OC-trucks, should be tested on a large scale at an early stage in order to gain important practical experience. This does not necessarily imply an exclusive commitment to this technology.

In order to ensure the market success of promising technologies such as the OC-truck, considerably changed framework conditions are necessary which require government initiative.

- **Provide a reliable political framework:** The introduction of OC-trucks in road freight transport is associated with major changes and relevant investments for all market players. The required changes in the behavior of the players require reliable framework conditions

with regard to the political goals. A clear and long-term orientation of the political instruments in road freight transport towards the reduction of GHG emissions is therefore necessary.

- **Guarantee infrastructure development:** An available overhead line infrastructure is a basic prerequisite for the use of OC-trucks. However, the investment risks for development and operation of the infrastructure are too high for a purely private company. Similar to the development of other energy supply infrastructures (e.g. electricity grid), this requires the involvement of the state and a reliable development plan. A state-guaranteed infrastructure expansion plan provides a clear framework for the range of applications of the vehicles and thus creates planning security for the vehicle operators.
- **Set framework conditions for the supply side:** The market success of the technology depends on the availability of market-ready and economically competitive vehicles. Regarding OC-trucks no further technological "breakthroughs" are needed, but manufacturers must be given incentives to produce them. For example, ambitious CO<sub>2</sub> standards for trucks can stimulate the demand for OC-trucks and other alternative technologies.
- **Set framework conditions for the demand side:** Vehicle operators in the freight transport market will only switch to OC-trucks if they can be operated economically and are technically reliable. The operating cost advantage of OC-trucks can be ensured by a CO<sub>2</sub>-based toll spreading.
- **Gain practical experience:** The OC-truck system already has a high degree of technological maturity and is being tested in pilot projects in public road space. In order to ensure reliable regular operation in the future, however, larger pilot projects close to the market are necessary in the next step.
- **Ensure international cooperation:** Road freight transport is characterized by a high degree of international interdependence. The technical compatibility of the systems across borders is therefore of central importance. International cooperation in technology development and testing should be pursued in a timely manner and important interfaces internationally standardized at an early stage.

### **Overhead catenary trucks can already achieve a significant climatic advantage over diesel trucks in 2025, even when using the German electricity mix.**

The required drastic reduction of greenhouse gas emissions from transport is the main political driving force for the discussion of alternative drive systems for long-distance road freight transport compared to the established diesel truck technology.

Comparing drive technologies, the electric vehicle variants (OC-trucks and BEV) show the highest greenhouse gas reduction potential up to the year 2030. Compared to today's diesel long-distance trucks, OC-trucks can almost halve the greenhouse gas emissions caused by their operation by the year 2025 (minus 46 %) and achieve a reduction of 60 % by 2030, taking into account the recently decided phase-out of coal-based power generation. Purely battery electric trucks (BEV) can achieve even slightly higher emission reductions in operation, but with a higher resource requirement on the vehicle side and tendentially higher emissions in the manufacturing phase. Fuel cell vehicles (FCEV) currently have more than twice as high greenhouse gas emissions as diesel trucks when producing hydrogen on the basis of the German electricity mix due to their lower overall energy efficiency. In 2025, despite the phase-out of coal-based power generation and a further increase in the share of renewables in electricity generation, FCEV will only have a slight emission advantage of around 10 % compared with today's diesel trucks. The reduction potential of fuel cell trucks by 2030 based on the German electricity mix is around 30 %, which is within the maximum technical greenhouse

gas reduction potential of diesel trucks. Trucks powered by liquefied natural gas (LNG) can achieve a 16 % reduction in GHG emissions from well to wheel (WTW) in the short term (in 2025) compared with diesel trucks. However, LNG trucks are not a long-term option for decarbonization, in contrast to the electrical alternatives, where the GHG reduction contribution increases significantly with the increasing share of renewable energies in the electricity sector. An increasing use of synthetic methane on the basis of electricity from renewable energies would be conceivable, but, according to current knowledge, would also entail very high fuel costs beyond 2030 and would not have a significant advantage over the use of synthetic fuels in diesel trucks.

Overall, the electric vehicle variants (BEV, OC-BEV) have the highest energy efficiency among the drive alternatives mentioned. Their total energy requirement is about half that of diesel and LNG vehicles. Fuel cell vehicles are also more efficient in operation (about 15 to 20 %) than conventional trucks. Hydrogen production, however, leads to a two to three times higher total energy demand per kilometer travelled compared to direct electricity use. With the same amount of electricity used from renewable energies, vehicles that use electricity directly can therefore generate the greatest reduction in GHG emissions.

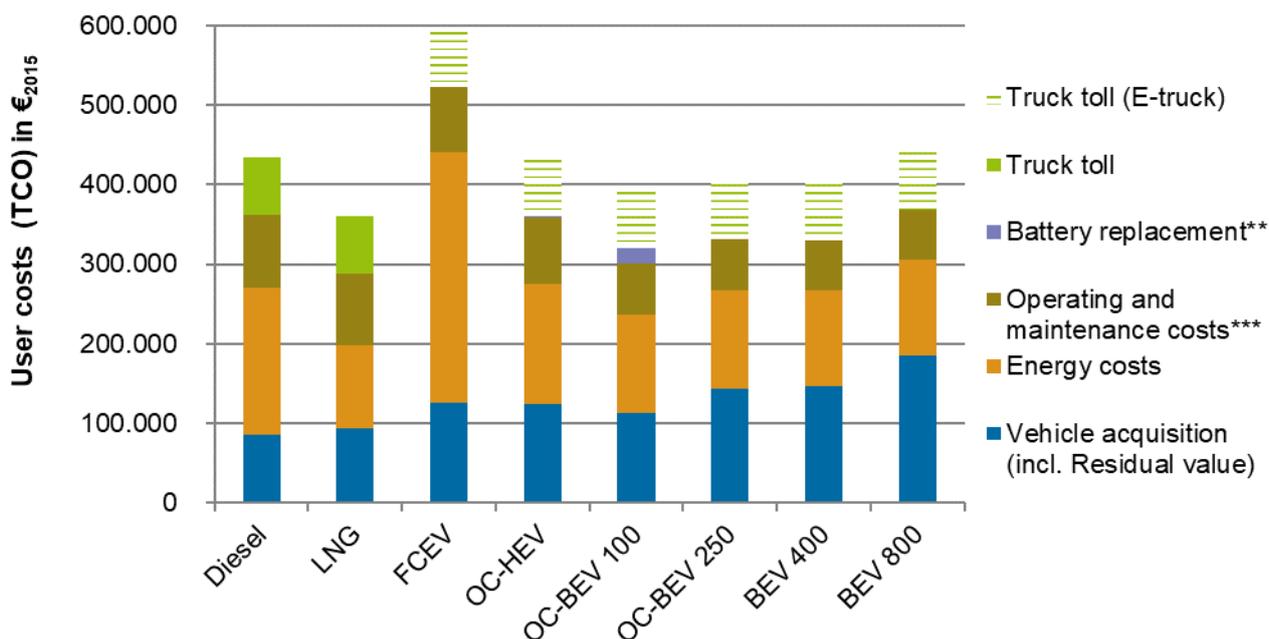
**Overhead catenary trucks can already achieve lower user costs than comparable diesel vehicles in 2025 over a 5-year utilization period.**

The economical advantageous operation of trucks for long-distance road haulage is a key prerequisite for their market success. The comparative analysis of the user costs (TCO) for different drive concepts shows for a typical service life of a semi-trailer tractor in long-distance traffic of 5 years that, under certain framework conditions, OC-trucks can achieve cost advantages over diesel vehicles already in 2025.

Mileage-dependent costs have the biggest influence on the TCO of alternative drive systems, i.e. energy costs, road tolls and maintenance costs. The residual value of the vehicle and the battery price development – except for vehicles with very large traction batteries – have a less significant influence on the economic efficiency.

In the most advantageous vehicle configuration as an OC-truck with a comparatively small traction battery with a range of 100 kilometers (OC-BEV 100), the additional costs of 25 to 50 % compared to a diesel truck can be amortized in operation after only a few years. OC-trucks with conventional hybrid drive (OC-HEV) are at least at the cost level of diesel trucks with high electric driving performance over a five-year period, and even more so with a very high proportion of electric driving performance.

Even purely electric long-distance trucks with a range of 400 and 800 km (BEV 400/800) could reach the economic efficiency threshold by 2025. Fuel cell vehicles (FCEV) continue to have significantly higher costs. The main causes are the high supply costs for hydrogen by electrolysis and the higher energy consumption compared to direct use of electricity. LNG-trucks will have the lowest TCO in 2025, based on the assumption that the price of natural gas on the world market will not rise significantly from today's level.

**Figure 1: Drive-dependent costs of semitrailer tractors in the year 2025\***

\*Costs excl. VAT, 5 years-service life, 120,000 km p.a. OC-truck with 50 % share of travel under overhead catenary

FCEV: Fuel cell truck, OC-HEV: Catenary hybrid truck with combustion engine, OC-BEV 100: Catenary battery electric truck with 100 km electrical range; BEV 400/800: Battery electric truck with 400/800 km electrical range

\*\* Replacement of the battery when maximum number of cycles is reached

\*\*\* Maintenance, repair, lubricants, AdBlue

Source: own illustration Oeko-Institut (Kühnel et al. 2018)

### Feeder routes to logistic hubs are particularly suitable for early electrification and can generate relevant traffic volumes.

More than 65 % of long-distance truck traffic on the motorway takes place on a core network comprising around one third of the German motorway network. This core network comprises the single-digit A1 to A9 motorways and a length of approximately 4,000 km. It allows most of the major economic centers in Germany to be networked with edge lengths of approx. 200 to 250 km. Nevertheless, some of the individual routes differ considerably, for example in terms of the number of vehicles, the homogeneity of the traffic flow ("corridor character") and parallel rail freight traffic.

The length of the pre- and post-haul routes and the vehicle configuration influence, how many OC-trucks can be operated advantageously: the further the vehicle can move away from the overhead line due to the individual vehicle configuration (battery size or hybridization) and the existing infrastructure (recharging option at the destination), the greater the potential. The denser the network, the lower the importance of the range of the vehicles after leaving the overhead line.

As a result of the analysis, 17 routes can be identified, that are characterized by a particularly high bundling effect in long-distance freight transport. These routes are to be tested primarily for electrification.

The highest potential for OC-trucks is shown by the feeder routes to the major logistical hubs, in particular the feeder routes to the port of Hamburg (A1, A7), but also to the conurbations of

Rhine/Ruhr and Hanover/Braunschweig/Wolfsburg as well as to Berlin and the Rhine-Main area. There, many pre- and post-haul routes are relatively short, so that even with small batteries, many long-distance customers along the overhead line can already benefit.

**The core motorway network of around 4,300 km in length is ideal for the construction of an overhead line infrastructure. By increasingly connecting individual sections, this goal can be achieved in different ways.**

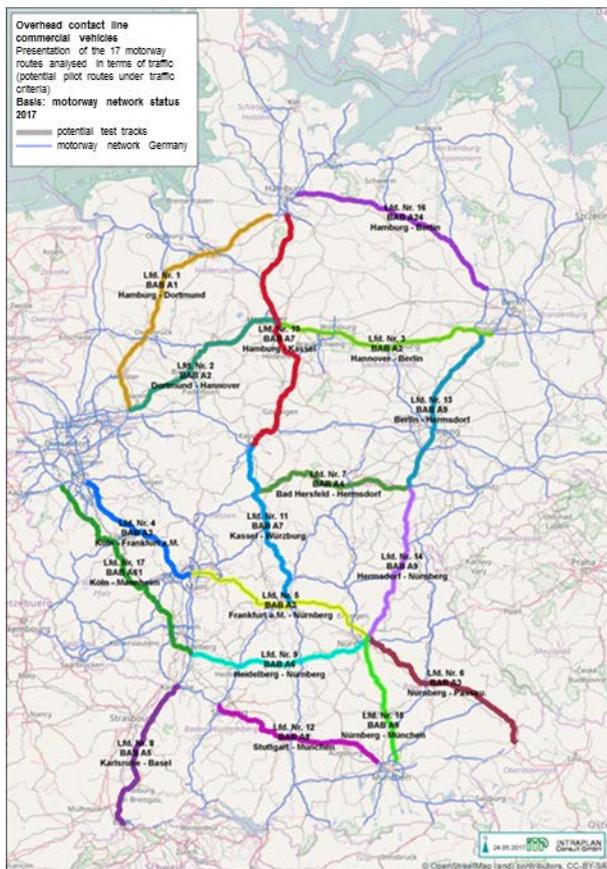
By linking the 17 selection routes with reasonable gap closures and with connecting routes abroad, it is possible to define a 4,300 km long overhead line core network for Germany, which is characterized by a particularly good cost-benefit ratio. This network does not have to be built and commissioned at the same time. Rather, a step-by-step commissioning is possible and useful. In addition, the network can initially only be electrified on some sections and successively extended.

Since the 17 selection routes differ in the expected electrical mileage, the decision on the expansion sequence is of great importance. Based on the traffic volumes, it seems possible to start building routes at various points, e.g. at the seaports and in the Rhine/Main region. These routes can later be combined to form a network. It is particularly important that technical interoperability between all lines is fully guaranteed when starting with initially separate sections.

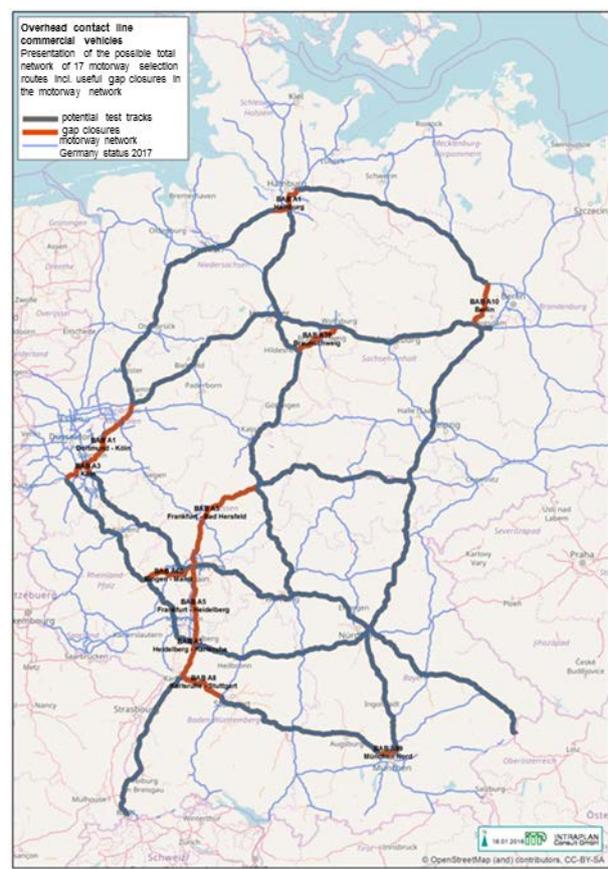
The analysis showed, that the development of a first network section around Hannover (A2, A7, A39) can cover a greater electrical mileage than a corridor of comparable length between Hamburg and Munich. Thus, the development of regional sub-networks with comparable electrified line lengths could lead to a faster increase of electrical mileage.

The ELISA test section on the A5 between the Langen/Mörfelden and Weiterstadt junctions was not included in the first 17 selected sections, but this is not to be seen as a lack of suitability of this section for electrification. The A5 was recognized as an important gap closure in the formation of a possible overall network of electrified motorways (between Bad Hersfeld - Frankfurt - Heidelberg and Karlsruhe) and was taken into account accordingly in the traffic analyses (see Figure 2, right). The traffic analyses of the core network point to the high traffic volume and thus the particular importance of this section for long-distance traffic.

**Figure 1: Overhead catenary infrastructure in Germany: selection routes (left) and core network with gap closures (right)**



Source: own Illustration



Source: own Illustration

**If the core network is set up by 2035, around one third of the mileage of trucks and semi-trailers could be electrified by 2040. Greenhouse gas (GHG) emissions from road freight transport in Germany could then be reduced by 9-12 million tons of CO<sub>2</sub> in 2040. This corresponds to a 25 % reduction in GHG emissions.**

Provided that the economic operation of OC-trucks is ensured by appropriate political instruments and the core overhead line network of 4,300 km is built up by 2035 (70 % electrified; 3,000 km overhead line), around one third of the nationwide mileage of heavy trucks in Germany can be electrified in 2040 by long-distance traffic alone (>100 km on the network). This will save GHG emissions of 9-12 million tons in 2040 (tank-to-wheel, excluding additional emissions in the electricity sector). By 2050, the GHG reduction will rise to 10-13 million tons in the scenarios examined. In addition, there is potential from traffic with a low proportion on the overhead catenary network, as well as further potential in the case of cross-border availability of an overhead catenary infrastructure.

**Assuming that 70 % of the core network of 4,300 kilometers can already be electrified by 2030, a relevant GHG reduction potential of around 2-4 million tons (well-to-wheel) and 3-6 million tons (tank-to-wheel) could be achieved as early as 2030.**

In general, the holding times of vehicles in road freight transport are significantly shorter than in passenger transport and the conversion of the vehicle fleet to alternative drive concepts can

therefore be carried out more quickly. In the initial phase, certain suitable services (e.g. shuttle services) can also be electrified with comparatively little network expansion. However, in order to make OC-trucks attractive for a relevant proportion of the traffic and users, and to exploit corresponding GHG reduction potentials, the core network must be set up as quickly as possible.

**The construction of the overhead catenary infrastructure is associated with relatively low investments. However, in the early market phase a cost allocation to the users would prevent an economical operation of vehicles.**

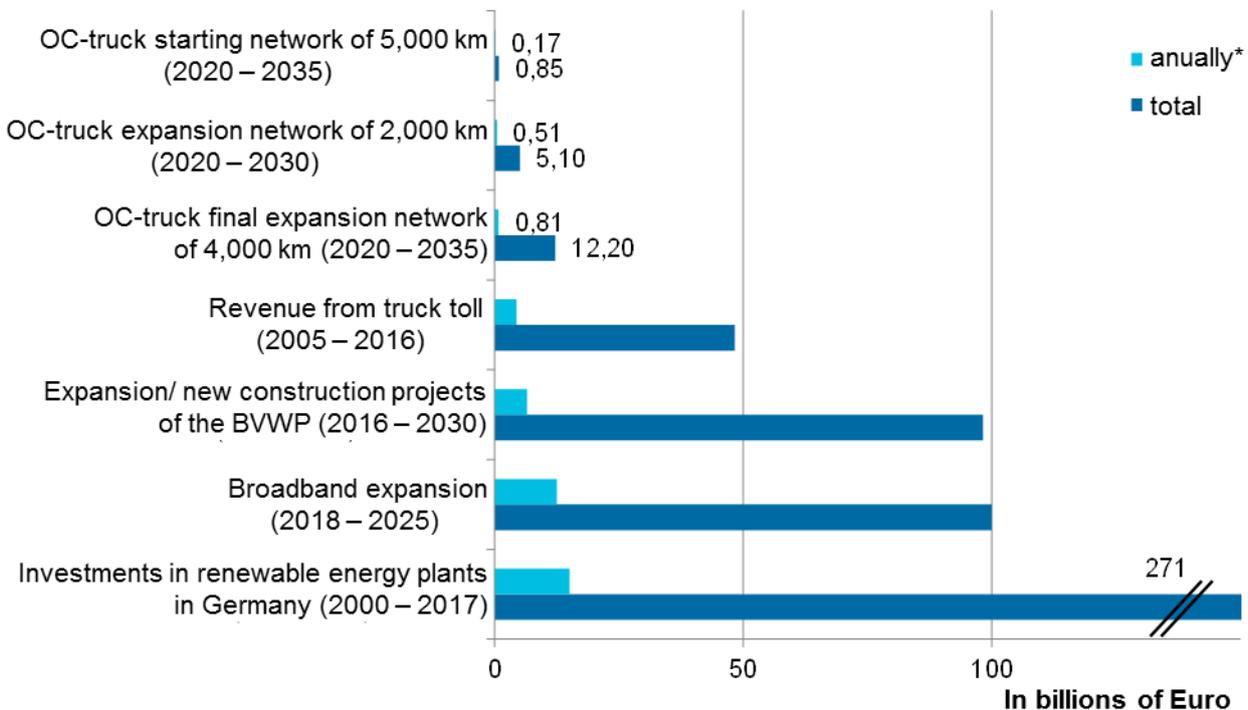
The development and availability of the necessary energy supply infrastructure is of central importance for the market success of an alternative drive technology in road freight transport. The early market phase is particularly critical: On the one hand, low infrastructure density reduces the attractiveness of the alternative energy supply system and, on the other hand, initially low capacity utilization has a negative impact on the economic operation of the infrastructure.

Compared to other energy supply systems under consideration (LNG, hydrogen, station-based charging), the construction of an overhead line infrastructure is likely to involve the highest investment costs per vehicle. Compared to the overhead line system, the infrastructure costs for an initial network designed for a comparable number of vehicles amount to about one tenth of the costs for LNG, about one third for hydrogen and just under two thirds for high-performance charging. Compared to other investments in future technologies, however, the investment requirement for the construction of an overhead line infrastructure is moderate. A rapid expansion of the network by 2035 (core network electrified by 90 %) would entail average annual investment costs of around 800 million euros. For comparison, the toll extension (in force since July 2018) will increase annual toll revenues by more than 2 billion euros.

Allocating the investment costs for the construction of the overhead line infrastructure to the users could prevent an economic operation of the trucks in the early market phase. Even if the infrastructure is fully utilized, the additional costs would represent about 10 % of the total user costs. Particularly in the early market phase, it seems advisable not to charge the users. An alternative financing option could be a CO<sub>2</sub> surcharge on the truck toll. A CO<sub>2</sub> surcharge of 80 €/t over 10 years on the truck toll would be sufficient to refinance the investment costs.

The initial investments in building the necessary energy supply infrastructure become less important in the context of the longer-term economic costs of decarbonizing road freight transport. These costs are largely determined by energy and vehicle costs.

**Figure 3: Investment costs for the construction of catenary infrastructure\*\* in the context of truck toll revenues and investments in other infrastructure projects**



\*average annual toll revenue or infrastructure investment over the period indicated

\*\*The rising infrastructure costs per kilometer with increasing network expansion (from start to finish network) are due to the assumed increasing efficiency of the infrastructure.

Source: own illustration Oeko-Institut

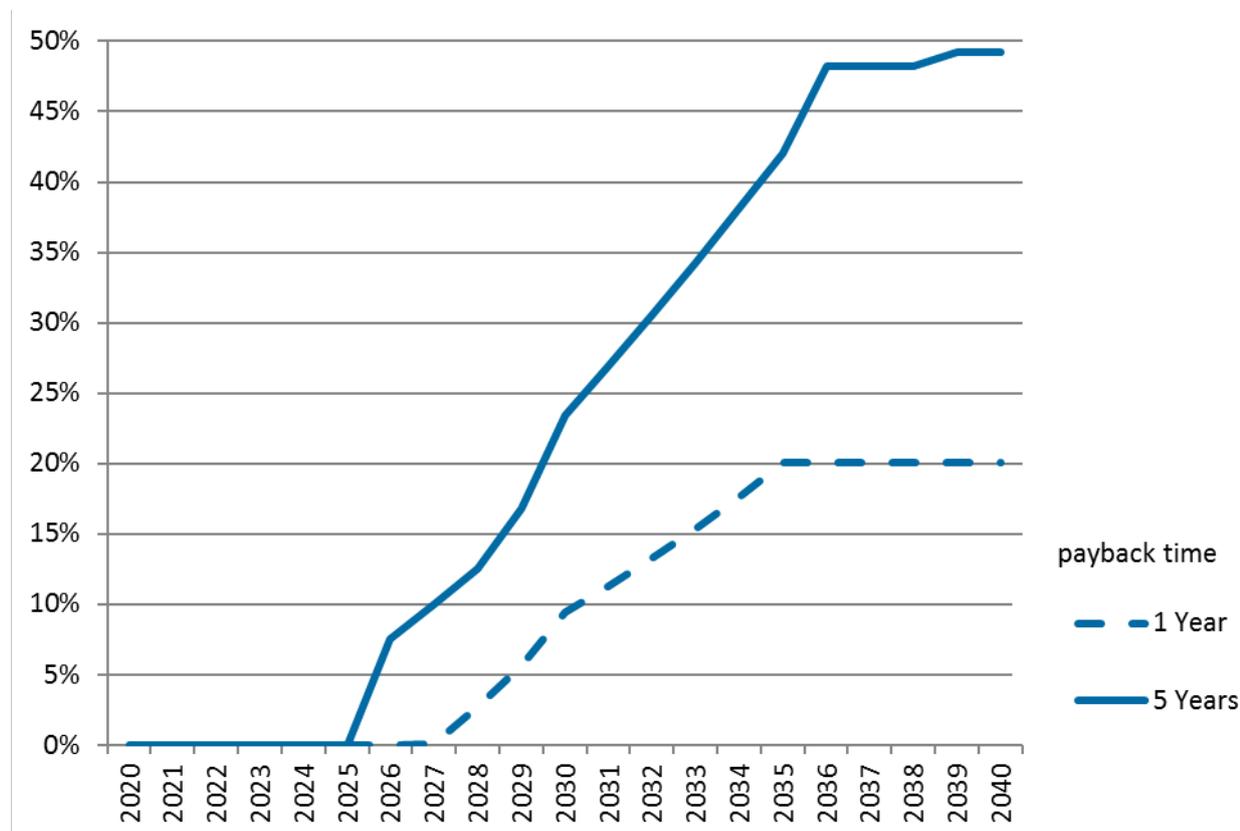
**Obstacles to the market success of electric trucks can be uncertain framework conditions, risk aversion among market participants and short contract terms in logistics. Political instruments can increase planning reliability.**

The investment in electric trucks can pay off within a few years – at least if economies of scale lead to a cost degeneration of electric trucks and if the ratio between diesel prices and electricity prices is favorable. However, vehicle availability and the development of energy prices are uncertain, which can be an obstacle to investment decisions. Policy instruments such as a CO<sub>2</sub>-based spreading of the truck toll and ambitious CO<sub>2</sub> standards for trucks can help to increase planning security for market players (and policymakers). Also, they create incentives for manufacturers to offer efficient vehicles at competitive prices. A CO<sub>2</sub> surcharge on the toll of 80-200 €/t would result in a stable TCO advantage for most truck usage profiles, irrespective of moderate energy price fluctuations.

A challenge arises from the fact that the investment costs of electric vehicles are 25 to 50 % higher compared to a diesel vehicle. Therefore, an important factor for the market success of OC-trucks is the willingness of market participants to accept a longer payback period. Analyses carried out in the StratON project show that with a payback period of five years a potential of almost 50 % of new registrations is achieved, and in this case almost all vehicles running on the overhead line network can be used economically as OC-trucks. If the payback period is reduced to one year, only about half as many electric trucks have a TCO advantage over diesel vehicles. This obstacle is particularly relevant in the early market phase. At this time the overhead line network is not yet strongly

developed, and the vehicles cannot be used flexibly. Also contract periods in logistics are typically considerably shorter than 5 years.

**Figure 4: Development of new registrations of OC-trucks as a function of the amortization period**



Source: own illustration Oeko Institut

### The introduction of a CO<sub>2</sub> surcharge on the truck toll is a precisely targeted political instrument for promoting OC-trucks.

At present, electric and LNG trucks are exempt from the truck toll. Also, the purchase is supported by subsidy programs and a reduction of the energy tax. However, since LNG trucks do not sufficiently contribute to GHG reduction, support programs should therefore be phased out as soon as possible. Also, the tax relief on natural gas until 2026 should not be extended. The funds becoming available should be spent on the strategic options for the electrification of road freight transport.

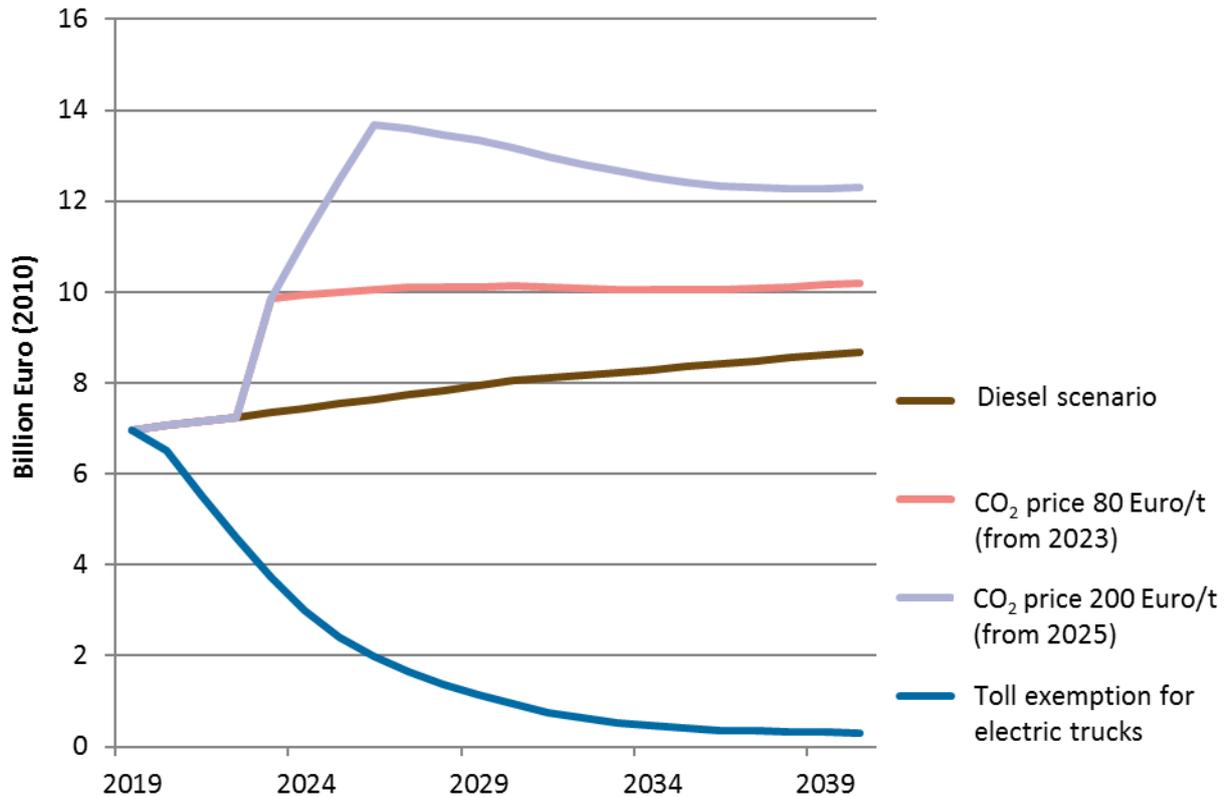
Support programs for the purchase of vehicles generally involve the risk of high windfall effects (by vehicle manufacturers), are associated with high costs, and are also not targeted as there is no relationship to the actual electrical mileage. They should therefore only be used at an early stage in the market and be replaced as soon as possible by more targeted instruments.

One such instrument is a CO<sub>2</sub> surcharge on the truck toll. The toll accounts for a large proportion of the TCO and thus has a significant influence on the purchasing decisions of users<sup>3</sup>. In addition, the

<sup>3</sup> In the past, this was clearly demonstrated by the quick conversion to low-emission trucks due to the differentiation of the truck toll according to air pollutant classes.

toll has a direct effect on the nationwide mileage and thus on the reduction of greenhouse gas emissions.

**Figure 2: Development of truck toll revenues in the scenarios with different toll designs**



Source: own illustration Öko Institut

A CO<sub>2</sub> surcharge of 200 €/t on the truck toll would cause additional costs of more than 80 thousand Euro for a typical truck driving profile in long-distance road haulage<sup>4</sup> over 5 years. Thus, the higher investment costs of an OC-truck compared to a diesel vehicle (in 2025 approx. 30-50 thousand euros) could already be more than compensated. This fixed surcharge would increase the planning reliability when purchasing a vehicle. Ideally, the CO<sub>2</sub> surcharge should not depend on the vehicle (as currently the case), but rather on the actual CO<sub>2</sub> emissions or the non-electric mileage.

A complete toll exemption for CO<sub>2</sub>-free trucks is not a viable long-term solution, as CO<sub>2</sub>-free trucks also cause high infrastructure costs and the financing of the road infrastructure should be ensured. In addition, an exemption from tolls in the medium term would lead to lower transport costs in road freight transport. In turn this could lead to a rebound effect and counteract the goal of shifting traffic from road to rail. The toll exemption for electric trucks should therefore be phased out gradually and converted into a CO<sub>2</sub> surcharge.

The modelled scenarios show that the introduction of a CO<sub>2</sub> surcharge of 80 €/t could almost double the number of OC-trucks and the electric mileage in 2030 under the assumptions made.

<sup>4</sup> 120,000 km mileage, 5 years-service life, 700 g CO<sub>2</sub>/km

**New business, billing and financing models are required for overhead catenary trucks – correctly implemented, these can make the switch easier.**

The development of an overhead line infrastructure follows a life cycle model. The large number of tasks to be performed opens up various possibilities for the division of tasks between the public and the private sector. The temporary privatization of tasks (planning, construction, operation, invoicing) via public-private partnerships (PPP), as typical in highway construction, is only one option. It is also conceivable, for example, to place the entire overhead line infrastructure in private hands, as it is customary today for petrol stations along motorways. In this case, the public sector only has a supervisory and regulatory function.

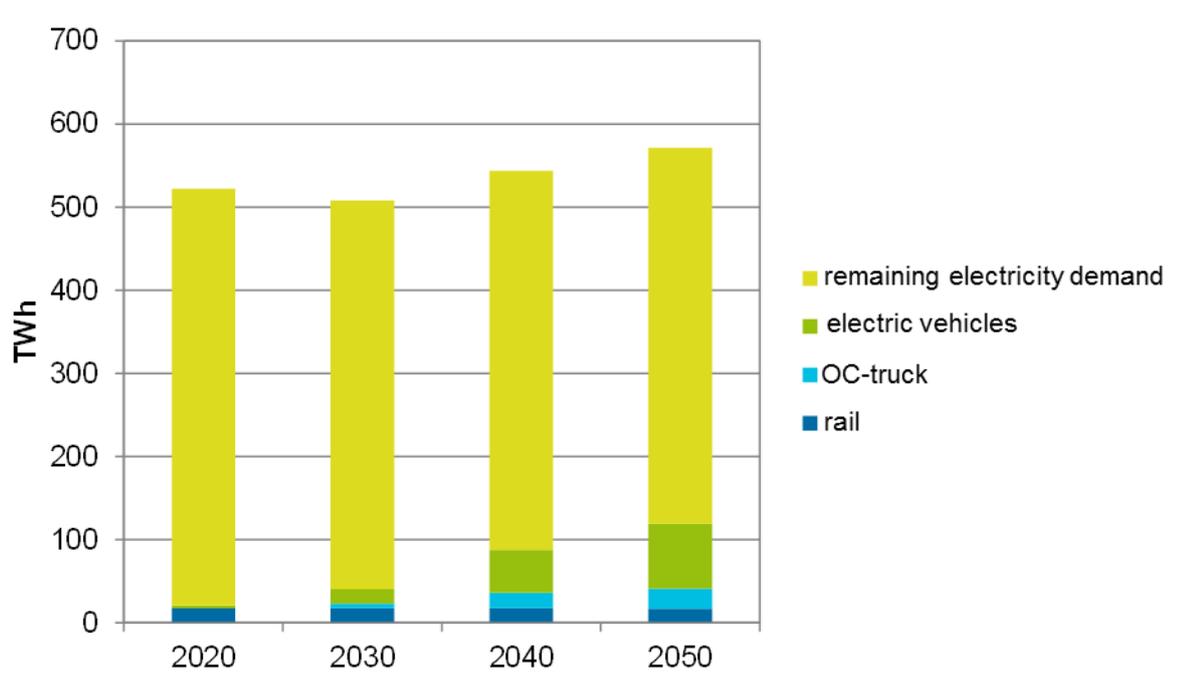
Once private companies are involved, a remuneration model is needed that provides incentives for efficient task fulfilment. Therefore, purely performance-based remuneration models should be avoided. In an "availability model", on the other hand, the remuneration entitlement results from the operational provision of the infrastructure. The quantity risk is usually in the hands of the public sector, as long as no use-based remuneration components are part of the agreement.

Various models are available for the billing of infrastructure use and electricity procurement between infrastructure operators and users (i.e. the OC-truck operators), ranging from exact measurement of electricity on the vehicle to flat-rate charging (e.g. by including it in the truck toll). In the latter case, even non-users could be involved in financing the overhead line infrastructure and the electricity provided there. For the users, it seems decisive that the expenditure for electricity procurement and billing is not higher than for refuel conventional fuel. In the StratON project, expert discussions with operators have shown a tendency towards flat-rate billing, while the energy industry tends more towards exact billing. Accurate billing could provide long-term incentives for the deployment of energy-efficient vehicles.

**The additional electricity demand by OC-trucks is low compared to the overall national electricity demand and compared to the additional electricity demand by electric cars.**

Even with a noticeable market penetration in 2050, in the scenarios examined the traction power demand of OC-trucks, with approx. 25 TWh/a, accounts for only a small share (about 5 %) of the total national power demand. With a share of more than 11 % by 2050, electric cars could be more than twice as important for total electricity demand. Regarding the annual energy demand and in relation to the total electricity generation of the entire country, the effect of OC-trucks on electricity generation and on the total emissions of the electricity sector are therefore comparatively small.

In order to ensure CO<sub>2</sub>-neutral generation of the energy demand of OC-trucks, an additional expansion of renewable power is necessary. Modelling results show, that if this additional expansion does not take place, a small part of the additional electricity demand in 2050 will be covered by increased utilization of fossil power plants, and the vast majority by additional electricity imports from neighboring countries.

**Figure 6: Electricity demand of OC-trucks and total electricity demand**

Source: own illustration Oeko Institut

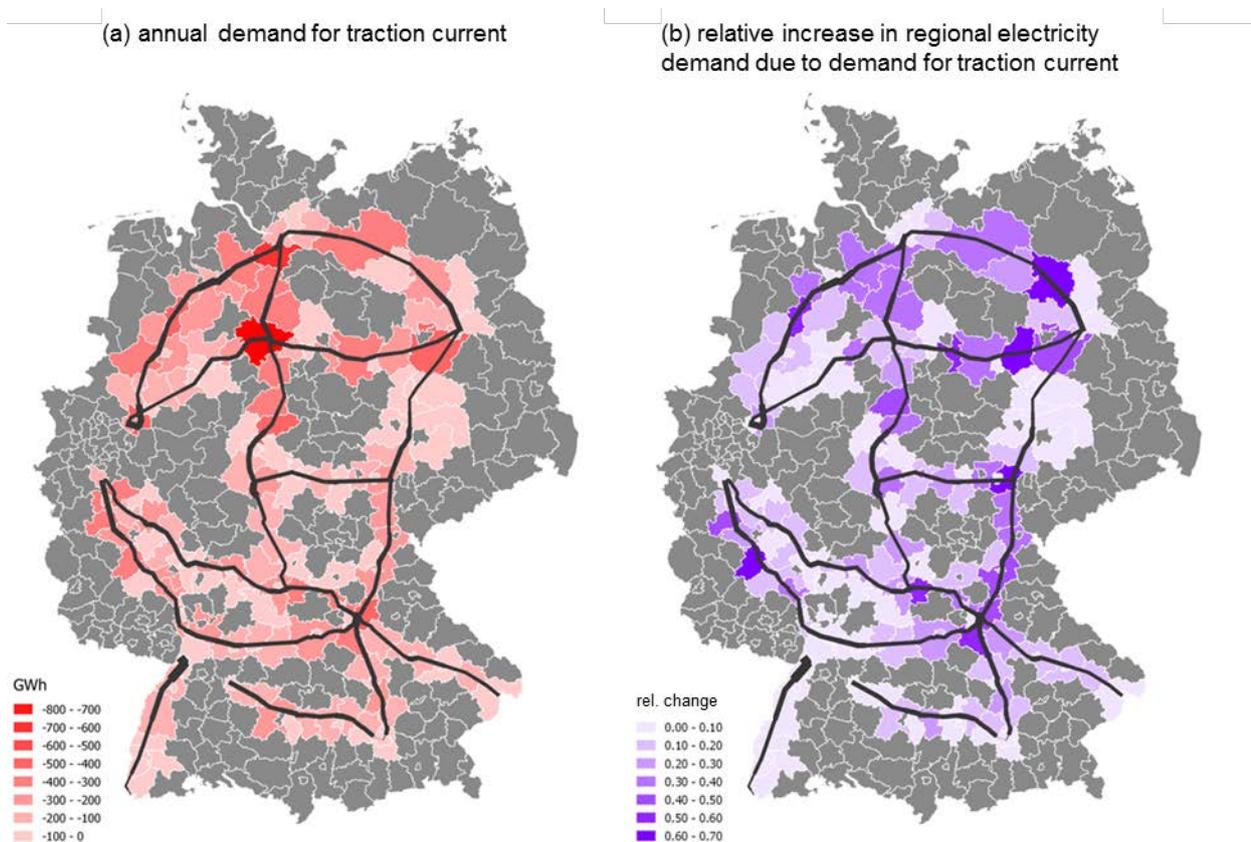
**Regional energy demand can increase noticeably as a result of the electrification of motorways in rural areas – depending on the region, this could result in both challenges and opportunities.**

Although the additional total energy demand from OC-trucks is comparatively low, the effects at a regional level can be considerable. In the case of passenger cars, it can be assumed that the spatial distribution of traction power demand is relatively similar to that of other electricity consumers. For OC-trucks, on the other hand, the traction power demand is corresponding to the route of the electrified corridors and therefore also affects sparsely populated regions with low electricity demand. In these regions, the effects of additional electricity demand can be particularly strong. In some rural areas OC-trucks could increase the electricity demand by 50 % or more. Depending on the regional characteristics, the additional electricity demand can be a challenge, but also an opportunity: If it is a rural region with large amounts of wind power, the additional electricity demand may integrate fluctuating RES generation and reduce the need for power lines and flexibility – provided there is sufficient correlation between generation and load profiles.

In addition, the expansion of renewable energy sources in the electricity system will lead to an increasingly inhomogeneous distribution of generation surpluses and deficits. The spatial distribution depends on the chosen renewable energy expansion strategy.

Both effects suggest that the adjustment measures that may be necessary to integrate the power demand will vary greatly from region to region and that a review of the regional context is in any case advisable.

**Figure 7: Spatial distribution of the traction current demand of OC-trucks in the year 2050**



Source: own illustration Oeko Institut (Allocation to individual routes without network additions)

**Compared to electricity-based fuels, overhead line trucks are the economically much more favorable option for decarbonizing heavy road freight transport.**

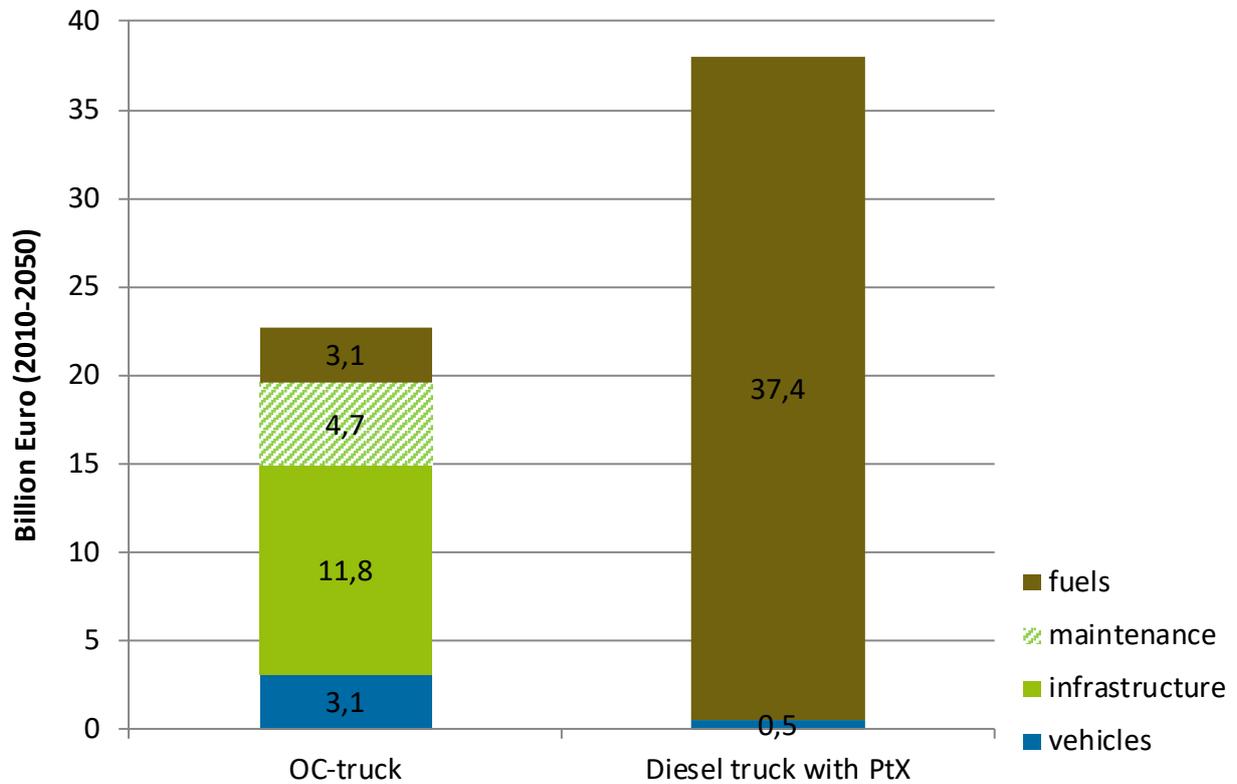
For the construction of the catenary infrastructure as well as for the electric vehicles additional investment costs are necessary. According to the scenarios examined in the project, the additional economic costs by 2050 will amount to around 23 billion Euros by 2050, according to the initial scenario M0 examined in the project, in order to achieve an electric share of about one third in heavy goods traffic. On the other hand, cumulative GHG savings of around 150 million tons over the entire period were achieved. This corresponds to economic avoidance costs of 150 €/t CO<sub>2</sub>.

Based on current knowledge, other options for decarbonizing road freight transport are associated with significantly higher economic costs. In order to achieve a similarly high GHG reduction as with OC-trucks through the use of electricity-based fuels, the additional economic costs are about twice as high – around 250 €/t CO<sub>2</sub>. This is due to the high production costs of power-based power-to-liquid (PtL) fuels.

The BDI also made similar statements in its study "Klimapfade für Deutschland" (Gerbert et al. 2018). This study even calculates avoidance costs of only 60 €/t CO<sub>2</sub> for OC-trucks (if an infrastructure is set up on the most frequented 4,000 km of motorway). The reason for the lower costs is the assumption of lower investment costs for the construction of the infrastructure and a higher proportion of electric driving. In the scenario M200, that is characterized by a higher electric mileage and thus by

a higher GHG-reduction, the avoidance costs result in 120 €/t. From an economic point of view, the construction of an overhead line infrastructure is therefore a relatively cost-efficient measure.

**Figure 3: Economic costs of decarbonization in road freight transport: Comparison of OC-trucks and electricity-based fuels**



Source: own Illustration

### 3. Einleitung

#### Hintergrund

Die Klimaschutzziele für Deutschland erfordern eine Minderung der verkehrsbezogenen Treibhausgasemissionen um mindestens 40 % bis zum Jahr 2030 (BMUB 2016) und damit eine deutliche Trendumkehr gegenüber der Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte. Bis zum Jahr 2050 müssen die Emissionen des Verkehrs praktisch auf null sinken, um den internationalen Verpflichtungen Deutschlands gerecht zu werden.

Der Straßengüterverkehr ist nach dem Pkw-Verkehr mit mehr als einem Drittel der nationalen Treibhausgasemissionen der zweitwichtigste Emittent im Verkehrssektor (BMUB 2017) und weist angesichts einer kontinuierlich zunehmenden Güterverkehrsleistung eine weiter steigende Tendenz auf. Zwar bestehen Potenziale, die Güterverkehre auf die Schiene zu verlagern, jedoch reichen diese für die Erreichung der Klimaschutzziele nicht aus. So beträgt der Anteil des Schienenverkehrs an der Güterverkehrsleistung in Deutschland aktuell etwa 19 %. Unter Annahme ambitionierter Maßnahmen zur Stärkung der Schiene werden Anteile von bis zu 27 % als realistisch erachtet (Lobig et al. 2017). Daher ist davon auszugehen, dass auch in Zukunft deutlich mehr als die Hälfte der Güterverkehrsleistung auf der Straße per Lkw erfolgt und hierfür klimaneutrale Antriebskonzepte entwickelt werden müssen.

Während sich im motorisierten Individualverkehr und auch im regionalen Güterverkehr mit dem batterieelektrischen Antrieb eine Antriebsalternative als Favorit für den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger abzeichnet, ist das Bild im Straßengüterfernverkehr bislang weniger klar. Angesichts der hohen Leistungs- und Reichweitenanforderungen von Sattelzugmaschinen, die typischerweise im Güterfernverkehr zum Einsatz kommen, stellt sich der Einsatz von Antriebsalternativen wesentlich herausfordernder dar. Gleichzeitig ist dieses Fahrzeugsegment angesichts hoher spezifischer Energieverbräuche und hoher Jahresfahrleistungen in Bezug auf die Treibhausgasemissionen besonders relevant.

Vor diesem Hintergrund wurde in den vergangenen Jahren die Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen mittels Oberleitung als mögliche Lösungsoption in Forschungsvorhaben untersucht und in Pilotvorhaben in Deutschland und Schweden erprobt. Seit Mai 2019 sind erstmalig in Deutschland O-Lkw (Oberleitungs-Lkw) auf einer ersten Teststrecke im öffentlichen Straßenraum auf der A5 bei Frankfurt im Einsatz (HMWEVW 2017)

Erste nationale und internationale Analysen weisen auf die Effizienz- und Kostenvorteile der Technologie im Vergleich zu möglichen Alternativen hin, ohne jedoch die Herausforderungen, die mit einem möglichen Markthochlauf verbunden sind, näher zu erörtern und die Potenziale auf Basis verkehrlicher Analysen im Detail herzuleiten (u.a. ICCT 2017; Gruber 2015; Kasten et al. 2016; Gerbert et al. 2018).

#### Zielstellung des Vorhabens

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit geförderten Forschungsvorhabens „**StratON – Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge**“ haben die drei Verbundpartner Öko-Institut e.V., Hochschule Heilbronn und Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO in Zusammenarbeit mit der Intraplan Consult GmbH in den vergangenen dreieinhalb Jahren die Analysen zu den Potenzialen des O-Lkw-Systems vertieft.

Zielstellung des Vorhabens ist es, das O-Lkw-System im Kontext möglicher Alternativen zu bewerten, mögliche Markteinführungs- und Marktentwicklungsszenarien aufzuzeigen und diese hinsichtlich ihrer ökologischen und ökonomischen Wirkungen zu bewerten.

Folgende Themen wurden in der Projektbearbeitung hierfür vertiefend analysiert:

- Es wurden mögliche technologische Ausprägungen des O-Lkw-Systems hinsichtlich der Ausgestaltung von Fahrzeugen und Energieversorgungsinfrastruktur analysiert und im Vergleich zu möglichen Antriebsalternativen bewertet.
- Anhand von verkehrlichen Analysen wurden geeignete Strecken und mögliche Ausbaustufen für eine Elektrifizierung des Bundesautobahnnetzes identifiziert und potenziell erschließbare Verkehrsmengen bestimmt.
- Schließlich wurde im Rahmen des Projekts ein agentenbasiertes Modell entwickelt, das den möglichen Markthochlauf von O-Lkw für unterschiedliche Rahmenbedingungen simuliert und eine Bewertung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen erlaubt.
- Die modellbasierten Analysen wurden durch eine vertiefte Auseinandersetzung mit den Rahmenbedingungen und Entwicklungen des Güterverkehrsmarktes sowie der Betrachtung möglicher Geschäftsmodelle im Kontext von O-Lkw flankiert.

Das dreijährige Forschungsvorhaben ist durch eine enge Beteiligung von Experten im Rahmen unterschiedlicher Formate und einem projektbegleitenden Beirat mit Stakeholdern aus Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Zivilgesellschaft gekennzeichnet. Im Rahmen von insgesamt 4 Sitzungen wurden die Zwischenergebnisse mit dem Projektbeirat (Beiratsmitglieder siehe Anhang) diskutiert und Anregungen für die weitere Bearbeitung aufgenommen. Im Rahmen von zwei Expertenworkshops wurden die Themen Infrastrukturausgestaltung und Anforderungen der Fahrzeugbetreiber vertieft diskutiert.

## Struktur des Berichts

Der Schlussbericht zum Forschungsvorhabens StratON dokumentiert das methodische Vorgehen und die erzielten Ergebnisse zu den im vorangegangenen Abschnitt aufgeführten Zielstellungen. Der Bericht schließt an den bereits im Herbst 2018 veröffentlichten StratON-Teilbericht „Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr“ (Kühnel et al. 2018) an. Der vorliegende Bericht gliedert sich in 7 Kapitel:

In **Kapitel 4** wird eine Bestandsaufnahme des heutigen Güterverkehrsmarktes vorgenommen und aktuelle Entwicklungen des Straßengüterverkehrs in Deutschland thematisiert. Dieses Wissen bildet die Grundlage für die spätere Einordnung des O-Lkw-Systems und seiner Potenziale in die bestehende Marktumgebung. In diesem Kontext werden unter anderem die wichtigsten Akteure und Teilmärkte charakterisiert, die zentralen Treiber im Transportmarkt beschrieben und die aktuellen Rahmenbedingungen in Bezug auf rechtliche / regulatorische Vorgaben, Art der Transportdurchführung und Struktur der beteiligten Unternehmen erläutert. Ferner wird auf Innovationen im Transportmarkt und mögliche Querverbindungen zum O-Lkw-System eingegangen.

O-Lkw wie auch die notwendige Energieversorgungsinfrastruktur können in unterschiedlichen Varianten aufgebaut werden und werden im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsalternativen diskutiert. In **Kapitel 5** werden die möglichen Konzepte beschrieben und bewertet. Zudem ermöglicht der Vergleich zu denkbaren Antriebsalternativen im Straßengüterfernverkehr, die in den weiteren Analyseschritten nicht näher betrachtet werden, eine Einordnung der Technologie. Für eine ausführliche Technologiebewertung und die Erläuterung möglicher Auslegungen der Energieversorgungsinfrastruktur sei zudem auf den 1. StratON-Teilbericht „Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer

Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr“ (Kühnel et al. 2018) verwiesen, der bereits im September 2018 veröffentlicht wurde.

Eine zentrale Grundlage für die Ableitung von Marktpotenzialen und einer möglichen Netzentwicklung für das O-Lkw-System im Projekt StratON bilden umfassende verkehrliche Analysen zum Straßengüterverkehr. In **Kapitel 6** werden zunächst die Datengrundlage, das methodische Vorgehen und zentrale Annahmen erläutert und die Ergebnisse der abschnittweisen Streckenanalysen dargestellt. Schließlich wird die Bildung eines möglichen Kernnetzes anhand der verkehrlichen Analysen hergeleitet und verschiedene Optionen der Netzbildung werden diskutiert sowie die potenziell erschließbaren Fahrten quantifiziert.

In **Kapitel 7** werden in Ergänzung zu den technischen und verkehrlichen Fragestellungen des O-Lkw-Systems mögliche Geschäfts- und Finanzierungsmodelle diskutiert, die mit einer Systemführung erforderlich werden bzw. diese begünstigen könnten. Thematisiert werden unterschiedliche Modelle der Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung sowie mögliche Abrechnungsmodelle für die Infrastrukturnutzung.

In **Kapitel 8** werden schließlich – auf Grundlage der vorangegangenen Analysen – plausible Markthochläufe für O-Lkw bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen dargestellt und deren ökologischen und ökonomischen Effekte quantifiziert. Hierzu werden zunächst die gewählte Methodik und die zentralen Annahmen sowie das im Projektkontext entwickelte bzw. erweiterte Modell TEMPS beschrieben. Die Ergebnisse werden für unterschiedliche Szenarien und Sensitivitätsbetrachtungen dargestellt und hinsichtlich wichtiger Wirkgrößen diskutiert.

In **Kapitel 9** werden die Wechselwirkungen eines Markthochlaufs von O-Lkw mit dem Stromsektor hinsichtlich der zusätzlichen Stromnachfrage und der regionalen Verteilung der Nachfrage auf Basis von Simulationsergebnissen diskutiert.

Abschließend wird in **Kapitel 10** ein Ausblick auf an das Projekt StratON anschließende, mögliche zukünftige Forschungsfragen gegeben.

## **4. Gütertransportmarkt – Stand und Perspektiven**

### **4.1. Einleitung**

Ziel dieses Kapitels ist es, einen Überblick über das Marktumfeld für O-Lkw zu geben. Dabei steht insbesondere der deutsche Gütertransportmarkt im Mittelpunkt. Damit werden die wesentlichen Anforderungen definiert, denen sich eine Einführung jedes neuen Antriebskonzepts im Straßengüterverkehr zu stellen hat. Besondere Bedeutung kommt dabei den Auftraggebern von Transportdienstleistungen (Verladern), den mit der Organisation der Transportkette und der Auswahl der befördernden Unternehmen beauftragten Spediteuren und den eigentlichen Frachtführern, d. h. den Betreibern der Lkw zu. Zu Beginn des Kapitels wird zunächst anhand offizieller Statistiken ein Überblick über die Struktur der Güterverkehrsnachfrage in Deutschland gegeben.

### **4.2. Kennzahlen und Eckwerte zum Straßengüterverkehr in Deutschland**

Im folgenden Abschnitt wird die Güterverkehrsnachfrage in Deutschland nach verschiedenen Gesichtspunkten beschrieben, angefangen mit der Entwicklung im Zeitraum 1995 – 2015 in Tabelle 4-1.

Anschließend wird der Straßengüterverkehr als Hauptuntersuchungsthema dieser Studie detaillierter dargestellt, und zwar für das Jahr 2015. Dabei werden die transportierten Güter nach Abteilungen in Tabelle 4-2 gezeigt, gefolgt von der Darstellung der Hauptverkehrsbeziehungen in Tabelle 4-3 und der Entfernungsverteilung der transportierten Güter in Tabelle 4-4.

**Tabelle 4-1: Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland, gemäß offizieller Statistik**

	1995	2000	2005	2010	2015*	Änderung 1995-2015 in %
<b>Transportaufkommen (Mio. t)</b>						
<b>Summe</b>	<b>3.916,0</b>	<b>3.795,8</b>	<b>3.616,2</b>	<b>3.710,5</b>	<b>4.068,5</b>	<b>3,9</b>
Schiene	331,1	309,4	317,3	355,7	367,3	10,9
Straße	3.347,0	3.244,2	3.062,1	3.125,2	3.479,8	4,0
Binnenschiff	237,9	242,2	236,8	229,6	221,4	-6,9
Anteil in %						
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	
Schiene	8,5	8,2	8,8	9,6	9,0	
Straße	85,5	85,5	84,7	84,2	85,5	
Binnenschiff	6,1	6,4	6,5	6,2	5,4	
<b>Transportleistung (Mrd. tkm, territorial)</b>						
<b>Summe</b>	<b>414,2</b>	<b>495,5</b>	<b>562,2</b>	<b>610,2</b>	<b>632,1</b>	<b>52,6</b>
Schiene	70,5	82,7	95,4	107,3	116,6	65,4
Straße	279,7	346,3	402,7	440,6	460,2	64,5
Binnenschiff	64,0	66,5	64,1	62,3	55,3	-13,6
Anteil in %						
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	
Schiene	17,0	16,7	17,0	17,6	18,4	
Straße	67,5	69,9	71,6	72,2	72,8	
Binnenschiff	15,5	13,4	11,4	10,2	8,7	

\* vorläufige Werte, insb. im Straßengüterverkehr

Quelle: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (Bearb.): Verkehr in Zahlen, 2013/2014 und 2017/2018

Die Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland zwischen 1995 und 2015 lässt sich wie folgt zusammenfassen: moderates Wachstum im Verkehrsaufkommen, in Summe und auf der Straße, etwas stärker bei der Schiene bei gleichzeitigen Abnahmen bei der Binnenschifffahrt; dagegen sehr deutliche Zunahmen bei der Verkehrsleistung insgesamt und insbesondere bei der Schiene sowie im Straßengüterverkehr (um jeweils durchschnittlich ca. 2,5 % pro Jahr), aber auch hier Abnahmen beim Binnenschiff.

Bei den in Verkehr in Zahlen (2017/2018) für das Jahr 2015 ausgewiesenen Werten handelt es sich jedoch zum Teil um vorläufige Werte, das betrifft neben dem Straßengüterverkehr, für den die Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht vollständig vorlagen, auch den Schienengüterverkehr. Zur Erstellung der „Kurzfristprognose Sommer 2018“ (Intraplan Consult GmbH, BAG Luftverkehr: Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr.

Kurzfristprognose Sommer 2018) wurden die 2015er-Werte für den Straßengüterverkehr und den Schienengüterverkehr modifiziert und aktualisiert. Die oben geschilderten Grundtendenzen in der Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland ändern sich durch die Modifizierung der Werte für 2015 nicht. Die folgenden Tabellen mit detaillierter Darstellung des Straßengüterverkehrs im Jahr 2015 beziehen sich alle auf die modifizierten Werte.

**Tabelle 4-2: Straßengüterverkehr in Deutschland nach Güterabteilungen (NST 2007)**

		2015	2015
		Transportaufkommen (Mio. t)	Transportleistung (Mrd. tkm, territorial)
	<b>Straßengüterverkehr, Summe</b>	<b>3.494,7</b>	<b>466,0</b>
01	Land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse	210,0	34,6
02	Kohle, Rohöl, Erdgas	10,4	1,4
03	Erze, Steine u. Erden, Bergbauerzeugnisse	918,6	32,0
04	Nahrungs- und Genussmittel	368,5	68,9
05	Textilien, Bekleidung, Leder u. Lederwaren	13,4	4,2
06	Holz, Papier, Druckerzeugnisse	159,3	36,1
07	Kokerei- u. Mineralölerzeugnisse	97,9	10,8
08	Chemische Erzeugnisse	193,3	38,3
09	Sonst. Mineralerzeugnisse	370,3	34,2
10	Metalle u. Metallerzeugnisse	181,0	38,9
11	Maschinen u. Ausrüstungen, Haush.	67,1	16,8
12	Fahrzeuge	108,7	24,3
13	Möbel, Schmuck, Musikinstrumente	24,6	8,6
14	Sekundärrohstoffe, Abfälle	277,3	21,4
15	Post, Pakete	53,4	9,7
16	Geräte u. Material für die Güterbeförderung	104,8	13,7
17	Umzugsgut u. sonstige Güter	75,7	7,8
18	Sammelgut	233,4	54,1
19	Unbekannt	10,1	2,0
20	Sonstige Güter	17,0	8,2

Quelle: Modifizierungen für: Intraplan Consult GmbH, BAG Luftverkehr: Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Kurzfristprognose Sommer 2018

**Tabelle 4-3: Straßengüterverkehr in Deutschland nach Hauptverkehrsbeziehungen**

	2015	2015
	Transportaufkommen (Mio. t)	Transportleistung (Mrd. tkm, territorial)
<b>Straßengüterverkehr, Summe</b>	<b>3.494,7</b>	<b>466,0</b>
Binnenverkehr	2.951,7	281,6
Versand, grenzüberschreitend	216,9	55,7
Empfang, grenzüberschreitend	207,9	56,8
Durchgangsverkehr	118,2	71,9

Quelle: Modifizierungen für: Intraplan Consult GmbH, BAG Luftverkehr: Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Kurzfristprognose Sommer 2018

**Tabelle 4-4: Entfernungverteilung im Straßengüterverkehr Deutschlands**

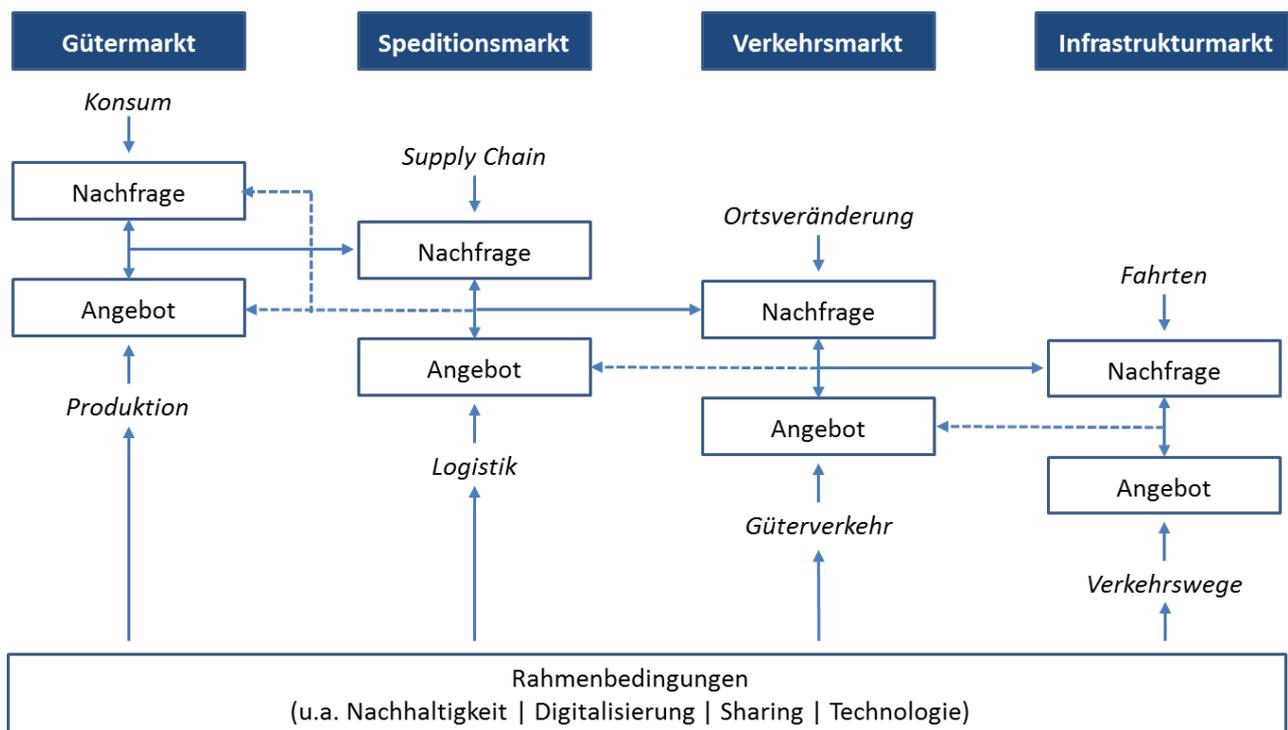
	2015	2015
	Transportaufkommen (Mio. t)	Transportleistung (Mrd. tkm, territorial)
<b>Straßengüterverkehr, Summe</b>	<b>3.494,7</b>	<b>466,0</b>
Deutsche Lastkraftfahrzeuge	3.018,9	290,6
Nahverkehr (bis 50 km)	1.659,0	31,0
Regionalverkehr (51 bis 150 km)	715,7	64,1
Fernverkehr (über 150 km)	644,1	195,5
Ausländische Lastkraftfahrzeuge	475,8	175,4

Quelle: Modifizierungen für: Intraplan Consult GmbH, BAG Luftverkehr: Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Kurzfristprognose Sommer 2018

### 4.3. Das verkehrslogistische Märkte-Modell

Für die Einordnung des O-Lkw in das Gütertransportsystem ist es wichtig, die Marktumgebung zu kennen und richtig einzuschätzen. Es ist also erforderlich, Angebot und Nachfrage auf den für die Verkehrslogistik relevanten Märkten näher zu definieren. Hierfür ist ein Modell erforderlich, das die verschiedenen *güterverkehrsrelevanten Teilmärkte* beschreibt und in ein Verhältnis zueinander setzt (siehe Abbildung 4-1).

Abbildung 4-1: Das verkehrslogistische Märkte-Modell



Quelle: Bernecker und Boysen 2018

Der *Verkehrsmarkt* ist der Ort der eigentlichen Transportabwicklung. Das dort bestehende Angebot an Ortsveränderungen für Güter wird als *Güterverkehr* bezeichnet. Folgerichtig besteht die Nachfrage im *Wunsch nach Ortsveränderung von Gütern* seitens der Auftraggeber von Transporten, d. h. in Transportaufträgen. Auslösender Faktor für diese Aufträge sind das Geschäftsmodell des Handels, das im Zusammenführen von Produktion und Konsum besteht (B2C), das Bestehen unternehmensübergreifender Wertschöpfungsstrukturen, das Transporte im Rahmen des Produktentstehungsprozesses auslöst (B2B) sowie der Versand von Gütern zwischen privaten Haushalten (C2C).

Dabei hat es sich etabliert, aufgrund des hohen Spezialisierungsgrads der Transportbranche an dieser Stelle einen zusätzlichen intermediären Markt zwischenzuschalten, auf dem Spezialisten in der Organisation von Transporten agieren, den *Speditionsmarkt*. Die Transportnachfrage wird heute maßgeblich von den Spediteuren gesteuert.

Für die Abhängigkeiten zwischen Güter-, Speditions- und Verkehrsmarkt, wie auch für das Marktgeschehen auf diesen drei Teilmärkten, gelten dabei eine Reihe ganz allgemeiner Kriterien (Woll 1996, S. 199 f.):

- Das **ökonomische Prinzip**, d. h. das Streben der Nachfrager (d. h. der Verlager) nach Nutzenmaximierung bei gleichzeitigem Streben der Produzenten (d. h. von Spedition und Frachtführern) nach Gewinnmaximierung,
- die **Güterähnlichkeit**, d. h. das Vorliegen verschiedener Güter zwar ähnlicher, aber doch ungleichartiger Natur, die aufgrund technischer, rechtlicher und ökonomischer Restriktionen aber nur begrenzt substituierbar sind (z. B. Straßen- und Schienengüterverkehr) (unvollkommener Markt),

- **Wettbewerb** zwischen den Marktteilnehmern. D. h. das grundsätzliche Streben auch zu Lasten anderer zu einem Vertragsabschluss zu kommen (z. B. bei der Ausschreibung von Transporten),
- die grundsätzliche **Offenheit** des Marktes auf beiden Marktseiten, d. h. sowohl Nachfrager (Verlader) als auch Produzenten (Speditions- und Logistikunternehmen) dürfen an den Märkten mit wenigen Ausnahmen (z. B. Kabotage) uneingeschränkt teilnehmen,
- eine relativ hohe **Markttransparenz** hinsichtlich der in der Vergangenheit getätigten Transaktionen und der damit verbundenen Informationen zu Art und Qualität der erbrachten Leistungen, Preise, Konditionen und Zahl der (potenziell interessierten) Marktteilnehmer, ohne dass allerdings völlige Transparenz herrscht,
- grundsätzlich **unabhängig** voneinander getroffene Entscheidungen; Absprachen und Kollektiventscheidungen sollen auf beiden Marktseiten nur insoweit stattfinden, wie diese legal sind (z. B. Einkaufskooperationen beim Frachteneinkauf oder strategische Transportallianzen), ohne aber den kartellrechtlichen Rahmen zu verletzen,
- zeitliche **Verzögerungen** des Marktes bei der Anpassung an veränderte Marktbedingungen, die stark von Informationslage und Informationsverfügbarkeit abhängig sind.

Der Verkehrsmarkt ist gleichzeitig nicht das Ende dieser Kette an Abhängigkeiten. Er fragt vielmehr seinerseits Leistungen des Infrastrukturmarktes nach, die für die Leistungserstellung unerlässlich sind. Hierzu zählt zum einen die Bereitstellung der erforderlichen Verkehrsinfrastruktur, zum anderen aber auch die Bereitstellung von Zubehör wie z. B. einer Fahrleitungsanlage inklusive der erforderlichen Stromversorgung.

#### 4.3.1. Der Gütermarkt

Speditions- und Verkehrsmarkt generieren keine originäre Nachfrage. Weder findet Güterverkehr zum bloßen Selbstzweck statt (d. h. es gibt keine in dem Sinne unnötigen Transporte, als dass dahinter nicht zumindest mittelbar – wie etwa bei Leerfahrten zur Fahrzeugbereitstellung am richtigen Ort – eine entsprechende Güternachfrage steht), noch kommt es ohne Auftrag zur Organisation und Durchführung von Beförderungen. Es wird vielmehr eine *derivative Nachfrage* befriedigt, die ihren Ursprung auf dem Gütermarkt hat. Dort treffen Konsum (bzw. die gewerbliche Nachfrage nach Vorprodukten) und Produktion aufeinander. Der dort stattfindende Handel induziert – sofern damit die Ortsveränderung physischer Objekte (Waren bzw. materielle Güter) verbunden ist und nicht Produktion und Konsum am gleichen Ort stattfinden – die Notwendigkeit der Organisation und Durchführung von Transporten, d. h. von Güterverkehr.

Umgekehrt bedeutet dies, dass die Mengenentwicklung im Güterverkehr nicht bzw. nur marginal auf dem Speditions- und Transportmarkt beeinflusst werden kann, sondern ein Ergebnis der Aktivitäten auf dem Gütermarkt ist. Der Speditions- und Transportmarkt hat hierauf nur insofern Einfluss, als dass er bestimmte Lösungen für den Handel oder die räumlich verteilte Produktion in Aussicht stellt und damit diese Konzepte erst denkbar macht.

#### 4.3.2. Der Speditionsmarkt

Der Speditionsmarkt ist der Ort, an dem logistische Dienstleistungen vermittelt werden. Er verknüpft Güter- und Verkehrsmarkt. Der Spediteur übernimmt dabei die Verantwortung für die erfolgreiche Versendung von Gütern und Waren. Er fungiert somit als Koordinator der Transportkette, der den Austausch gekaufter Waren möglich macht, Produktionsketten sichert und einen standortübergreifenden Gütertausch koordiniert. Gleichzeitig entscheidet er auch über die Verkehrsträgerwahl

bzw. innerhalb eines Verkehrsträgers über die Inanspruchnahme bestimmter Angebote wie z. B. eines ökologisch besonders nachhaltigen Transports.

Das Geschehen auf dem Speditionsmarkt ist äußerst vielseitig. Entsprechend groß sind die Gestaltungsspielräume. Auch lässt sich die Leistung des Spediteurs nicht anhand eines einzelnen Qualitätskriteriums messen bzw. es lässt sich nicht über einen einzelnen Qualitätsparameter über Auftragsvergaben auf dem Speditionsmarkt entscheiden. Nach welchen Kriterien Angebot und Nachfrage auf dem Speditionsmarkt am Ende konkret zueinander finden, ist vielmehr abhängig von verschiedenen Gestaltungs- und Leistungsparametern, wobei üblicherweise *Preis-Leistungs-Verhältnis*, *Zuverlässigkeit*, *die Fähigkeit zum Angebot kundenspezifischer Leistungen* und *Sicherheit* für die Vergabe von Aufträgen an den Speditionsmarkt eine herausragende Rolle spielen. Neben diesen Kernkriterien spielen aber auch ergänzende Faktoren wie beispielsweise die Umweltbilanz des Transports, die Fähigkeit zur Integration von Mehrwertdienstleistungen, die Akzeptanz verladespezifischer Restriktionen (z. B. bei den Ladungsträgern), die Offenheit gegenüber Logistikinnovationen oder auch eine gute Zusammenarbeit in der Vergangenheit eine wichtige Rolle bei der Anbieterauswahl. Dies gilt insbesondere für die Fälle, bei denen im Rahmen der sogenannten Kontraktlogistik längerfristige Speditionsverträge geschlossen werden und nicht auf Spot-Märkten nur einmalige Transporte gebucht bzw. vermittelt werden.

In jüngerer Vergangenheit hat sich auf dem Speditionsmarkt eine Terminologie etabliert, die versucht, das Geschehen auf dem Speditionsmarkt und die dort aktiven Akteure über das Modell des Dritt- und Viertparteihandelns zu erklären (Huth 2015, S. 270 f.):

- **3PL** bzw. Third-Party-Logistics-Provider bieten als Logistikdienstleister integrierte Transport-, Umschlag- und Lagerdienstleistungen („TUL-Leistungen“) und weitere Mehrwertdienstleistungen mit eigenen Ressourcen an und verfügen über originäres Logistikwissen. Ihr Auftreten ist typisch beim klassischen Outsourcing von Logistikdienstleistungen. Die Untervergabe einzelner Teilleistungen, z. B. des Transports, ist möglich.
- **4PL** agieren hingegen als reine Dienstleistungsagenten, die als Vermittler logistische Komplettpakete schnüren und in dieser Funktion zwischen Auftraggeber (Versender) und Dienstleistern (TUL- und Mehrwertdienstleistern) angesiedelt sind. Sie treten ohne eigene Logistik-Ressourcen am Markt auf, sind also für die Leistungserstellung auf Unterauftragnehmer bzw. Partner angewiesen.
- **5PL** agieren hochgradig autonom als Manager der Logistik von ganzen Wertschöpfungsnetzwerken, steuern also andere 3PL- und 4PL-Dienstleister. Ihre Fachkompetenz liegt in der Koordination komplexer Wertschöpfungsketten.

#### 4.3.3. Der Verkehrsmarkt

Auf dem Verkehrsmarkt treffen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage aufeinander. Der Verkehrsmarkt hat seine unmittelbare nachfrageseitige Begründung in den Aufträgen des Speditionsmarktes (Ihde 2001, S. 6). Auf diese reagieren die Transportunternehmen mit Transportangeboten der verschiedenen *Verkehrsträger* (Straße, Schiene, Wasser, Luft). Dabei werden verschiedene *Verkehrsmittel* (z. B. Lkw und Züge) genutzt, verschiedene *Transportkonzepte* (z. B. Ladungs- oder Systemverkehre) verfolgt und ggf. auch die *Kombination verschiedener Verkehrsträger* angeboten (multimodale und intermodale Verkehre).

Während im interkontinentalen Güterverkehr die Seeschifffahrt dominiert, trägt der Lkw die Hauptlast des intrakontinentalen Güterverkehrs. Dies hat seine Ursache insbesondere darin, dass der Güterkraftverkehr am besten in der Lage ist, auf die Herausforderungen des Speditionsmarktes flexibel

zu reagieren und in komplexer werdenden Umgebungen mit *Flexibilität* durch dichte Netze, hohe Frequenzen und Wirtschaftlichkeit bei relativ geringen Einzel-Sendungsmengen, *günstigen Preisen*, einer hohen *Zuverlässigkeit*, eine relativ hohen *Transportsicherheit* überzeugt. Andererseits ist gerade der Straßengüterverkehr in besonderer Weise von infrastrukturellen Einschränkungen tangiert. Engpässe beeinflussen die Zuverlässigkeit des Transports negativ. Dies gilt insbesondere dort, wo Verkehrswege oder Verkehrsstationen gleichermaßen vom Personen- und Güterverkehr genutzt werden.

#### 4.3.4. Der Infrastrukturmarkt

Die Verkehrslogistik ist abhängig von der Verkehrsinfrastruktur, auf der sie stattfindet. Unter der Verkehrsinfrastruktur werden dabei nicht nur Wege, sondern vielmehr die Gesamtheit der ortsfesten Anlagen verstanden, die dem Verkehr dienen. Neben den Verkehrswegen sind dies auch alle Anlagen zur Steuerung und Lenkung des Verkehrs sowie die Verkehrsstationen, d. h. die Zugangs- und Verknüpfungspunkte zu und zwischen den Verkehrswegen. Auch die verkehrsrelevante Versorgungsinfrastruktur (z. B. Tank- und Rastanlagen) zählt zum Zubehör der Verkehrsinfrastruktur (Stock und Bernecker 2014, S. 44f.).

Die insgesamt rund 830.000 km lange Straßenverkehrsinfrastruktur in Deutschland steht im Eigentum der öffentlichen Hand, wobei sich Bund (Bundesfernstraßen), Länder (Landes- bzw. Staatsstraßen), Kreise (Kreisstraßen) und die Gemeinden (Sonstige Straßen) diese Aufgabe teilen und jeweils Teilverantwortung übernehmen (siehe Tabelle 4-5).

**Tabelle 4-5: Straßeninfrastruktur in Deutschland 2014: Länge und durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV)**

<b>Straßenkategorie</b>	<b>Länge (km)</b>	<b>DTV<sub>w</sub> Lkw</b>
Bundesautobahnen	12.952	9.130
Bundesstraßen	39.776	785
Landes- und Staatsstraßen	86.500	125
Kreisstraßen	89.995	65
Sonstige Straßen	599.949	-

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnungen nach Bäumer et al. 2017, S. 27 und 32

Für die Entwicklung eines Lkw-Oberleitungs-Netzes in Deutschland sind die Bundesautobahnen aufgrund ihrer hohen Verkehrsmengen von besonderer Bedeutung. Für diese wurde mit dem Grundgesetz ein Organisationsmodell entwickelt, für das die Trennung von Aufgaben- bzw. Wahrnehmungskompetenz einerseits und Finanzierungskompetenz andererseits prägend ist. Während der Bund die Verantwortung für Investitions- und Rahmenplanung in eigener Verantwortung und Zuständigkeit wahrnimmt, wurde die Wahrnehmungskompetenz (Finanzierungs- und Detailplanung, Bau und Betrieb) in die Hände der Straßenbauverwaltungen der Länder gelegt. Zum 01.01.2021 wird die neu gegründete Infrastrukturgesellschaft des Bundes diese Aufgaben der Länder im Bereich der Bundesautobahnen übernehmen. Schon 2019 werden ihr zudem alle heute bei der Verkehrsinfrastrukturfinanzierungsgesellschaft verankerten Aufgaben übertragen, sodass zukünftig alle mit den Bundesautobahnen in Verbindung stehenden Aufgaben an zentraler Stelle wahrgenommen werden.

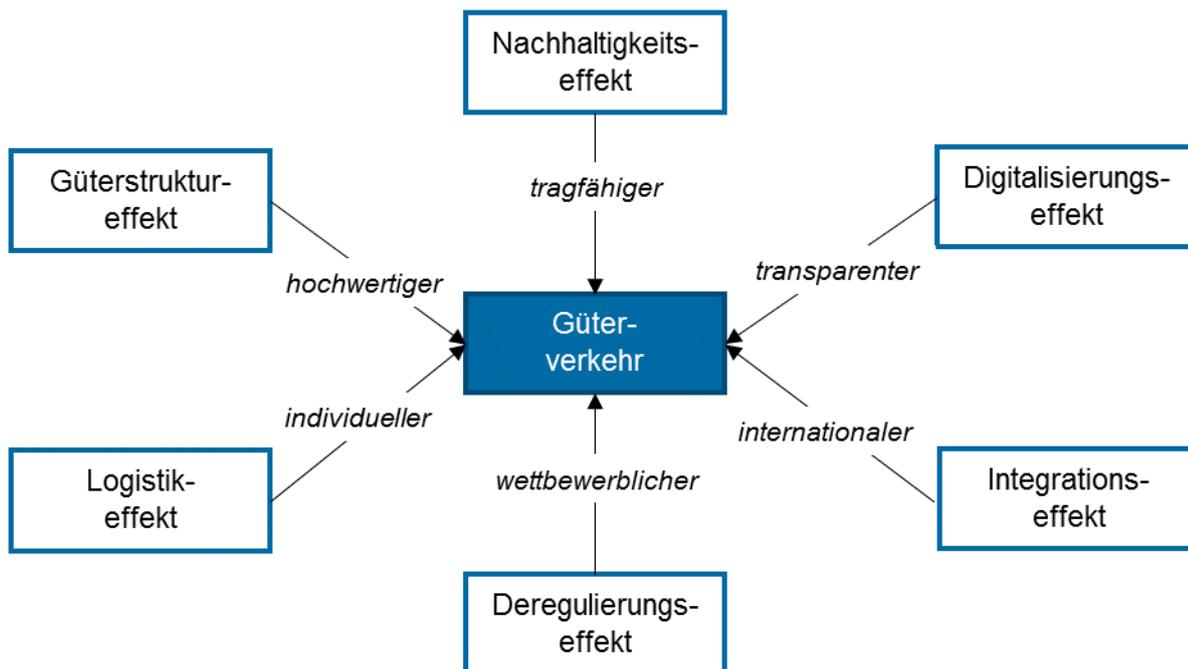
Für den Staat stellt die Verkehrsinfrastruktur einen erheblichen Teil seines Vermögens dar. So liegt das Anlagevermögen in Straßen, Schienen und Wasserwege in Deutschland bei rund

800 Mrd. Euro<sup>5</sup> (BMVI (Hg.) 2017, S. 39); dies entspricht rund 30 % des gesamten Anlagevermögens des Staates (Statistisches Bundesamt 2017c, S. 45). Der Verkehrsbereich ist daher auch der größte Einzel-Investitionsbereich auf Bundesebene mit jährlichen Investitionen alleine auf Bundesebene in Höhe von (2018) rund 14 Mrd. Euro. Dabei haben sich aufgrund des Alters und Zustands vieler Verkehrsbauwerke die Investitionsschwerpunkte in jüngerer Vergangenheit stark vom Neu- und Ausbau der Verkehrswege in Richtung der Substanzerhaltung verschoben.

#### 4.4. Treiber der Entwicklung auf dem Transportmarkt

Der Transportmarkt ist nicht statisch. Er wird vielmehr von mehreren aktuellen Entwicklungen beeinflusst: Diese werden teilweise als „moderierende Effekte“ (Grandjot und Bernecker 2014, S. 47), als „verkehrssektorinterne und verkehrssektorexterne Entscheidungsvariablen“ (Aberle 2009, S. 91), als „Trends“ (Wittenbrink 2014, S. 332) oder als „Erklärungsfaktoren der Güterverkehrsentwicklung“ (Lohre und Bernecker 2012, S. 10) bezeichnet. Das Spektrum der unter diesen Begriffen zusammengefassten Effekte ist dabei äußerst vielseitig. Von besonderer Bedeutung sind aber die sechs im Folgenden illustrierten und dargestellten Entwicklungen (Abbildung 4-2).

Abbildung 4-2: Marktstrukturelle Effekte



Quelle: Eigene Darstellung

Die marktstrukturellen Effekte sind dabei unterschiedlichen Ursprungs: Sie stehen teilweise für Veränderungen auf dem Nachfragemarkt (*Güterstruktureffekt*, *Integrationeffekt*), teilweise aber auch für Entwicklungen, die vom Speditionsmarkt ausgehen (*Logistikeffekt*). Die Entwicklungen sind teilweise auch das Ergebnis politischer Gestaltung (*Deregulierungseffekt*), technologischer Megatrends (*Digitalisierungseffekt*) sowie gesellschaftlicher Veränderungen und Erwartungen (*Nachhaltigkeits-effekt*).

<sup>5</sup> Bezogen auf das Jahr 2016, Bruttoanlagevermögen zu Preisen von 2010

#### 4.4.1. Güterstruktureffekt

Der Güterstruktureffekt – teilweise auch als Güterwerteffekt bezeichnet (Grandjot und Bernecker 2014, S. 47) – beschreibt die anteilige Zunahme hochwertiger Konsum- und Investitionsgüter am Güterverkehrs-Gesamtaufkommen. Bezüglich des steigenden Anteils hochwertiger Güter ist er eine direkte Folge des zunehmenden Wohlstands und der weltweit steigenden Nachfrage nach Konsumartikeln (Aberle 2009, S. 93 ff.), aber auch der weltweit verteilten Fertigung hochwertiger Produkte. Betrachtet man nicht nur die Entwicklung der Transportmengen bei den einzelnen Gütergruppen, sondern zusätzlich auch die Entwicklung der Transportentfernungen, so fällt der Güterstruktureffekt noch deutlicher aus. Dies rührt daher, dass rund zwei Drittel des Massengutaufkommens auf Steine, Erden und andere Baustoffe entfallen, die oft über relativ geringe Distanzen transportiert werden (sog. *Baustellenverkehre*). Hingegen haben sich durch die Verlagerung der Produktion vieler Konsumartikel u.a. nach Asien bei den hochwertigen Gütern die Transportentfernungen deutlich erhöht. Sollte es in Zukunft allerdings wieder – was sich teilweise abzeichnet – zu Rückverlagerungen der Produktion entweder in das osteuropäische Ausland oder im Zuge einer vermehrt nachhaltigen Lebensart auch in das Inland kommen, wird sich dieser Teileffekt möglicherweise wieder etwas abschwächen. Gerade für den langlaufenden Straßengüterverkehr könnte diese Entwicklung aber möglicherweise sogar zu Mehrverkehren führen, da dann vermehrt Schiffstransporte durch intrakontinentale Landverkehre zu ersetzen wären.

#### 4.4.2. Logistikeffekt

Der Logistikeffekt verstärkt den Güterstruktureffekt (Aberle 2009, S. 94). Er beschreibt alle Angebote und Prozessverbesserungen auf dem Speditions- und Verkehrsmarkt, die dazu beigetragen haben, die Anforderungen der Verlagerer an neue logistische Konzepte zu erfüllen.

Ein wesentliches Ergebnis des Logistikeffektes ist die Weiterentwicklung des einfachen Pakettransports zum heutigen Segment der Kurier-, Express- und Paketdienstleistungen, die mittlerweile in Deutschland mit mehr als 3,3 Mrd. Sendungen pro Jahr ein Marktvolumen von fast 20 Mrd. € erreicht hat (BIEK 2018, S. 11). Ein anderes wichtiges Resultat des Logistikeffektes ist die in der Vergangenheit erfolgte Verlagerung vieler Transporte von der Schiene auf die Straße, da der Lkw besser in der Lage war, die Anforderungen der Verlagerer an Schnelligkeit, Individualität und Zuverlässigkeit vieler, oft zunehmend kleinteiliger Transporte, sowie – nach Freigabe der Preise – auch an einen möglichst preisgünstigen Transport zu erfüllen.

#### 4.4.3. Deregulierungseffekt

Unter dem Deregulierungseffekt wird die Umsetzung des Wettbewerbsprinzips auf dem Verkehrsmarkt seit dem Beginn der 1990er Jahre verstanden. Dieser Prozess bedeutete eine fundamentale Abkehr von den stark regulierten, staatlich geprägten Transportmärkten, die sich ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in Europa gebildet hatten. Speziell in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde ein weitgehend geschlossener Güterverkehrsmarkt etabliert, auf dem die dort tätigen Transportunternehmen (bzw. vielfach Staatsbetriebe) nur einem eingeschränkten unternehmerischen Risiko ausgesetzt waren.

Seit der Deregulierung dominiert das Kriterium der Eigenwirtschaftlichkeit im Güterverkehr aller Verkehrsträger. Die Unternehmen des Transportgewerbes sind nur noch in wenigen Nischen, die zum Teil natürliche Monopole darstellen (wie z. B. bestimmte Sondertransporte), zum Teil aber auch politisch gewollt sind (Kabotage, d. h. die Inlandsbeförderung durch gebietsfremde Frachtführer) vor dem Wettbewerb (teilweise) geschützt.

Der Deregulierungseffekt hat zu einer Halbierung der Preise im gewerblichen Güterverkehr geführt. Er hatte zudem eine wesentliche Internationalisierung der Transportbranche zur Folge: der freie Marktzugang führte vermehrt zum Erstarken ausländischer Frachtführer in Deutschland. So werden mittlerweile mehr als 40 % der mautpflichtigen Kilometer auf deutschen Autobahnen mit gebietsfremden Fahrzeugen zurückgelegt, und rund 25 % des Schienengüterverkehrsmarktes in Deutschland werden von Tochterunternehmen ausländischer Eisenbahnverwaltungen bedient.

#### 4.4.4. Integrationseffekt

Der Integrationseffekt steht für das weltweite Zusammenwachsen der Produktions- und Absatzmärkte. Eine maßgebliche Herausforderung besteht dabei darin, dass höchst unterschiedliche Wirtschaftsordnungen mit teilweise stark divergierenden Interessenslagen miteinander Handel betreiben und Waren austauschen.

Für Schlüsselbranchen in Deutschland, beispielsweise die Automobilindustrie, ist der Auslandsabsatz ihrer Produkte inzwischen zu einer Kernaufgabe geworden, die überlebensnotwendig ist: seit mehr als 15 Jahren liegt die Exportquote der deutschen Pkw-Produktion im Schnitt bei mehr als 70 %. Aber auch der Maschinenbau, die chemische Industrie oder die Pharmaindustrie profitieren heute maßgeblich vom Export. Umgekehrt ist die industrielle Produktion ohne den Import von Komponenten, Teilen und Systemen aus dem Ausland heute nicht mehr realisierbar: Zu 34 % hängt die nationale Produktion heute von Importen ab (Statistisches Bundesamt 2017a, S. 26).

Neben der Produktion profitieren insbesondere auch der Handel und der Verbraucher in erheblichem Umfang vom Integrationseffekt. Bei vielen Konsumartikeln, z. B. Kleidung, Schuhen oder Unterhaltungselektronik ist eine Produktion in Fernost inzwischen zum Regelfall geworden.

In jüngster Vergangenheit zeigen sich aber auch wieder möglicherweise dem Integrationseffekt entgegenlaufende Trends. Deutlich wurde dies aus europäischer Sicht in den Diskussionen um die Freihandelsabkommen CETA mit Kanada sowie insbesondere TTIP mit den USA.

#### 4.4.5. Digitalisierungseffekt

Mit der Digitalisierung der Wirtschaft – oft auch als *Industrie 4.0* bezeichnet – haben Daten als Grundlage der Wertschöpfung auch in der Logistik weiter an Bedeutung gewonnen. So soll – analog zur kundenindividuellen Einzelfertigung auf Basis einer präzisen Datenlage („Losgröße 1“) – für noch mehr Kundenindividualität in der Logistik gesorgt werden. Es wird in diesem Zusammenhang auch von der vierten (industriellen) Revolution gesprochen.

Das grundsätzliche Arbeiten mit Kundendaten, d. h. das Generieren und Abschöpfen von Mehrwert durch intelligentes Verknüpfen von Informationen, ist in der Verkehrslogistik indessen nicht neu. Es wird vielmehr z. B. in Form der Routen- und Fahrzeugeinsatzplanung seit vielen Jahren erfolgreich praktiziert. Neu im Zuge der Digitalisierung sind vielmehr das durchgängige Denken in Echtzeit, sowie die Etablierung durchgängiger Datenketten vom Produzenten über den Handel bis hin zum Kunden und wieder zurück. Diese Datentransparenz und die damit verknüpften Erwartungen an eine sichere Datenübertragung und -verarbeitung stellen auch die Verkehrslogistik vor neue Herausforderungen.

Gleichzeitig bietet die aus diesem Grund erforderlich werdende ständige Vernetzung aller Akteure auf dem Transportmarkt – also auch der Fahrzeuge – neue Möglichkeiten für die Umsetzung anderer Innovationen, die ebenfalls auf Daten beruhen, wie z. B. der Automatisierung von Fahrfunktionen, der Fahrzeugortung und -disposition oder auch einem intelligenten Energie- und Lademanagement.

#### 4.4.6. Nachhaltigkeitseffekt

Nachhaltigkeit steht allgemein für die aufeinander abgestimmte Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte, sodass heutiges Handeln auch für zukünftige Generationen tragfähig bleibt. In der Speditions- und Transportwirtschaft wird Nachhaltigkeit hingegen vielfach verkürzend mit der sogenannten Grünen Logistik gleichgesetzt (Wittenbrink 2014, 295 ff.; Lohre et al. 2015, 23 ff.). Grüne Logistik fokussiert die ökologische Säule der Nachhaltigkeit, ergänzt um Fragestellungen der wirtschaftlichen Zumutbarkeit und Sinnhaftigkeit bestimmter Maßnahmen für die Unternehmen, die diese umsetzen. Angesichts der Vielzahl aktueller Fragen in der Verkehrslogistik, die vom Fachkräfte- bzw. Fahrermangel bis hin zur Zukunft des Menschen im Modell des autonomen Fahrens reichen, erscheint diese Verkürzung um die Dimension des Sozialen allerdings nicht ausreichend.

Vielmehr ist der Nachhaltigkeitseffekt auch vermehrt im Sinne des richtigen Umgangs mit Knappheit in der Logistik bzw. im Transportgewerbe zu interpretieren. Dies meint zum einen die nur begrenzte Verfügbarkeit fossiler Ressourcen und Rohstoffe, denen sich auch die Logistik zu stellen hat. Zum anderen ist unter Knappheit auch die (tatsächlich durch begrenzte Flächen und faktisch durch verfügbare finanzielle Mittel) begrenzte Verfügbarkeit von Verkehrsinfrastruktur und Logistikflächen zu sehen, die voraussichtlich großen Einfluss auf die Weiterentwicklung der Transportmärkte haben wird. Schon jetzt werden die jährlichen Staukosten in Deutschland in einer Höhe von mehr als 80 Mrd. € geschätzt (Cookson 2018, S. 34).

#### 4.5. Rechtliche Grundlagen und Regulierung des Straßengüterverkehrs

Unter Straßengüterverkehr wird die Beförderung von Gütern mit Kraftfahrzeugen auf der Straße verstanden. Straßengüterverkehr wird daher auch als *Güterkraftverkehr* bezeichnet. Die Regeln, die in der Europäischen Union für den Straßengüterverkehr gelten, sind von einem komplexen Zusammenspiel zwischen europäischem und nationalem Recht geprägt. Während insbesondere grenzüberschreitende Verkehre, der freie Marktzugang für Unternehmen, sicherheitsrelevante Fragen und ökologische Rahmenbedingungen wie z. B. Emissionsgrenzwerte europäisch geregelt werden, sind zahlreiche Regelungen zur Organisation des nationalen Güterkraftverkehrs den Mitgliedsstaaten überlassen.

Selbst wenn für O-Lkw im ersten Schritt ein nationaler Netzaufbau und -ausbau geplant werden sollte, ergeben sich aus diesen Zuständigkeiten europarechtliche Rahmenbedingungen, die es zu beachten gilt, z. B. was den Zugang zum System oder die diskriminierungsfreie Ermöglichung grenzüberschreitender Verkehre angeht. Daher soll nachfolgend zuerst auf den europäischen Kontext eingegangen werden, soweit er für den O-Lkw wesentlich ist, bevor wesentliche diesbezügliche Rahmenbedingungen in Deutschland vorgestellt werden.

##### 4.5.1. Marktliberalisierung

Seit dem Bau der ersten staatlichen Ferneisenbahnen Mitte des 19. Jahrhundert wurde der Verkehrssektor in Deutschland über Jahrzehnte hinweg als staatlich kontrollierter Ausnahmehereich vom Wettbewerb behandelt. Zur Bewahrung der Vormachtstellung der staatseigenen Eisenbahn wurden sowohl Preise als auch Kapazitäten weitreichend reguliert. Je stärker der Güterkraftverkehr seit Beginn des 20. Jahrhunderts wurde, umso intensiver wurde versucht, die Eisenbahn durch dirigistische Markteingriffe vor dem Wettbewerb zu schützen (Grandjot und Bernecker 2014, S. 110). Erst in den 1980er Jahren führte die Umsetzung des Europäischen Binnenmarktes zu Änderungen. Der Schutz der Deutschen Bundesbahn war trotz aller Marktinterventionen nicht erreicht worden, der geringe Wettbewerb auf dem Verkehrsmarkt führte zu hohen Preisen bei geringer

Innovationskraft und die strenge Überwachung des regulierten Marktes verursachte erhebliche Kontroll- und Interventionskosten auf Seiten der öffentlichen Hand (Stock und Bernecker 2014, S. 335). Insbesondere Großbritannien und die USA, wo bereits früh positive Erfahrungen mit einer Liberalisierung der Verkehrsmärkte gesammelt worden waren, sollten nun als Vorbild für eine neue Marktordnung dienen; allerdings folgten in Deutschland nur zögerliche bzw. im europäischen Vergleich verhältnismäßig späte konkrete Maßnahmen.

Die Europäische Kommission verfolgte hingegen von Beginn an das Ziel einer möglichst weitreichenden Harmonisierung und Deregulierung des Verkehrs- und Transportmarktes. Hierzu konkretisierte sie die bereits in den Römischen Verträgen von 1957 verankerten Grundsätze eines dem Wettbewerb unterworfenen Güterverkehrssektors in mehreren Aktionsprogrammen und zahlreichen Einzelvorschlägen, welche jedoch im Ministerrat bis in die 1980er Jahre hinein weitestgehend auf Ablehnung stießen. Erst das sogenannte Untätigkeitsurteil des EuGH vom 22. Mai 1985 brachte spürbar Bewegung in die europäische Verkehrspolitik (Grandjot und Bernecker 2014, S. 100–101). Nach Verabschiedung der Mailänder Beschlüsse vom 30. Juni 1985 waren alle Mitgliedstaaten der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft verpflichtet, spätestens bis zum 31. Dezember 1992, d. h. bis zur Vollendung des Binnenmarkts, die Dienstleistungsfreiheit im grenzüberschreitenden Verkehr herbeizuführen. Die nationale Politik war damit gezwungen, in relativ kurzer Zeit den (Güter-)Verkehrsmarkt in Deutschland neu zu ordnen. Sie tat dies mit einer ganzen Reihe grundlegender Reformen, aus denen institutionell unter anderem die materielle Privatisierung der Lufthansa (abgeschlossen 1994) sowie die Bahnreform mit der Gründung der Deutschen Bahn AG (1994) herausragen. Im Straßengüterverkehr sind die Aufhebung der Tarifpflicht im Güterkraftverkehr (1994) und das Ende der Kontingentierung (1998) hervorzuheben (Schwedde et al. 2016, S. 111), und damit der Übergang vom geordneten zum freien Markt. Heute teilt sich die EU die Zuständigkeiten für den Verkehrsmarkt mit den Mitgliedsstaaten (Art. 4 Abs. 2 AEUV). Die Überwachung der Deregulierung und Harmonisierung des europäischen Verkehrsmarktes ist dabei ein wichtiges verkehrspolitisches Aufgabengebiet der EU (Art. 95-97 AEUV). Die wesentlichen Grundsätze für den freien Warenverkehr in der Europäischen Union sind seit dem Vertrag von Lissabon in Art. 26 Abs. 2 EUV festgelegt. Speziell für den Landverkehr finden sich zudem ausführliche Bestimmungen zur Rolle der EU in Titel VI des AEUV:

„Nach Art. 91 AEUV umfasst die gemeinsame Verkehrspolitik für die drei Verkehrsträger im Landverkehr insbesondere:

- das Aufstellen von Regeln für den internationalen Verkehr aus oder nach dem Hoheitsgebiet eines Mitgliedstaats oder für den Durchgangsverkehr durch das Hoheitsgebiet eines oder mehrerer Mitgliedstaaten,
- die Festlegung der Bedingungen für die Zulassung von Verkehrsunternehmen zum Verkehr innerhalb eines Mitgliedstaates, in dem sie nicht ansässig sind,
- Maßnahmen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit.“ (Grandjot und Bernecker 2014, S. 98).

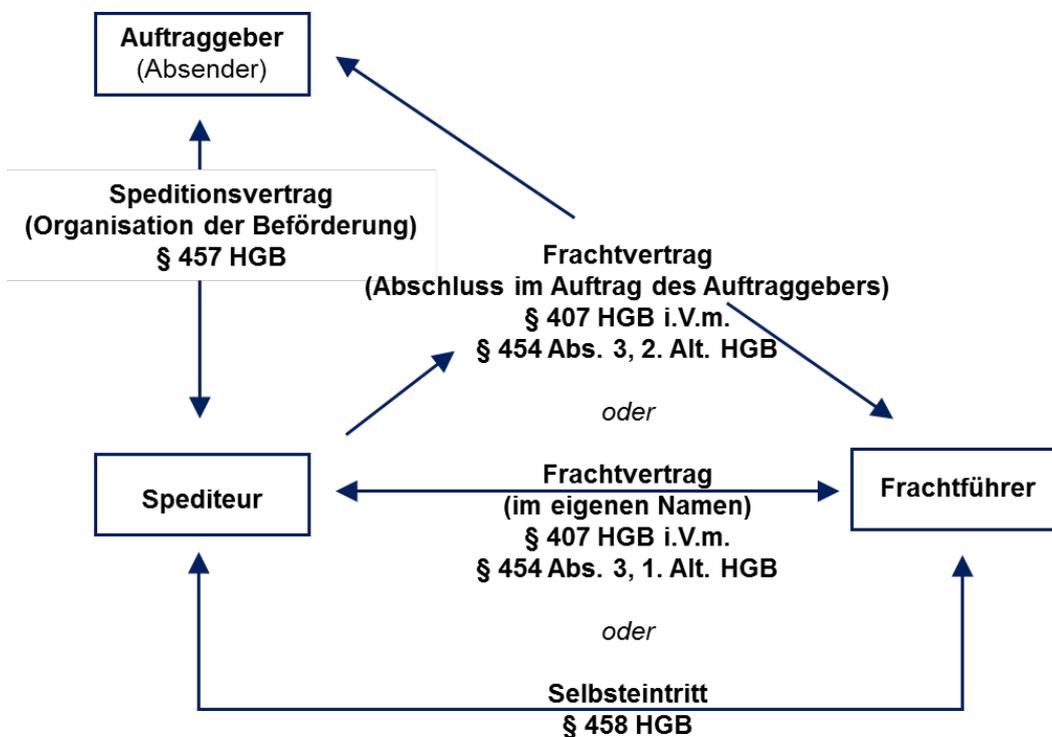
Von zentraler Bedeutung bei einer Einführung des Regelbetriebs mit O-Lkw im Straßengüterverkehr ist dabei insbesondere die Verpflichtung, dieses System so auszugestalten, dass zumindest im grenzüberschreitenden Verkehr der faire Wettbewerb zwischen den Transportunternehmen nicht gefährdet ist. Dies bedeutet zum einen, dass der Zugang zu der Oberleitung grundsätzlich allen Interessierten ermöglicht werden muss (sofern die technischen und administrativen Voraussetzungen erfüllt sind), zum anderen aber auch, dass (grenzüberschreitender) Straßengüterfernverkehr in Deutschland nicht alleine aufgrund der Nichtnutzung der Oberleitung untersagt werden darf.

Parallelen zur Ausgestaltung z. B. von Lkw-Mautsystemen, die europarechtlich für zulässig befunden wurden, zeigen hingegen, dass eine Besserstellung von Fahrzeugen, die bestimmte, rechtlich klar definierte Voraussetzungen erfüllen (z. B. Emissionsfreiheit), durchaus möglich ist.

#### 4.5.2. Frachtführer und Spediteur

Die Implementierung des O-Lkw erfordert eine Ansprache der richtigen Akteure. Dies sind neben den Fahrzeugherstellern zunächst einmal die (potenziellen) Betreiber und Nachfrager nach den Fahrzeugen auf dem Speditions- und dem Transportmarkt, also Spediteure und Frachtführer (siehe auch Kapitel 4.3). Die einschlägigen Definitionen, Unterscheidungsmerkmale und Regelungen hierzu finden sich in Deutschland im Handelsgesetzbuch (HGB). Die Regelungen zum Frachtgeschäft stehen dabei im vierten Abschnitt des vierten Buches (§§ 407-452d HGB), die Regelungen zum Speditionsgeschäft im fünften Abschnitt (§§ 453-466 HGB) (siehe Abbildung 4-3).

**Abbildung 4-3: Wesentliche Rechtsbeziehungen im Güterkraftverkehr**



Quelle: Eigene Darstellung

Die Nachfrage auf dem Transportmarkt leitet sich vom Gütermarkt ab. Werden dort Transaktionen getätigt, die einen Eigentums- bzw. Besitzübergang von (materiellen) Gütern vorsehen, so wird regelmäßig ein Transport erforderlich. Diesen zu organisieren ist die Aufgabe des Spediteurs. Für die Durchführung des Transports zum Käufer zeichnet der Frachtführer verantwortlich. Zwischen ihm und dem Absender wird ein Frachtvertrag geschlossen, durch welchen der Frachtführer den Transport und der Verkäufer (Absender) die Frachtzahlung schuldet (§ 407 HGB).

Der Spediteur dient hingegen als Mittelsmann zwischen dem Verkäufer (Absender) sowie dem Frachtführer. Die Transaktion zwischen Käufer und Verkäufer begründet nämlich in aller Regel zunächst einen Speditionsvertrag zwischen Verkäufer (Auftraggeber) und Spediteur (§ 453 HGB). Durch den Speditionsvertrag schuldet der Spediteur die Besorgung der Versendung und der

Verkäufer (Auftraggeber) dessen Vergütung. Der Spediteur organisiert sodann einen Frachtführer, mit welchem anschließend – entweder auf eigene Rechnung bei Sammelgutverkehren oder im Namen des Absenders bei Ladungsverkehren – ein Frachtvertrag abgeschlossen wird (§ 407 HGB). Im Frachtvertrag schuldet der Frachtführer den Transport, der Spediteur bzw. der Absender dessen Vergütung.

Anstatt einen Dritten als Frachtführer zu beauftragen, kann der Spediteur – sofern er über die erforderliche Erlaubnis verfügt – einen Transport auch selbst ausführen. Bei diesem sogenannten Selbsteintritt werden Rechte und Pflichten des Frachtführers also ebenfalls auf den Spediteur übertragen (§ 458 HGB). Der Selbsteintritt ist im Güterkraftverkehr in Deutschland üblich: rund 40 % der Expeditionen sind derzeit selbst im Güterfernverkehr mit eigenen Lkw tätig, rund 50 % im Nahverkehr (DSL 2015, S. 9).

Zusammengefasst bedeutet dies: Der Spediteur organisiert den Transport, der Frachtführer führt diesen aus. Beide Aufgaben können jedoch auch von demselben Akteur übernommen werden.

#### **4.5.3. Gewerblicher Verkehr und Werkverkehr**

Eine weitere, für die Identifizierung potenzieller Betreiber von O-Lkw relevante Unterteilung des Güterkraftverkehrs nimmt das Güterkraftverkehrsgesetz (GüKG) vor. Dort wird zwischen gewerblichem Güterkraftverkehr sowie Werkverkehr unterschieden. Gewerblicher Güterkraftverkehr ist dabei grundsätzlich erlaubnispflichtig (§ 3 GüKG). Der Fuhrunternehmer muss nachweisen, dass er die geltenden Voraussetzungen nach § 3 Abs. 1 der Verordnung (EG) Nr. 1071/2009 für die Zulassung und Ausübung des Berufs als Kraftfahrunternehmer erfüllt. Ist die Erlaubnis ausgestellt, so unterliegt der Fuhrunternehmer u.a. einer Versicherungspflicht (§ 7a GüKG), welche eine Absicherung gegen Güter- und Verspätungsschäden vorsieht. Nachweise über die Erfüllung dieser Pflichten müssen auf Fahrten stets mitgeführt werden.

Als gewerblicher Güterkraftverkehr gilt dabei die entgeltliche Beförderung von Gütern mit Kraftfahrzeugen über 3,5 Tonnen zulässiger Gesamtmasse, sofern die Bedingungen für den Werkverkehr nicht erfüllt sind. Als Werkverkehr gilt ein Transport nach § 1 Abs. 2 GüKG dann, wenn er für eigene Zwecke des Unternehmens, sprich nicht für Dritte, durchgeführt wird. Es gilt insbesondere:

1. Die beförderten Güter müssen Eigentum des Unternehmens oder von ihm verkauft, gekauft, vermietet, gemietet, hergestellt, erzeugt, gewonnen, bearbeitet oder instandgesetzt worden sein.
2. Die Beförderung muss der Anlieferung der Güter zum Unternehmen, ihren Versand vom Unternehmen, ihrer Verbringung innerhalb oder – zum Eigengebrauch – außerhalb des Unternehmens dienen.
3. Die für die Beförderung verwendeten Kraftfahrzeuge müssen vom eigenen Personal des Unternehmens geführt werden oder von Personal, das dem Unternehmen im Rahmen einer vertraglichen Verpflichtung zur Verfügung gestellt worden ist.
4. Die Beförderung darf nur eine Hilfstätigkeit im Rahmen der gesamten Tätigkeit des Unternehmens darstellen.

Im Werkverkehr bestehen weder eine Erlaubnis- noch eine Versicherungspflicht (§ 9 GüKG), sehr wohl jedoch eine Meldepflicht (§ 15 a Abs. 2 GüKG). Typische Beispiele für Werkverkehre sind etwa die Materialversorgung eigener Baustellen, die Belieferung einer eigenen Filialstruktur mit eigenen Fahrzeugen oder eine selbst durchgeführte Warenauslieferung zum Kunden.

Derzeit sind rund 85 % der Gütertransportleistung mit deutschen Lkw dem gewerblichen Verkehr und rund 15 % dem Werkverkehr zuzuordnen. Hingegen hat der Werkverkehr mit rund 25 % einen deutlich höheren Anteil an der beförderten Tonnage, da es sich beim Werkverkehr relativ häufig um Transporte von Steinen und Erden auf relativ kurzen Distanzen (Baustellenverkehre) handelt (BGL 2016, S. 36).

#### 4.5.4. Nutzfahrzeugklassen, Bestand und Fahrleistungen

Die Vorstudien zu O-Lkw fokussieren insbesondere aus technischen und ökonomischen Gründen zwei Fahrzeug-Konfigurationen, nämlich zum einen den Sattelzug (Sattelzugmaschine mit aufgesatteltem Auflieger bzw. Trailer) sowie zum anderen die Kombination aus Motorwagen und Anhänger (Gliederzug). Dennoch erscheint es geboten, vor dem Hintergrund verschiedener Markthochlaufszenarien einen kurzen Überblick über die Bedeutung dieser und anderer Arten von Nutzfahrzeugen für den Straßentransportmarkt zu geben. Die wichtigsten Regelungen zu Nutzfahrzeugen gehen dabei wiederum auf Europäisches Recht zurück, insbesondere auf die Richtlinie 97/27/EG über die Massen und Abmessungen bestimmter Klassen von Kraftfahrzeugen sowie die Richtlinie 2007/46/EG über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen.

Gemäß Anhang II, Buchstabe A, Nr. 2 der Richtlinie 2007/46/EG werden für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit mindestens vier Rädern („Nutzfahrzeuge“) in drei Klassen unterteilt:

- Klasse N 1 („leichte Nutzfahrzeuge“): Für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von bis zu 3,5 t.
- Klasse N 2 („mittelschwere Nutzfahrzeuge“): Für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 3,5 t und bis zu 12 t.
- Klasse N 3 („schwere Nutzfahrzeuge“): Für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 12 t.

Hinsichtlich der Art der Fahrzeuge wird in der Richtlinie unter Buchstabe C, Nr. 2 bei Nutzfahrzeugen weiter unterschieden in:

- Lastkraftwagen, d. h. „ausschließlich oder überwiegend für die Beförderung von Gütern bestimmte und gebaute Kraftfahrzeuge“,
- Vans, d. h. „Lkw mit in den Aufbau integriertem Führerhaus“,
- Sattelzugmaschinen, d. h. „Zugmaschinen, die ausschließlich oder überwiegend zum Ziehen von Sattelanhängern bestimmt und gebaut sind“,
- Straßenzugmaschinen, d. h. „Zugmaschinen (mit oder ohne Ladefläche), die ausschließlich oder überwiegend zum Ziehen von Anhängern mit Ausnahme von Sattelanhängern bestimmt und gebaut sind“.

In Deutschland sind im Güterkraftverkehr ab 3,5 t derzeit rund 600.000 inländische Motorfahrzeuge (davon rund 63 % im gewerblichen Verkehr) sowie rund 430.000 Anhänger und Auflieger (davon rund 69 % im gewerblichen Verkehr) im Einsatz. Die insgesamt verfügbare Ladekapazität liegt dabei bei rund 11 Mio. t (siehe Tabelle 4-6).

**Tabelle 4-6: Nutzfahrzeugbestand Deutschland 2015**

Fahrzeugart	Gewerblicher Verkehr	Werkverkehr	Ladekapazität (t)
Motorfahrzeuge	379.582	221.146	3.129.501
- darunter Lkw	209.076	176.462	3.129.501
- darunter Sattelzugmaschinen	170.506	44.684	-
Anhänger	293.771	134.271	9.787.160
- darunter Lkw-Anhänger	90.390	77.753	1.913.159
- darunter Sattelauflieger	203.381	56.518	7.874.001

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnungen nach BGL 2016, S. 7 und 19

Im Güterfernverkehr kommen überwiegend schwere Sattel- und Gliederzüge mit bis zu 40 t zulässigem Gesamtgewicht zum Einsatz. Auf sie entfällt rund 80 % der Lkw-Fahrleistung auf Autobahnen (Bäumer et al. 2017, S. 70). Insbesondere der Sattelzug, d. h. die Kombination aus Zugmaschine und Auflieger, hat sich dabei aufgrund seiner Flexibilität, verhältnismäßig guten Fahreigenschaften und der einfachen Be- und Entladbarkeit wegen der – anders als beim Gliederzug – durchgehenden Ladefläche als „Standardfahrzeug“ im Fernverkehr durchgesetzt. Auch wenn mit rund 170.000 zugelassenen Sattelzugmaschinen deutlich weniger Fahrzeuge als herkömmliche Lkw (rund 210.000) in deutschen Unternehmen zur Verfügung stehen, decken Sattelzüge aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften 68,5 % der im deutschen Straßengütertransport vorhandenen Ladekapazitäten ab (BGL 2016, S. 7).

Sattelzüge fahren oft auch weitere Strecken: So erbringen alle Sattelzüge in Deutschland eine um 50 % höhere Fahrleistung als sämtliche Lkw über sechs Tonnen zusammengenommen (KBA 2018a, S. 2). Der Anteil ausländischer Fahrzeuge (Lkw und Sattelzüge) an dieser Fahrleistung beträgt 35 % und an der Transportleistung 38 %. Der Anteil ausländischer Fahrzeuge nimmt im Straßengüterverkehr dabei weiterhin zu (BGL 2016, S. 36; Bäumer et al. 2017, S. 77). Betrachtet man z. B. die Bundess Autobahnen detaillierter, so lässt sich feststellen, dass 21 % der Lkw ohne Anhänger, 36 % der Lkw mit Anhänger sowie 41 % der Sattelzüge sog. gebietsfremde Fahrzeuge sind, d. h. im Ausland zugelassen sind (Bäumer et al. 2017, S. 77). Bezogen auf die Gesamtfahrleistung mit Nutzfahrzeugen liegt der Anteil gebietsfremder Fahrzeuge bei rund 15 % (siehe Tabelle 4-7).

**Tabelle 4-7: Inlands-Fahrleistung mit Nutzfahrzeugen 2014**

Unternehmen	Fahrleistung (Mio. Fzg-km)	Anteil Autobahn	Anteil gebietsfremde Fahrzeuge
Lieferwagen	51.778	36,9 %	5,4 %
Lkw ohne Anhänger	22.391	31,7 %	9,1 %
Lkw mit Anhänger	16.622	68,1 %	27,1 %
Sattelzüge	26.245	63,4 %	31,7 %
Nutzfahrzeuge	117.036	46,3 %	15,1 %

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnungen nach Bäumer et al. 2017, S. 70 und 74

Der hohe Fahrleistungsanteil im Güterkraftverkehr, der auf den Autobahnen erbracht wird, die zwar nur rund 1,5 % der Straßennetzlänge in Deutschland ausmachen (Bäumer et al. 2017, S. 27), auf

denen aber mehr als 45 % des Verkehrs mit allen Nutzfahrzeugen und rund zwei Drittel des Verkehrs mit schweren Nutzfahrzeugen stattfinden, lässt eine Fokussierung auf die Autobahnen beim O-Lkw besonders sinnvoll erscheinen, da dieser eine besondere Streckenausrüstung (Fahrleitungsanlage) erfordert. Das deutsche Autobahnnetz erscheint dabei nicht nur aufgrund seiner zentraleuropäischen Lage als Keimzelle eines solchen Netzes besonders gut geeignet: Im europäischen Vergleich entfallen auf Deutschland rund 23 % der unionsweiten Transportleistung im Straßengüterverkehr, was mit Abstand der höchste Anteil aller Mitgliedsstaaten ist (Europäische Union 2018, S. 38). Differenziert man den Bestand der inländischen Nutzfahrzeuge nach Herstellern, so ist eine relativ geordnete Marktstruktur erkennbar. Während bei Lkw und Sattelzugmaschinen überwiegend die gleichen Hersteller eine führende Rolle einnehmen und im Wettbewerb zueinanderstehen, ist der Bau von Aufliegern nahezu vollständig in den Händen anderer Unternehmen, die hier miteinander im Wettbewerb stehen (siehe Tabelle 4-8).

**Tabelle 4-8: Nutzfahrzeug- und Aufliegerbestand nach Herstellern 2017**

Unternehmen	Anzahl	Anteil
<b>Lkw</b>		
Daimler	729.725	25,1 %
Volkswagen	684.566	23,5 %
Ford	248.629	8,5 %
Renault	184.591	6,3 %
Fiat Chrysler	181.725	6,2 %
MAN Nutzfahrzeuge	125.122	4,3 %
Andere	757.549	26,1 %
<b>Sattelzugmaschinen</b>		
Daimler	65.179	32,3 %
MAN Nutzfahrzeuge	50.431	25,0 %
DAF	26.641	13,2 %
Scania	23.583	11,7 %
Volvo	20.168	10,0 %
Iveco-Magirus	10.560	5,2 %
Renault	4.399	2,2 %
Sonstige	1.023	0,4 %
<b>Auflieger und Anhänger (Auswahl)</b>		
Schmitz Cargobull	101.936	-
Krone	81.866	-
Kögel	34.111	-

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnungen nach KBA 2018b, S. 8–11

Der O-Lkw verfügt mit dem fest installierten Stromabnehmer und der zugehörigen Leistungselektronik sowie – in Abhängigkeit von der Konfiguration – Batterien über zusätzliche Komponenten. Insofern sind für dieses Fahrzeuge die zulässigen Fahrzeugmaße und -gewichte von besonderer Bedeutung. Wiederum sind diese für den grenzüberschreitenden Güterkraftverkehr über die Richtlinie 97/27/EG innerhalb der Europäischen Union harmonisiert. Hingegen sind für den nationalen Verkehr auch Ausnahmen bzw. Abweichungen von den Standards für den grenzüberschreitenden Verkehr zulässig. So gelten beispielsweise für Deutschland folgenden Regelungen:

- Eine zulässige Gesamtmasse von bis zu 40 t (bei Einhaltung der Achslastgrenzen) für Sattel- und Gliederzüge mit mehr als 4 Achsen (§ 34 Abs. 6 Nr. 5 StVZO)
- Eine zulässige Gesamtmasse von bis zu 44 t für Sattelzüge bei Einsatz im Vor- und Nachlauf des Kombinierten Verkehr (§ 34 Abs. 6 Nr. 6 StVZO)
- Eine maximale Fahrzeugbreite von 2,55 m (bei Kühlaufbauten 2,60 m) (§ 32 Abs. 1 StVZO)
- Eine maximale Fahrzeughöhe von 4,00 m (§ 32 Abs. 2 StVZO)
- Eine maximale Fahrzeuglänge von 16,50 m (Sattelzug) bzw. 18,75 m (Gliederzug) (§ 32 Abs. 4 StVZO)
- Eine maximale Fahrzeuglänge von 17,80 m (verlängerter Sattelaufleger auf dem Positivnetz, befristet bis 31.12.2023), sofern die Voraussetzungen hierfür erfüllt sind (§ 4 Nr. 1 i.V.m. § 5 LkwÜberlStVAusnV)
- Eine maximale Fahrzeuglänge von 25,25 m (Lang-Lkw Typ 2 bis 4 auf dem Positivnetz) (§ 4 Nr. 2 i.V.m. § 5 LkwÜberlStVAusnV)

#### 4.5.5. Der Lkw im Kombinierten Verkehr Straße/Schiene/Schiff

Eine wichtige Rolle in der Diskussion um eine nachhaltige Gestaltung des Gütertransportmarktes spielt der sogenannte Kombinierte Verkehr. Potenzielle Wechselwirkungen zwischen der Entwicklung des kombinierten Verkehrs und der Einführung des O-Lkw sind daher von großem Interesse.

Der Begriff des Kombinierten Verkehrs steht für alle Haus-zu-Haus-Transportketten, bei denen mindestens zwei Verkehrsträger genutzt werden und ein standardisierter Ladungsbehälter zum Einsatz kommt. Dabei wird im Vor- und Nachlauf üblicherweise die Straße genutzt. Der Hauptlauf findet mit der Bahn oder mit dem Schiff statt. In der EU-Richtlinie 92/106/EWG wird Kombiniertes Verkehr noch etwas präziser definiert als jeder Transport, dessen Vor- und Nachlauf auf der Straße, der Hauptlauf jedoch über einen anderen Verkehrsträger (Schiene, Binnenwasserstraße, auf See) erfolgt. Des Weiteren muss direkt am nächstmöglichen geeigneten Umschlagbahnhof (innerhalb eines 150 km Radius um den Lagerort des Transportgutes) auf den Hauptlauf umgeschlagen werden und erst am letztmöglichen Umschlagbahnhof (innerhalb eines 150 km Radius um den Zielort des Transportgutes) auf den Nachlauf umgeschlagen werden. Der Hauptlauf muss zudem beim Schifftransport mindestens 100 km Luftlinie betragen.

Die Rolle des Straßengüterverkehrs im Kombinierten Verkehr ist also darauf konzentriert, die zu transportierenden Güter in der Fläche einzusammeln (Flächenerschließung) und zu zentralen Punkten (Terminals) zu verbringen. Hingegen ist die Raumüberwindung im Hauptlauf Aufgabe der Eisenbahn oder des Schiffs. Erst am Zielbahnhof bzw. Zielhafen wird wieder mit Hilfe eines Lkw eine Verteilung zu den Bestimmungspunkten auf der Straße vorgenommen. Alternativ hierzu kann der Start- oder Endpunkt des Hauptlaufs im Kombinierten Verkehr auch ein Seehafen sein, an dem eine direkte Umladung auf oder von einem Hochsee-(Container-)Schiff stattfindet.

Um die erforderlichen Umladevorgänge zu standardisieren, verbleibt das eigentliche Transportgut während des gesamten Transports in einem standardisierten Ladungsbehälter (Intermodalität). Zwischen den Verkehrsträgern umgeladen werden also nicht die einzelnen Güter, sondern Ladungsbehälter bzw. Ladeeinheiten. Als Ladeeinheiten finden dabei im sog. *unbegleiteten Verkehr* insbesondere ISO-Container und Wechselbehälter, aber auch sogenannte kranbare Sattelaufleger (Trailer) Verwendung. Im *begleiteten Verkehr* werden komplette Lkw abschnittsweise mit der Eisenbahn transportiert.

Der Kombinierte Verkehr in Europa ist zum einen Seehafen-Hinterlandverkehr, d. h. er dient dem Zweck, Seecontainer nach der Entladung gebündelt zum Bestimmungsort weiterzubefördern bzw. gebündelt am Hafen zur Verschiffung anzuliefern. Diese Verkehre werden als *maritime Verkehre* bezeichnet. Zum anderen wird der Kombinierte Verkehr für die abschnittsweise Verlagerung von langlaufenden Lkw-Verkehren auf die Schiene genutzt, z. B. zur Alpenüberquerung. Diese Verkehre werden als *kontinentale Verkehre* bezeichnet.

Im Ergebnis haben diese unterschiedlichen Varianten des Kombinierten Verkehrs zu drei weitgehend unabhängig voneinander betriebenen Systemen des Kombinierten Verkehrs in Europa geführt:

- Beim *begleiteten kontinentalen Verkehr* begleitet der Fahrer der selbstfahrenden Einheit (z. B. Lkw, Sattelzug) den abschnittswisen Transport der Einheit auf der Schiene in einem Liege- oder Schlafwagen. Der begleitete Verkehr wird auch als Rollende Landstraße bezeichnet und findet im Hauptlauf ausschließlich per Eisenbahn statt.
- Beim *unbegleiteten kontinentalen Verkehr* wird nur die Ladeinheit (z. B. Container, Anhänger, Wechselbehälter) abschnittsweise mit dem Zug oder Schiff transportiert. Die Zugmaschine und ggf. das Chassis verbleiben am Terminal und können dort direkt die nächste Ladeinheit aufnehmen.
- Ähnliches gilt für den *unbegleiteten maritimen Verkehr* (Seehafen-Hinterlandverkehr), bei dem ebenfalls nur die Ladeinheit per Zug oder Binnenschiff transportiert wird. Aufgrund der erforderlichen Kompatibilität mit den Normen im internationalen Seecontainerverkehr, die unter anderem eine Stapelbarkeit der Ladeeinheiten verlangen, werden im maritimen Verkehr ausschließlich ISO-Container befördert.

Der Gesetzgeber fördert den Kombinierten Verkehr mit einigen Sonderregelungen, die speziell den Straßentransport auf dem Vor- und Nachlauf gegenüber einem reinen Straßentransport bevorzugen sollen.

- Da die speziellen ISO-Container des kombinierten Verkehrs aufgrund der nötigen Umschläge deutlich stabiler konstruiert sind als im herkömmlichen Straßenverkehr, weisen diese auch ein deutlich höheres Leergewicht auf (Doderer und Paulson, S. 23). Damit durch die notwendige Mitnahme eines geeigneten Behälters (Wechselbehälter, Container, kranbarer Sattelaufleger) keine Nachteile im Sinne der Zuladefähigkeit entstehen, gilt für Fahrzeuge, welche im kombinierten Verkehr unterwegs sind eine maximal zugelassene Gesamtmasse von 44 t statt regulär 40 t (§ 34 Abs. 6 Nr. 6 StVZO).
- Fahrzeuge, welchen ausschließlich im Vor- oder Nachlauf eines Kombinierten Verkehrs eingesetzt werden, sind nach § 3 Nr. 9 KraftStG von der Steuerpflicht befreit. Voraussetzung für die Steuerbefreiung ist neben dem ausschließlichen Einsatz des Fahrzeugs im Kombinierten Verkehr, dass im Kombinierten Verkehr Straße/Schiene der nächstgelegene geeignete Umschlagbahnhof, im Kombinierten Verkehr Straße/Binnenschiff ein höchstens 150 km Luftlinie entfernter Binnenhafen oder im Kombinierten Verkehr Straße/Seeschiff ein höchstens 150 km Luftlinie entfernter Seehafen angefahren wird, und die Seestrecke mindestens 100 km beträgt.
- Neben der Steuerbefreiung sieht § 4 KraftStG die Möglichkeit der nachträglichen Rückerstattung der Steuer vor, wenn das Fahrzeug in einem bestimmten Umfang mit der Eisenbahn befördert worden ist (z. B. im begleiteten Kombinierten Verkehr).
- Nach § 30 Abs. 3 Nr. 1 und 1a StVO gilt in Deutschland an Sonn- und Feiertagen ein Fahrverbot in großen Teilen des gewerblichen Güterkraftverkehrs. Fahrzeuge im Kombinierten Verkehr sind auch hiervon ausgenommen.

## 4.6. Die Transportdurchführung im Güterkraftverkehr

Die Auswahl des Fahrzeugs, das im Güterkraftverkehr jeweils zum Einsatz kommt, sowie dessen letztendliches Einsatzprofil richten sich ganz wesentlich danach, welche Art von Transport durchzuführen ist und wie die Transportdurchführung organisiert ist. Unterschieden wird zunächst in eingliedrige (bzw. ungebrochene) und mehrgliedrige (gebrochene) Transportketten. Eingliedrig bedeutet, dass ein Direktverkehr vom Verloader zum Empfänger ohne Wechsel des Transportmittels erfolgt. Dies wird auch als sogenannter *Direktverkehr* bezeichnet. In mehrgliedrigen Transportketten findet entsprechend ein Wechsel des Transportmittels durch Umladen statt. Das Umladen der Waren erfolgt meist an einer Umschlagbasis bzw. einem Depot. Daher werden diese Verkehre auch als sogenannte *Hub-Verkehre* bezeichnet (Muchna et al. 2018, S. 141).

Mit der Entscheidung für einen Direktverkehr oder einen Hub-Verkehr wird zumeist auch eine Entscheidung über die Anzahl der Kunden getroffen, die Ladungseigentümer und Auftraggeber eines Transports sind. Unterschieden wird hierbei in Ladungsverkehre einerseits und Stückgutverkehre andererseits.

### 4.6.1. Ladungsverkehre

Bei einem Ladungsverkehr werden Güter zu einer Ladeeinheit zusammengefasst, welche als Einheit direkt vom Versender zum Empfänger transportiert wird. Ladungsverkehre sind somit ungebrochene Verkehre. Bei Komplettladungen (Full Truck Load; FTL) wird ein Fahrzeug durch eine Sendung komplett ausgelastet. Bei Teilladungen (Less than Truck Load; LTL) lastet eine Sendung das Fahrzeug nur zum Teil aus, sodass aus ökonomischen Gründen weitere Teilladungen aus der Umgebung des Versenders abgeholt werden, bei welchen der Empfänger ebenfalls im Zielgebiet liegt.

Der Ladungsverkehr ist in der Praxis in der Regel ab einem Sendungsgewicht von ca. 1.500-2.000 kg attraktiv. Der wirtschaftliche Vorteil für Ladungsverkehre liegt in der Ersparnis, die sich daraus ergibt, dass keine Sammel-, Verteil- oder Umschlagsaktivitäten stattfinden (BMVI 2016). Hieraus ergeben sich jedoch auch einige Nachteile. So ist häufig nach Erreichen des Zielgebiets die erlaubte Lenkzeit eines Fahrers weitgehend erschöpft, so dass dieser eine Ruhezeit anschließen muss. Hinzu kommt, dass die langen Unterwegszeiten sich meist negativ auf die Arbeitszufriedenheit der Fahrer auswirken und entsprechend höhere Spesen gezahlt werden müssen. Der größte Nachteil allerdings ist in der geringen zeitlichen Kapazitätsauslastung des Fahrzeuges bzw. in der Notwendigkeit der Akquisition der sog. Rückfrachten zur Vermeidung von übermäßigen Leerfahrten zu sehen (Clausen und Geiger 2013, S. 146).

### 4.6.2. Stückgutverkehre

Kleinere Sendungen werden aus ökonomischen Gründen üblicherweise nicht als Ladungsverkehre gefahren, da sich eine deutlich zu geringe Auslastung der Fahrzeuge ergäbe. Im Stückgutverkehr (gleichbedeutend mit Sammelgutverkehr) werden hingegen mehrere – meist relativ kleine – Einzelsendungen in einem Gebiet gesammelt und konsolidiert, um so Bündelungspotenziale zu erschließen und eine bessere Auslastung der Fahrzeuge zu erreichen. Hierfür sind mehrgliedrige Transportketten erforderlich. Dabei findet unterwegs mindestens ein Umschlag mit einem Wechsel des Transportmittels statt. Die klassische mehrgliedrige Transportkette setzt sich aus drei Kettengliedern zusammen: Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf. Während Vorlauf und Nachlauf der Flächenerschließung dienen, ist die Aufgabe des Hauptlaufes die Überwindung der Distanz (Clausen und Geiger 2013, S. 147):

- Im Vorlauf werden vom Versandspediteur, teils mit kleinen Fahrzeugen, Sendungen jeglicher Art bei diversen Kunden innerhalb eines Gebietes abgeholt.
- Anschließend werden die Einzelsendungen nach Verkehrsrichtungen (Relationen) geordnet, zu geschlossenen Ladungen zusammengefasst und in den Hauptlauf übergeben.
- Im Hauptlauf erfolgt der Transport der Sammelladung, meist mit großen Fahrzeugen, zum Empfangspediteur.
- Dort wird die Ladung wiederum in Einzelsendungen dekonsolidiert und nach Zustellbezirken in der Zielregion sortiert.
- Im Nachlauf werden die Sendungen an die einzelnen Empfänger ausgeliefert (Brandenburg et al. 2016, S. 268 ff.).

Löst man die Hauptläufe aus der Sammelgutabwicklung heraus und betrachtet sie isoliert, so nehmen sie als Punkt-Punkt-Verkehre den Charakter von Komplettladungen (FTL) an. Die Rechtfertigung für die Zeit und Kosten verursachenden Umschlagvorgänge liegt im Nutzen der Bündelung.

Hauptläufe mit ihrer hohen Auslastung, der Punkt-zu-Punkt-Charakteristik und einer hohen Regelmäßigkeit erscheinen besonders attraktiv für die sogenannte „Industrialisierung“ von Verkehren (Lohre et al. 2014, S. 13 und 35). Aufgrund ihrer Regelmäßigkeit und einer guten Planbarkeit sind sie für eine oberleitungsgebundene Elektrifizierung von Verkehren besonders interessant.

#### 4.6.3. Tramp-, Linien- und Systemverkehre

Die Regelmäßigkeit von Verkehren – und damit die Verlässlichkeit, mit der sich ein bestimmtes Fahrzeugaufkommen bzw. der regelmäßige Einsatz eines bestimmten Fahrzeuges auf einem bestimmten Streckenabschnitt prognostizieren lässt – ist von großer Bedeutung für die Frage, wann der wirtschaftliche Einsatz eines O-Lkw möglich wird. Nach der Regelmäßigkeit von Transporten kann man grundsätzlich *Trampverkehr* und *Linienverkehr* voneinander unterscheiden.

Trampverkehre werden ausschließlich nach Auftrag durchgeführt. In aller Regel sind Trampverkehre damit Ladungsverkehre (FTL oder LTL). Die Planbarkeit des Fahrzeugeinsatzes ist im Gegensatz zu Linienverkehren stark eingeschränkt. Bei Linienverkehren erfolgen die Transporte nach einem festen Fahrplan. Hier kann wiederum die Auslastung der Fahrzeuge schwieriger prognostiziert werden, da sie von der jeweiligen Auftragslage abhängt (Clausen und Geiger 2013, S. 209).

Eine Weiterentwicklung des Linien- und Stückgutverkehrs stellt der sogenannte Systemverkehr dar. Die Grundstruktur des Systemverkehrs entspricht zunächst dem Stückgutverkehr, d. h. es handelt sich um gebrochene Verkehre: Im Folgenden werden verschiedene Ansätze zur Systematisierung von Verkehren vorgestellt, wobei jeweils nur der Hauptlauf betrachtet wird.

#### Abbildung 4-4: Hubverkehr



Quelle: Eigene Darstellung

Immer dann, wenn für eine direkte Verbindung zwischen zwei Punkten nicht ausreichend Menge vorhanden ist, bietet es sich an, eine zusätzliche Konsolidierungsstufe über einen Hub zu nutzen. In *Hubverkehren* werden die Hauptläufe in zwei Teilen durchgeführt, wie in Abbildung 4-4 zu sehen: In

Hauptlauf 1 werden Sendungen vom Abgangsdepot zum Hub transportiert und, nachdem sie dort noch stärker gebündelt wurden, in Hauptlauf 2 zu einem Empfangsdepot gebracht.

Ein Fahrzeug führt dabei in der Regel einen Umlauf (Hauptlauf 1 zum Hub und Hauptlauf 2 zurück zum Depot) durch, je nach Entfernung und Sendungsaufkommen auch mehrmals täglich. Hubverkehre finden in der Regel aber mindestens täglich bzw. in jeder Nacht statt und folgen fest definierten Fahrplänen (Martin 2016, S. 332).

#### Abbildung 4-5: Depotverkehr



Quelle: Eigene Darstellung

Ist ein Fahrzeug bereits ausgelastet, so lohnt es nicht, den Umweg über einen Hub in Kauf zu nehmen. Es erfolgt eine direkte Verbindung von Abgangs- und Empfangsdepot im sog. *Depotverkehr* (Abbildung 4-5). Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit solcher Direktverkehre sind Umläufe mit hoher Paarigkeit zwischen Abgangs- und Empfangsdepot. Wichtig ist weiterhin, dass Zugmaschine und Auflieger entkoppelt sind und an den Depots ein schneller Wechsel des Ladegefäßes möglich ist. Die zeitliche Kapazitätsauslastung des Fahrzeuges kann dadurch bereits erheblich erhöht werden.

#### Abbildung 4-6: Stafettenverkehr



Quelle: Eigene Darstellung

Als *Stafettenverkehre* werden Abwicklungsformen verstanden, bei denen ein Fahrzeug drei oder mehr Relationen miteinander verbindet, wie in Abbildung 4-6 dargestellt. Anstelle von zwei separaten Direktverkehren von einem Abgangsdepot A zu einem Empfangsdepot B und von Abgangsdepot A zu einem Empfangsdepot C, verbindet ein Fahrzeug das Abgangsdepot A mit den Empfangsdepots B und C. Zudem kann dasselbe Fahrzeug gleichzeitig noch die Verbindung von Abgangsdepot B und Empfangsdepot C übernehmen. Bei Stafettenverkehren geht es weniger um die Verbesserung der zeitlichen Auslastung der Fahrzeuge, sondern vielmehr um eine Reduzierung der Zahl der eingesetzten Fahrzeuge. Da in Depot B Ladetätigkeiten stattfinden müssen (Entladung der von A nach B bestimmten Mengen und anschließende Beladung mit den von B nach C bestimmten Mengen), ist dort immer ein Aufenthalt einzuplanen, der ggf. auch zum Nachladen genutzt werden kann.

Die Gestaltung von Stafettenverkehren ist äußerst komplex und insbesondere die Rückführung der Transportbehälter stellt hier große Herausforderungen. Ohne eine geografisch günstige Lage der Depots zueinander sind Stafettenverkehre nicht durchführbar. Das Funktionieren von Stafettenverkehren ist also immer auf eine entsprechend angepasste Straßen- und Energieversorgungsinfrastruktur angewiesen; umgekehrt ist es kaum möglich, die logistische Infrastruktur (z. B. die Lage der Depots) an z. B. einer vorhandenen Oberleitungsinfrastruktur mit Elektrifizierungslücken auszurichten.

**Abbildung 4-7: Begegnungsverkehr**

Quelle: Eigene Darstellung

Muss ein Fahrzeug von Depot A nach Depot B, sowie ein zweites Fahrzeug von Depot B nach Depot A, bietet es sich an, anstelle zweier Direktverkehre einen *Begegnungsverkehr* durchzuführen. Hierbei fahren beide Fahrzeuge jeweils nur die Hälfte der Strecke, begegnen sich dort (z. B. auf einem Parkplatz) um ihre Wechselbrücken bzw. Sattelaufleger zu tauschen und kehren mit der neuen Ladung in ihr jeweiliges Ursprungsdepot zurück (Abbildung 4-7).

Die Vorteile von Begegnungsverkehren haben weder mit der Optimierung von Auslastung oder Zeit, sondern vielmehr mit der räumlichen Verortung der Fahrzeuge und Optimierung der Ruhezeiten zu tun: Das Fahrzeug befindet sich nach Schichtende wieder am Unternehmensstandort und kann tagsüber mit einem anderen Fahrer eingesetzt werden. Auch durch diesen Ansatz wird die zeitliche Auslastung des Fahrzeugs verbessert. Zudem hat der Fahrer die Möglichkeit, seine Ruhezeit zu Hause zu verbringen. Begegnungsverkehre sind aber auch vorstellbar, um einen Sattelaufleger auf einem Teil der Strecke mit einer oberleitungselektrischen Zugmaschine zu befördern und dann z. B. für den Nachlauf in der Fläche auf ein Fahrzeug (nur) mit Verbrennungsmotor zu wechseln.

**Abbildung 4-8: Verkehr über Wechsellpunkte**

Quelle: Eigene Darstellung

Ähnlich wie beim Begegnungsverkehr werden beim *Verkehr über Wechsellpunkte*, der in Abbildung 4-8 ersichtlich ist, an vordefinierten Stellen die Transportgefäße mehrerer Fahrzeuge getauscht. Um ein solches Netzwerk aus Wechsellpunkten zu etablieren, in dem sämtliche Wechsellpunkte durch in beide Richtungen laufende Transporte verbunden sind, ist ein hohes Volumen im Netzwerk Voraussetzung. Neben den Aufliegern können an den Wechsellpunkten auch die Fahrer getauscht werden.

So können Fahrern trotz internationaler Transporte über große Distanzen berechenbare Arbeitszeiten und das Schlafen im eigenen Heim ermöglicht werden. Transporte auf der Langstrecke können außerdem schneller abgewickelt werden, da die Sendung entkoppelt wird von den Ruhezeiten des Fahrpersonals. Auch die zeitliche Fahrzeugauslastung kann hier deutlich erhöht werden. Mögliche Unpaarigkeiten in den Mengenströmen werden dabei bewusst in Kauf genommen, um die Vorteile dieser Abwicklungsform ausnutzen zu können.

Für den Verkehr über Wechsellpunkte gilt hinsichtlich der Einsetzbarkeit oberleitungselektrischer Fahrzeuge Ähnliches wie beim Begegnungsverkehr. Besonders interessant sind immer diejenigen Organisationsformen von Straßengüterverkehren, die es ermöglichen, Verkehre so zu gestalten, dass auf den hierfür geeigneten Abschnitten O-Lkw zum Einsatz kommen können. Neben Hub- und Depotverkehren sind dies insbesondere auch Begegnungsverkehre, bei denen Behälter bzw. Auflieger unterwegs zwischen Lkw getauscht werden. Voraussetzung hierfür ist aber immer die freie

Kombinierbarkeit von Zugmaschine und Auflieger oder alternativ eine Möglichkeit zum unkomplizierten Tausch von Behältern.

Systemverkehre weisen also Merkmale auf, welche die Transportleistungen als weitgehend industrialisierte und standardisierte Leistungen charakterisieren und damit wiederum für O-Lkw besonders interessant machen. Da entsprechende Verkehre häufig in einem Netzwerk von verschiedenen Unternehmen geleistet werden, sind standardisiertes Equipment und standardisierte Prozesse ebenso wichtig wie ein hohes Auftragsvolumen, hohe Wiederholfrequenzen, die Auflösung der festen Zuordnung eines Fahrers auf ein Fahrzeug sowie die Auflösung der festen Zuordnung eines Aufliegers auf eine Zugmaschine (Brandenburg et al. 2016, S. 292). Umgekehrt bedeutet Systemverkehr aber auch, regelmäßige Hauptläufe mit einer stabilen Grundlast an Fahrten anzubieten, die verhältnismäßig wenigen Änderungen unterworfen sind, und die damit wesentliche Anforderungen an die Elektrifizierung von Straßengüterverkehren erfüllen.

#### 4.7. Unternehmensstrukturen

Die Logistikbranche insgesamt trug im Jahr 2016 mit einem Umsatz von 259 Mrd. € einen Anteil von 8,2 % zum Bruttoinlandsprodukt in Deutschland bei (Fraunhofer SCS 2018; Statistisches Bundesamt 2018b, S. 3). Damit gehören Logistik und Transportwirtschaft zu den größten Branchen in Deutschland. Zum Vergleich erzielte der Kraftfahrzeugbau im Jahr einen Umsatz von rund 443 Mrd. € (Statistisches Bundesamt 2017b, S. 22). Der deutsche Logistikmarkt ist dabei mit einem Anteil von 24,7 % am europäischen Logistikvolumen mit Abstand der größte Logistikmarkt in Europa. Es folgen das Vereinigte Königreich mit 139 Mrd. € Jahresumsatz sowie der französische Markt mit einem Logistikvolumen von 128 Mrd. € (Schwemmer und Pflaum 2017, S. 69).

Das Logistik-Marktvolumen errechnet sich allerdings aus allen logistischen Leistungen, die in Deutschland erbracht werden. Enthalten sind also beispielsweise auch Lager- und Umschlagdienstleistungen, aber auch sämtliche Logistikleistungen, welche klassische Produktionsunternehmen selbst erbringen. Der Umsatz nur im Bereich Transport und Spedition lag hingegen 2016 bei rund 105 Mrd. € (DSLVL 2018), also bei etwa 40 % des Logistikumsatzes, und ebenfalls mit wachsender Tendenz.

Da die Nachfrage nach Speditionsdienstleistungen und nach Transporten von der Nachfrage auf dem Gütermarkt abhängig ist, wächst aufgrund des Wirtschaftswachstums in Deutschland auch der Güterverkehrsmarkt (BGL 2016, S. 36). Dabei ist seit einiger Zeit allerdings eine Entkoppelung zu beobachten. So wachsen die Umsätze auf dem Logistik-Gesamtmarkt seit 2006 mit durchschnittlich 5,3 Prozent p.a. in Deutschland und damit erheblich schneller als die Gesamtwirtschaft (2,96 %) (Fraunhofer SCS 2018; Statistisches Bundesamt 2018b, S. 3). Diese Entwicklung hält weiterhin an (Heymann 2017). Parallel zu den Umsätzen ist auch die Wachstumsrate der Leistungserstellung (Gütertransportleistung) im Zeitraum zwischen 2005 und 2015 positiv. Sie liegt im Jahresdurchschnitt derzeit bei rund 1,4 %.

Die Verkehrsträger im Güterverkehr wachsen allerdings weder alle gleich stark, noch linear. Im Zeitraum zwischen 2005 und 2015 hat die Transportleistung im Straßengüterverkehr z. B. im Durchschnitt jährlich um rund 1,3 % zugenommen. Die jährlichen Wachstumsraten schwankten dabei jedoch stark. Das wachstumsstärkste Jahr im Betrachtungszeitraum war der Zeitraum 2005/06 mit einer Zunahme der Transportleistung von 8,0 %. Dem steht als maximaler Rückgang der Jahresvergleich 2008/09 mit einer Abnahme von 9,2 % gegenüber.

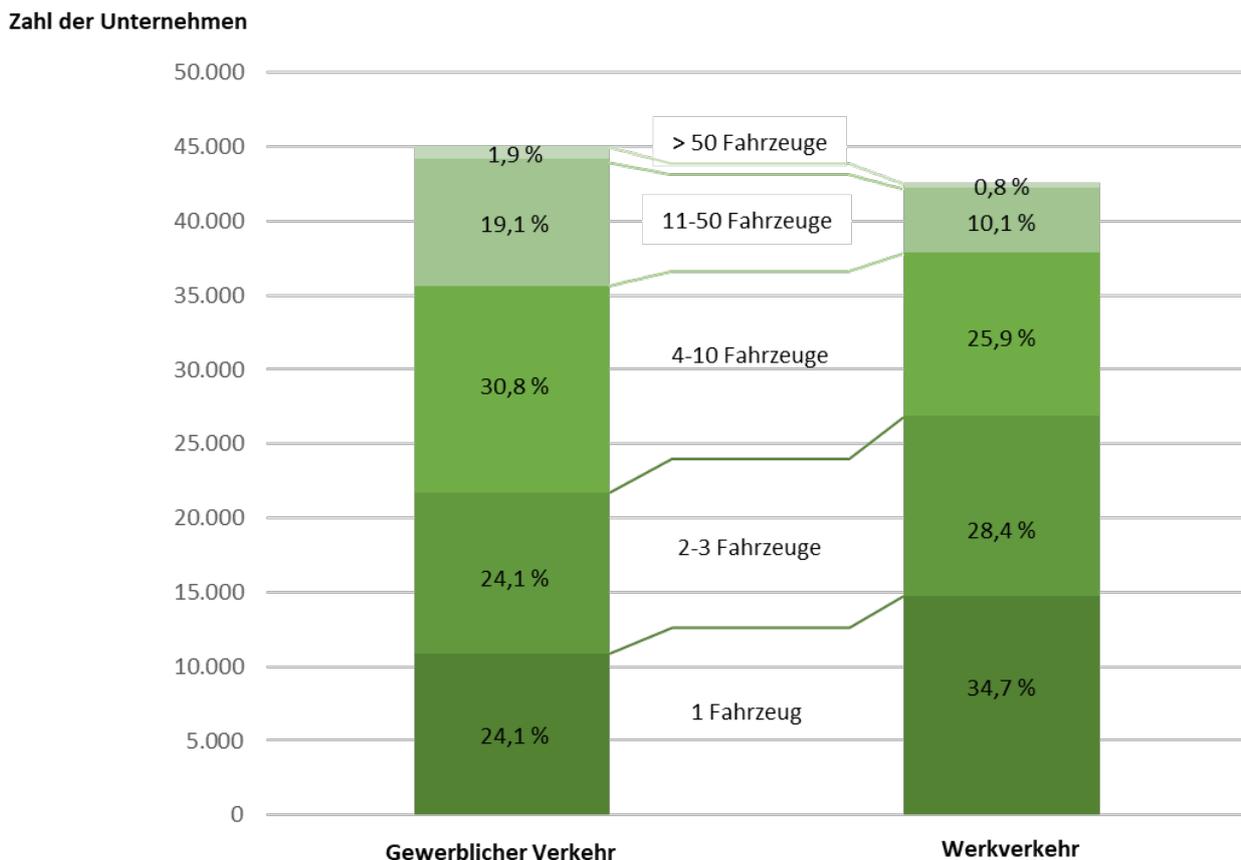
Im gleichen Zehnjahreszeitraum 2005 bis 2015 ist die Transportleistung auf der Schiene jährlich um 2,0 % gewachsen. Das Binnenschiff verzeichnete einen durchschnittlichen jährlichen Rückgang um

etwa 1,5 %. Aufgrund der unterschiedlichen Anteile im Modal Split betrug der Zuwachs der Transportleistung im Güterkraftverkehr allerdings – trotz der niedrigeren relativen Wachstumsraten gegenüber der Eisenbahn – nahezu das Vierfache des Zuwachses im Schienengüterverkehr. Der Modal Split im Güterverkehr hat sich daher leicht weiter in Richtung der Straße verschoben, deren Anteil an der Transportleistung 2015 bei rund 72 % lag, wobei 92 % der Tonnenkilometer im Binnenverkehr erbracht wurden (BGL 2016, S. 36).

Die Gründe für diese Entwicklungen sind vielfältig und haben ihren Ursprung – wie dargelegt – größtenteils außerhalb des Transportmarktes (siehe Kapitel 4.4). Der Straßengüterverkehr wird im Ergebnis auch in Zukunft die führende Rolle im Güterverkehrssystem einnehmen. Er stellt damit einen stabilen Markt für Zukunftsinvestitionen und die Amortisierung von Innovationen dar.

Das Güterkraftverkehrsgewerbe, dem rund 45.000 Unternehmen in Deutschland angehören, ist mengenmäßig stark von kleinen und mittelständischen Unternehmen geprägt. So haben 95 % der Unternehmen im Güterkraftverkehr weniger als 50 Beschäftigte, 50 % gar nur fünf oder weniger Beschäftigte. Mit einem Anteil von 57 % ist ein Großteil dieser Firmen als Einzelunternehmen organisiert (BGL 2016, S. 6). Dies führt im Ergebnis dazu, dass rund 80 % der etwa 600.000 in Deutschland regelmäßig im Güterkraftverkehr eingesetzten Lkw und Sattelzugmaschinen auf Unternehmen zugelassen sind, die weniger als zehn Fahrzeuge besitzen (BGL 2016, S. 5 und 17).

**Abbildung 4-9: Unternehmen des Straßengüterverkehrs nach Zahl der Fahrzeuge**



Quelle: BGL 2016, S. 3

Obwohl der Anteil der Unternehmen mit mehr als 50 Fahrzeugen an der Gesamtzahl der Unternehmen mit rund 1,5 % sehr gering ist, sind diese Unternehmen für die Abschätzung des

Marktpotenzials von Fahrzeuginnovationen von erheblicher Bedeutung, da sie die großen Flottenbetreiber sind. Gerade bei diesen Unternehmen und Unternehmenskooperationen ist es möglich, mit der Ansprache sehr weniger Kunden eine große Zahl an Fahrzeugen zu adressieren. Daher erfolgt nachfolgend noch ein Blick auf die Marktführer der Branche.

Aufgrund der Unterschiedlichkeit der dahinter stehenden logistischen Aufgaben, wird die (nationale) Unternehmensstruktur nachfolgend nach Unternehmen und Unternehmenskooperationen mit Schwerpunkt im Ladungsverkehr (Punkt-zu-Punkt-Verkehre für einen Auftraggeber) und solchen mit Tätigkeitsschwerpunkt im Stückgutverkehr (Sammeltouren) untergliedert. Während einige Unternehmen dabei nur in einem Marktsegment zu den größeren Akteuren zählen, weisen andere umfassende Aktivitäten in beiden Feldern auf (siehe Tabelle 4-9 und Tabelle 4-10).

**Tabelle 4-9: Top 10 größte Unternehmen im Ladungsverkehr (FTL)**

Rang	Unternehmen	Ladungsverkehre (FTL) (in Mio. €)	Unternehmensumsatz in Deutschland (in Prozent)	Anzahl Lkw (inkl. Fahrzeuge beauftragter Frachtführer)
1	DB Schenker	1.100	28 %	2.700
2	Deutsche Post DHL	350	4 %	11.000
3	Lkw WALTER	332	100 %	k.A.
4	Dachser SE	260	9 %	5.000
5	E.L.V.I.S. AG	250	100 %	18.300
6	Hermes Europe GmbH	200	11 %	1.800
7	DSV Deutschland	190	19 %	k.A.
8	BLG Logistics Group AG & Co. KG	189	22 %	k.A.
9	Thomas Duvenbeck Holding GmbH	180	57 %	1.500
10	Kühne + Nagel (AG & Co.) KG	170	6 %	k.A.

Quelle: Unternehmensangaben, z.T. Schätzwerte

Eine Besonderheit im Stückgutverkehr sind die Speditionskooperationen (in Tabelle 4-10 mit einem \* markiert). Dabei handelt es sich um netzwerkförmige Zusammenschlüsse rechtlich selbständiger, oft mittelständischer Frachtführer, um gemeinsam eine ausreichend hohe nationale Netzdichte und Bedienfrequenzen erreichen zu können. In aller Regel organisieren Speditionskooperationen ihr Geschäft dabei in Form von Systemverkehren.

**Tabelle 4-10: Top 10 größte Unternehmen im Stückgutverkehr (LTL)**

Rang	Unternehmen	Stückgutverkehre (LTL) (in Mio. €)	Unternehmensumsatz in Deutschland (in Prozent)	Anzahl Lkw (inkl. Fahrzeuge beauftragter Frachtführer)
1	Dachser SE	1.200	40 %	5.000
2	IDS Logistik GmbH *	1.140	93 %	4.700
3	CargoLine GmbH & Co. KG *	1.120	80 %	4.600
4	DB Schenker	870	22 %	2.700
5	System Alliance GmbH *	850	100 %	6.000
6	Deutsche Post DHL	650	7 %	11.000
7	24plus Systemverkehre GmbH & Co. KG *	465	100 %	3.900
8	Hellmann Worldwide	412	31 %	k.A.
9	Rhenus SE & Co. KG	380	16 %	k.A.
10	System Alliance Europe Partnership GbR *	375	100 %	k.A.

Quelle: Schwemmer 2016, S. 114, Unternehmensangaben, z.T. Schätzwerte

In beiden Segmenten gilt gleichermaßen, dass die Informationen zur Zahl der eingesetzten Lkw lückenhaft sind. Zudem werden in vielen Fällen nicht alle Fahrten mit eigenen Fahrzeugen durchgeführt, sondern zum Teil auch Partnerunternehmen mit Transporten beauftragt oder diese fallweise am Markt zugekauft. Dennoch geben die Zahlen eine Orientierung über große Akteure auf dem Markt. So entfallen alleine auf die (weniger als 20) Unternehmen, zu denen Zahlen vorliegen, mehr als 25 % der im Güterfernverkehr in Deutschland eingesetzten Fahrzeuge.

#### 4.8. Innovationen auf dem Transportmarkt

Die rasche Dekarbonisierung des Güterverkehrs zählt zu den zentralen Herausforderungen der Zukunft. Sie ist aber nicht der einzige Megatrend, der in Zukunft die Transportmärkte, insbesondere aber den Straßengüterverkehr voraussichtlich nachhaltig verändern wird. Der Markt ist vielmehr derzeit von einer ganzen Reihe an Technologie- und Prozessinnovationen geprägt, die bereits in Umsetzung sind oder die in den kommenden Jahren erwartet werden. Hierzu zählen neben der Dekarbonisierung und der Elektrifizierung zu ihrer Realisierung unter anderem (IW Consult und Fraunhofer IAO 2018, 9 ff.):

- Digitalisierung,
- Leichtbau,
- Automatisierung,
- Vernetzung.

Zusätzlich zu diesen Megatrends sind weitere Entwicklungen zu nennen, wie beispielweise die Industrialisierung der Branche, die für alle Bemühungen um eine prozessorientierte Reorganisation von Transportaufgaben steht oder das Bemühen um eine Weiterentwicklung der Regelungen zu den Fahrzeugmaßen und -gewichten im Straßengüterverkehr.

#### 4.8.1. Industrialisierung von Verkehren

Im Unterschied zum produzierenden Gewerbe und zur Intralogistik ist der Grad der Prozessoptimierung in der Transportlogistik – von Ausnahmen wie z. B. im KEP-Bereich abgesehen – derzeit noch verhältnismäßig gering. Entsprechend hoch ist das Bestreben, insbesondere bei großen Akteuren auf dem Markt und bei Kooperationen hier möglichst rasch aufzuholen. Diese Bestrebungen werden im Güterverkehr unter dem Begriff „Industrialisierung“ zusammengefasst (Holderied 2005, S. 29). Unter der Industrialisierung im Straßengüterverkehr wird dabei eine Kombination von Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrzeugauslastung z. B. durch einen Mehrschichtbetrieb verstanden, die Auflösung von festen Zuordnungen zwischen Fahrer, Zugmaschine und Auflieger, die Standardisierung von Equipment sowie die IT-basierte Realisierung komplexer Tourenplanungen in der Gesamtschau (Lohre et al. 2014, S. 35).

Themen bzw. logistische Innovationsfelder, die mit der Industrialisierung von Straßengüterverkehren adressiert werden und die direkte Querverbindungen zum Konzept O-Lkw haben können, sind zum Beispiel (Bernecker et al. 2016, 116 ff.):

- Online-Plattformen zur Fahrzeugdisposition und -überwachung,
- Fahrzeug- und Flottenkonzepte zur Realisierung von Größen- und Standardisierungsvorteilen bei Einkauf, Wartung und Fahrzeugdisposition,
- Bewirtschaftung von Ladeeinheiten zur maximalen Ausnutzung der Fahrzeug-Produktivität über die Vorstauung von eigenen Aufliegern und deren Übergabe zur Beförderung („Trailer-Yard-Konzepte“),
- Optimierung von Beladungsreihenfolgen und Abläufen an der Rampe mit dem Ziel einer möglichst effizienten Ausnutzung der Kapazitäten von Aufliegern und Zugmaschinen,
- Bündelung von Transporten und Optimierung von Leergutströmen zur Steigerung der Gesamtauslastung bei Systemverkehren,
- Sensorische Überwachung von Transporten zur fortlaufenden Dokumentation und ggf. zur raschen Intervention bei Störungen, auch in Verbindung mit einer automatisierten Ladungs- und Diebstahlsicherung,
- Unternehmensübergreifende Ressourcennutzung, insbesondere von Fahrzeugen (Zugmaschinen und Auflieger), aber z. B. auch von Abstellflächen mit integrierten Schnellladeinfrastrukturen und Wartungsmöglichkeiten.

Die Industrialisierung des Straßengüterverkehrs ist seitens der Unternehmen mit der Erwartung von zahlreichen Vorteilen verknüpft. Diese liegen in erster Linie in der Senkung von Produktionskosten, aber auch die Bedingungen zur Rekrutierung von Fahrern sollen sich verbessern, da eine Tourenoptimierung z. B. über Begegnungsverkehre für den Fahrer in der Regel mit der Möglichkeit zur täglichen Rückkehr an den Standort einhergeht.

Gleichzeitig setzt eine erfolgreiche Industrialisierung des Güterverkehrs aber auch gewisse Unternehmensgrößen voraus. Es erscheint daher wahrscheinlich, dass sich mit einem weiteren Fortschreiten der Industrialisierung des Straßengüterverkehrs die Tendenz zur Konzentration auf den Transportmärkten weiter fortsetzen wird, d. h. dass die Zahl der Unternehmen auch weiterhin rückläufig sein wird. Diese Konzentrationstendenz kann wiederum Vorteile für die Durchsetzung anderer innovativer Konzepte wie z. B. des O-Lkw sein.

#### 4.8.2. Automatisierung und autonomes Fahren

Im Zusammenhang mit dem Fahrermangel im Güterkraftverkehrsgewerbe, zur Effizienzsteigerung beim Transport, aber auch unter Aspekten der Verkehrssicherheit gilt die Ausrüstung von Nutzfahrzeugen für den hoch automatisierten Betrieb bis hin zum autonomen Fahren vor dem Hintergrund von Megatrends wie Logistik 4.0, Digitalisierung, Sensorik und Big Data derzeit als ein Schlüsselthema. Während Automatisierung dabei das sich selbst bewegende (selbstfahrende) Fahrzeug meint, geht das autonome Fahren hierüber konzeptionell noch einmal hinaus und bezeichnet Fahrzeuge, die im automatischen Fahrbetrieb für sich selbst auch grundsätzliche Entscheidungen treffen, ohne dass es noch einer menschlichen Intervention bedarf.

Da ein sofortiger voll autonomer Fahrbetrieb auf öffentlichen Straßen aufgrund einer Vielzahl noch nicht abschließend geklärter Fragen nicht denkbar ist, ist für die Umsetzung und Einführung der Technologie ein Stufenkonzept erforderlich. International ist es üblich, hierbei sechs verschiedene Realisierungsstufen zu unterscheiden (SAE International 2014, S. 1 f.).

- Stufe 0 bezeichnet den rein konventionellen Fahrbetrieb, in dem keine Automatisierung stattfindet.
- Stufe 1 bezeichnet Fahrzeuge, deren Längs- oder Querverführung durch ein System vorgenommen wird, das den Fahrer partiell entlastet. Ein Beispiel hierfür sind Assistenzsysteme wie Geschwindigkeitsregelanlagen (Tempomat) oder der Spurhalteassistent.
- Stufe 2 wird als teilautomatisiertes Fahren bezeichnet und ist dadurch gekennzeichnet, dass in bestimmten Anwendungsfällen die Längs- und Querverführung durch ein System übernommen wird, welches der Fahrer aber jederzeit überwachen und gegebenenfalls übersteuern muss. Als Beispiel hierfür sei der Staupilot zu nennen.
- Stufe 3 bezeichnet das bedingt automatisierte Fahren. Es unterscheidet sich im Vergleich zur Stufe 2 darin, dass eine Aufmerksamkeit des Fahrers während des aktivierten Systems nicht notwendig ist. Der weiterhin vorhandene Fahrer wird durch das System dann zum Eingreifen aufgefordert, wenn dieses erkennt, dass eine Übernahme durch den Fahrer notwendig wird.
- Fahrzeuge der Stufe 4, bezeichnet als hochautomatisiertes Fahren, können in vorher definierten Anwendungsfällen auf alle denkbaren Umwelteinflüsse und Situationen reagieren und benötigen daher in diesen Fällen (z. B. auf der Autobahn) keinen Fahrer an Bord. Dieser ist erst erforderlich, wenn das Fahrzeug in Bereichen eingesetzt werden soll, in denen die Systemgrenzen überschritten werden.
- Fahrzeuge nach Stufe 5, dem vollautomatisierten bzw. autonomen Fahren, benötigen keinen Fahrer und können auf jegliche Umgebungsparameter und Situationen reagieren. Das System führt alle Fahraktivitäten durch und wird durch den Nutzer per Zieleingabe angewiesen, eine eigene Start-Ziel-Navigation durchzuführen.

Bis zu Stufe 2 in der Definition der SAE ist das autonome Fahren bereits auf deutschen Straßen im Regelbetrieb zugelassen. §1a StVG besagt, dass Systeme, die die Längs- und Quersteuerung gleichzeitig übernehmen und sich dabei an die geltenden Verkehrsregeln halten, erlaubt sind, wenn der Fahrer das System jederzeit deaktivieren oder übersteuern kann. Voraussetzung ist also das Vorhandensein eines Fahrers und dessen durchgängige Aufmerksamkeit für den Verkehr.

Auf Testfeldern, auch solchen im Öffentlichen Straßenraum wie z. B. entlang der A9 oder im Raum Karlsruhe-Heilbronn, finden unter genau definierten Bedingungen auch bereits Versuche mit Funktionalitäten der Stufen 3 und mehr statt. Dabei begleitet und überwacht allerdings immer ein

Sicherheitsfahrer den Fahrbetrieb im Fahrzeug. Er kann das System im Bedarfsfall jederzeit übersteuern, und damit die Anforderungen des StVG erfüllen.

In den meisten aktuellen Studien wird die Massenmarktfähigkeit des hoch automatisierten Fahrens nicht vor dem Jahr 2030 erwartet, teilweise sogar noch später (Ernst und Young 2017, S. 12; acatech et al. 2018, S. 52; IW Consult und Fraunhofer IAO 2018, S. 31). Gerade für Nutzfahrzeuge zeichnet sich aber bereits wesentlich früher die Serienreife teilautonomer Komponenten auf einer niedrigeren Stufe ab. Ein aktueller Trend ist z. B. die Vernetzung von Assistenzsystemen. Werden etwa die Funktionalitäten eines Abstandsregeltempomaten und eines Spurhalteassistenten miteinander kombiniert, so ist ein Fahrzeug in der Lage, daraus die notwendigen Steuerungsimpulse für die gleichzeitige Längs- und Quersteuerung zu errechnen. Sensoren sichern gleichzeitig das Umfeld des Fahrzeugs ab. So können Fahrspuren und Hindernisse erkannt werden sowie Lenk- oder Bremsimpulse vom System eigenständig berechnet werden. Besondere Aufmerksamkeit beim Lkw haben in jüngerer Vergangenheit erfolgreiche Versuche zum sog. *Platooning* gefunden. Platooning bezeichnet die Kolonnenbildung, wobei Lkw mit geringem Abstand hintereinander herfahren, um so den Vorteil des Fahrens im Windschatten auszunutzen. Das erste Fahrzeug ist manuell gelenkt und gibt dem Platoon Geschwindigkeit und Richtung vor. Die Koppelung der Fahrzeuge erfolgt digital unter Nutzung von Sensoren wie Radar (Radio Detection and Ranging), Lidar (Light Detection and Ranging) und Kameras, wie sie auch für andere Fahrerassistenzsysteme genutzt werden. Außerdem sind die Lkw mit einer elektronischen Lenkung und mindestens einer WLAN-Antenne ausgestattet, über die eine Kommunikation mit anderen Fahrzeugen möglich ist. Das Platooning ist dem SAE-Level 3 (bedingt automatisiertes Fahren) zuzuordnen. Damit ist es nach den aktuell geltenden Rechtsvorschriften des StVG in Deutschland nicht erlaubt, da das Konzept nach Bildung des Platoons die vollständige Abwendung der Fahrer in den geführten Fahrzeugen vom Fahrgeschehen vorsieht. Projekte zur Erprobung werden daher mit Sicherheitsfahrer durchgeführt und sind somit im Bereich des heute zulässigen teilautonomen Fahrens nach Stufe 2 angesiedelt.

Insbesondere die ständige Überwachung von Fahrzeugfunktionen sowie die damit verbundene Datengenerierung und der fortlaufende Datenaustausch, der für automatisierte Fahrfunktionen erforderlich ist, lassen Querverbindungen zur O-Lkw-Technik erkennen. So kann die ständige Kommunikation zwischen den Fahrzeugen in Verbindung mit Statusmeldungen unter anderem für das Management der Fahrleitungsverfügbarkeit genutzt werden. Hinzu kommt die erwartete Einsparung von ca. 5 bis 10 % Traktionsenergie durch das Fahren im Windschatten, was wiederum den Strombedarf eines Platoons gegenüber Einzelfahrzeugen deutlich senkt.

#### **4.8.3. Fahrzeugmaße und Gewichte**

Bei vielen Lkw-Transporten wird das zur Verfügung stehende Laderaumvolumen derzeit in vollem Umfang ausgenutzt, d. h. bei einem größeren Laderaum könnten noch weitere Güter zugeladen werden, bevor die maximale Zuladung in Tonnen erreicht ist. Bei anderen Transporten wird hingegen die maximale Zuladung in Tonnen erreicht, bevor der Laderaum erschöpft ist. Unter Verweis auf die bestehenden Regelungen in anderen Staaten findet daher auch in Deutschland eine intensive Diskussion über die zulässigen Fahrzeugmaße und -gewichte im Güterkraftverkehr statt. Während die diesbezügliche Regelungskompetenz im grenzüberschreitenden Verkehr bei der EU liegt, sind die Nationalstaaten berechtigt, für den Binnenverkehr diesbezüglich eigene Regelungen zu treffen.

In Deutschland wurden in diesem Sinne zum 01.01.2017 nach Abschluss eines umfassenden Feldversuchs im Rahmen des Aktionsplans Güterverkehr und Logistik verschiedene Regelungen zum sog. *Lang-Lkw* erlassen. Als Lang-Lkw werden dabei alle Nutzfahrzeuge und Fahrzeugkombinationen bezeichnet, welche die nach StVZO erlaubten Längenmaße von Sattelkraftfahrzeugen und Lastzügen von 16,50 m beziehungsweise 18,75 m überschreiten. Lang-Lkw sind in Deutschland derzeit

in fünf Konfigurationen zulässig; sie können bis zu 25,25 m lang sein. Das zulässige Gesamtgewicht beträgt hingegen bei allen Lang-Lkw wie auch bei konventionellen Lkw 40 t (bzw. 44 t im Vor- und Nachlauf des Kombinierten Verkehrs). Der Einsatz des Lang-Lkw bleibt auf den nationalen Verkehr und dort auf ein sogenanntes Positivnetz beschränkt, welches einen Großteil des Autobahnnetzes sowie ausgewählte Straßen des nachgeordneten Netzes umfasst.

Das Marktpotenzial der Lang-Lkw-Typen 2 bis 5 im Jahr 2030 liegt nach den Ergebnissen der wissenschaftlichen Begleituntersuchungen und in Abhängigkeit von der Definition des Positivnetzes zwischen etwa 100 Mio. und rund 580 Mio. Fzg-km (TCI Röhling und Universität St. Gallen 2016, S. 36; Prognos und Thinkstep 2017, S. 73). Einen Sonderfall stellt der sog. Lang-Lkw Typ 1 dar. Hierbei handelt es sich um einen verlängerten Sattelaufleger mit einer Länge der gesamten Fahrzeugkombination von 17.80 m. Für dieses Fahrzeug wird mit rund 7,1 Mrd. Fzg-km (TCI Röhling und Universität St. Gallen 2016, S. 36) ein erheblich größeres Marktpotenzial prognostiziert als für andere Lang-Lkw-Konfigurationen (Typen 2-5); gleichzeitig ist der Einsatz des Typs 1 derzeit bis zum 31.12.2023 beschränkt.

Im Rahmen des Feldversuchs wurde ermittelt, dass – wie in den Vorstudien vermutet – durch den Einsatz von Lang-Lkw-Kombinationen mit einer Gesamtlänge von 25,25 m (Fahrzeugtypen 2-4) im Mittel etwas mehr als drei Fahrten mit konventionellem Lkw durch zwei Lang-Lkw Fahrten ersetzt werden können (Bundesanstalt für Straßenwesen 2016, S. 144–146). Daraus resultierten – bei nahezu idealen Auslastungsgraden der Fahrzeuge im Testbetrieb – errechnete Effizienzgewinne und Kraftstoffeinsparungen zwischen 15 und 25 Prozent. Intermodale Verlagerungen von der Bahn und der Binnenschifffahrt hin zum Straßengüterverkehr waren nicht zu beobachten und konnten auch in Modellrechnungen nur in unerheblichem Umfang nachgewiesen werden (Prognos und Thinkstep 2017, S. 77). Damit ist der Lang-Lkw in der Lage, zur Senkung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs beizutragen. Die zu Beginn der Debatte um den Lang-Lkw mit Verweis auf vergleichbare Regelungen in anderen EU-Staaten (z. B. in den Niederlanden und in Schweden) geforderten Anpassungen der zulässigen Fahrzeug-Gesamtwichte auf 48 t oder gar 60 t konnten sich hingegen nicht durchsetzen. Unter anderem steht dem der Zustand der Verkehrsinfrastruktur entgegen, aber auch verkehrspolitische Überlegungen.

Eine parallellaufende Debatte zu den Lkw-Fahrzeuggewichten fordert eine Ausweitung des 44-t-Privilegs im Kombinierten Verkehr auf alle intermodalen Verkehre zwischen Straße und Schiene, mit dem Ziel, die Schiene weiter zu stärken. Hier besteht ein entsprechender Prüfauftrag der Politik (BMVI 2017, S. 29).

Für den O-Lkw ergibt sich eine interessante Schnittstelle in Form der stark optimierten Touren auf einem eingeschränkten Netz, die mit Lang-Lkw gefahren werden können. Sollte dieser Zustand Bestand haben, d. h. der Lang-Lkw im Wesentlichen auf die Autobahnen beschränkt bleiben, ergibt sich hier ein sehr interessantes Marktsegment auch für O-Lkw.

#### **4.8.4. Aerodynamik**

Der Luftwiderstand eines Lkw ist für mehr als 20 % des Gesamtenergieverlustes verantwortlich. Deshalb bietet die Lkw-Aerodynamik sehr viel Potenzial bei der Senkung des Energiebedarfs. Verbesserungen der Aerodynamik bieten beispielsweise optimierte Führerhäuser, aber auch Auflieger mit einer Seitenverkleidung. Auch Spezialanbauten am Heck des Aufliegers sowie die Optimierung von dessen Form sind geeignet, eine Verringerung der Sogwirkung zu erwirken und ermöglichen damit ebenfalls eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs.

Die EU hat mit der Richtlinie (EU) 2015/719 zur Änderung der Richtlinie 96/53/EG die rechtlichen Voraussetzungen geschaffen, die Bemühungen um Energieeinsparungen durch eine verbesserte Aerodynamik der Fahrzeuge zu unterstützen. So können ab 2022 Fahrerhäuser mit abgerundeter Form und aerodynamische Luftleiteinrichtungen am hinteren Teil des Anhängers zugelassen werden. Im Ergebnis lassen sich bei einem Lkw mit konventionellem Verbrennungsmotor die Treibhausgasemissionen somit um voraussichtlich rund 5 bis 10 % senken. Gleichzeitig wird das Sichtfeld des Fahrers verbessert (Europäische Kommission 15.04.2014).

Eine konstruktive Integration des Stromabnehmers in eine verbesserte Fahrerhaus-Aerodynamik ist geeignet, diesen Vorteil in maximal möglichem Umfang auch bei O-Lkw nutzbar zu machen.

#### **4.8.5. Leichtbau**

Durch Senkung des Fahrzeug-Leergewichts nutzlastoptimierte Lkw können bei unverändertem Fahrzeug-Gesamtgewicht mehr Fracht transportieren. Dies entlastet letztendlich die Verkehrsinfrastruktur. Ein Weg, um dies zu erreichen, ist der sogenannte Leichtbau. Leichtbau meint entweder den Ersatz herkömmlicher Werkstoffe im Lkw-Bau durch solche mit gleichen Eigenschaften, aber geringerem Gewicht (Materialleichtbau) oder aber den sogenannten Anforderungs- bzw. Bedingungsleichtbau, der vermehrt auf eine bedarfs- und belastungsrechte Dimensionierung der Bauteile achtet, d. h. auf eine „Übererfüllung“ von Normen verzichtet.

Denkbare Ansatzpunkte für den Leichtbau bei Lkw sind neben dem Chassis beispielsweise die Federung, die Radaufhängung oder der Antriebsstrang (Ingelfinger und Liedke 2012). Das eingesparte Gewicht kann dann entweder zur Erhöhung der Zuladung genutzt werden, oder aber, um das Mehrgewicht einer Batterie ganz oder zumindest teilweise auszugleichen.

## **5. O-Lkw im Kontext alternativer Technologieoptionen**

### **5.1. Einleitung**

O-Lkw stellen eine mögliche Alternative zum dieselmotorischen Antrieb bei schweren Nutzfahrzeugen im Straßengüterfernverkehr dar, die im Rahmen des Projekts StratON näher beleuchtet wird. Grundsätzlich sind sowohl O-Lkw als auch die O-Infrastruktur in unterschiedlichen Auslegungen denkbar und stehen in Konkurrenz zu anderen möglichen Antriebs- bzw. Energieversorgungsoptionen.

Im Rahmen des Projekts StratON wurde ein umfassender Technologievergleich durchgeführt, der einerseits sinnvolle Konfigurationen des O-Lkw-Systems inklusive der erforderlichen Energieversorgungsinfrastruktur im Zeitverlauf aufzeigt und gegenüber möglichen Alternativen u.a. in Bezug auf die Gesamtkosten aus Nutzersicht, die Energieeffizienz und das Treibhausgasemissionsminderungspotenzial einordnet. Die in diesem Arbeitsschritt ermittelten Grundlagen zur technischen Auslegung des Systems bilden den Rahmen für die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Potenzialbetrachtungen und Markthochlaufsimulationen für das O-Lkw-System.

Die vollständigen Ergebnisse des Technologievergleichs wurden bereits im StratON-Teilbericht „Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr“ (Kühnel et al. 2018) veröffentlicht. Im Folgenden werden die diskutierten Technologieoptionen eingeführt und an dieser Stelle lediglich auf ausgewählte Ergebnisse der Analysen eingegangen.

## 5.2. Übersicht über die Antriebskonzepte

### 5.2.1. Diesel-Lkw

Im Straßengüterfernverkehr sind Dieselmotoren derzeit die dominierende Antriebstechnologie und damit auch die Referenz im Technologievergleich. Der aktuelle Anteil von Dieselfahrzeugen am Bestand von Sattelzugmaschinen (SZM) in Deutschland liegt bei über 99 % (KBA 2017). Laut ICCT (2017) ist der heutige Standardmotor von Sattelzügen ein EURO VI Motor mit 12,7 Litern Hubraum.

Die Technologie zeichnet sich durch eine hohe Technologiereife, hohe technische Zuverlässigkeit und ein lückenloses Servicenetzwerk aus. Den Vorteilen stehen jedoch einige zentrale Nachteile gegenüber. Der Kraftstoff wird vorwiegend aus fossilen Ressourcen hergestellt und die Verbrennung von Dieselmotoren ist mit hohen Treibhausgasemissionen und lokal wirksamen Luftschadstoffemissionen verbunden. Aktuelle Dieselmotoren verfügen zudem über einen vergleichsweise geringen maximalen Wirkungsgrad von 38 bis 46 % (Delgado et al. 2017) und die weiteren Effizienzpotenziale sind limitiert. Bei der Modellierung erfolgt die Effizienztechnologiewahl automatisiert auf Grundlage des Impact Assessments zur HDV Regulation der EU-Kommission (European Commission 2018) und beinhaltet alle verfügbaren Effizienztechnologien zu den dort ermittelten Technologiekosten. Zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist, unabhängig von fahrzeugseitigen Effizienzmaßnahmen, die Beimischung von synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien sowie Biodiesel denkbar. Jedoch bergen diese Optionen jeweils zusätzliche Probleme wie hohe Energieverluste in der Prozesskette und hohe Kosten bzw. eine weiterhin hohe Importabhängigkeit oder Landnutzungskonflikte.

### 5.2.2. LNG-Lkw

Erdgasantriebe stellen zunehmend eine Alternative zum konventionellen Dieselantrieb dar, die geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie niedrigere Luftschadstoffemissionen aufweist. Die geringe Energiedichte von Erdgas macht eine Komprimierung oder Verflüssigung notwendig, um ausreichend hohe Reichweiten zur Verfügung stellen zu können. Während dazu im Pkw-Bereich komprimiertes Erdgas ausreicht, benötigen Nutzfahrzeuge verflüssigtes Erdgas (englisch: Liquefied Natural Gas). LNG wird durch Kühlung auf unter -161 °C verflüssigt und weist nur etwa ein Sechshundertstel des Volumens von gasförmigem Erdgas auf. Die Betankungszeit ist vergleichbar mit konventionellem Kraftstoff. LNG-Lkw weisen einen Kostenvorteil im Betrieb gegenüber Diesel-Fahrzeugen auf. Grund dafür sind die niedrigeren Energiepreise. Derzeit gilt eine Steuerermäßigung für Erdgas (LNG).

Zwar bieten LNG-Fahrzeuge die Möglichkeit, die Treibhausgasemissionen von Lkw auf Grund des geringeren Kohlenstoffgehalts des Kraftstoffs gegenüber Diesel-Lkw zu mindern. Aufgrund des verbrennungsmotorischen Antriebs ist der Gesamtwirkungsgrad jedoch im Bereich von Diesel-Lkw und ein klimaneutraler Betrieb würde den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen aus Erneuerbaren Energien erforderlich machen.

LNG-Lkw sind seit kurzem am Fahrzeugmarkt verfügbar, jedoch noch kaum in der Praxis eingesetzt. Die Tankstelleninfrastruktur für LNG stellt ein Hemmnis für die Verbreitung der Fahrzeuge dar, da bislang nur wenige Tankstellen zugelassen sind und keine annähernd flächendeckende Verfügbarkeit bieten. Zudem bestehen Unsicherheiten in der Fahrzeugrestwertentwicklung sowie bei Wartungskosten und Zuverlässigkeit. Der aktuelle Bestand an Fahrzeugen ist in Deutschland noch zweistellig (KBA 2017).

### 5.2.3. Brennstoffzellen-Lkw

Brennstoffzellen-Lkw (FCEV) besitzen einen elektrischen Antriebsstrang und sind daher vom technischen Aufbau ähnlich zu batterieelektrischen Fahrzeugen. Im Gegenzug zur wegfallenden Traktionsbatterie kommen die Komponenten des Brennstoffzellensystems, die für die Stromerzeugung im Fahrzeug erforderlich sind, hinzu: der Brennstoffzellen-Stack, das Wasserstoff-Tanksystem, der Kompressor, die Kühlung und die Steuerungselektronik. Brennstoffzellen-Lkw können auch als Hybridfahrzeug ausgelegt werden. Dabei kommt eine Batterie zur Pufferung der Leistungsspitzen zum Einsatz, sodass eine kleinere Brennstoffzelle verbaut werden kann.

Ähnlich wie bei Erdgas stellt sich bei Wasserstoff aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte die Herausforderung einer platzsparenden Speicherung des Energieträgers. Es existieren verschiedene Speicherkonzepte mit erhöhtem Druck oder niedriger Temperatur, um ausreichend Energie bei begrenztem Raum zu speichern. Brennstoffzellen-Lkw besitzen eine erheblich geringere Well-to-Wheel-Energieeffizienz gegenüber der direkten Stromnutzung. Verantwortlich sind hierfür Verluste bei der Wasserstoffherstellung und -speicherung sowie der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle.

Brennstoffzellenfahrzeuge mit einer hohen Reichweite, ähnlich der eines LNG-Fahrzeugs, sind noch nicht am Markt verfügbar. Die Unternehmen Bosch und Nikola kündigten jedoch einen Brennstoffzellen-Lkw mit über 1.000 km Reichweite für das Jahr 2021 an. Im Lkw-Bereich liegt die Marktreife der Technologie jedoch noch weit hinter Bus- und Pkw-Anwendungen, jedoch existieren erste Prototypen für mittelschwere Lkw in den USA sowie in der Schweiz (Wietschel et al. 2017). Analog zur Ladeinfrastruktur von batterieelektrischen Fahrzeugen besteht zudem das klassische „Henne-Ei-Problem“ bei der Wasserstoffinfrastruktur.

### 5.2.4. Elektrischer Antrieb mit direkter Stromnutzung

Der elektrische Antrieb ermöglicht die insgesamt effizienteste Energienutzung unter den verglichenen Antrieben. Grund dafür sind der hohe Wirkungsgrad des Elektromotors, die Möglichkeit der Wiedergewinnung der Bremsenergie (Rekuperation) und wegfallende Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Es werden lokal keine Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen freigesetzt, lediglich die Stromerzeugung erzeugt dezentral anfallende Emissionen je nach Herstellungspfad. Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien bietet der elektrische Antrieb die Perspektive einer vollständigen Dekarbonisierung.

Elektrische Antriebe verfügen als Hauptkomponenten über einen Elektromotor, Leistungselektronik sowie einen Energiespeicher an Bord oder eine konstante externe Stromzufuhr. Im Vergleich zum Verbrennungsmotor fallen im technisch weniger komplexen Antriebsstrang viele bewegliche und wartungsintensive Bauteile weg (u.a. das mechanische Getriebe), was zu einer geringeren Lärmentwicklung, zu weniger Verschleiß und damit zu reduzierten Wartungskosten führt. Die geringere Lärmentwicklung in Kombination mit lokaler Emissionsfreiheit ergibt Vorteile im Stadtverkehr.

Grundsätzlich kann die Elektrifizierung des Antriebs auch graduell erfolgen – über die Hybridisierung eines konventionellen Dieselmotors ohne separate Stromzufuhr (HEV), die Hybridisierung mit externer Nachladeoption (PHEV)<sup>6</sup> bis zum rein batterieelektrischen Fahrzeug (BEV). Die erforderliche Batteriekapazität steigt dabei mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad des Antriebs.

---

<sup>6</sup> PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) sind interessant für den städtischen Verkehr (kurze Wege, viele Möglichkeiten zur Nachladung im Tagesverlauf), aber nicht für den Fernverkehr. Deshalb wird diese Antriebsoption in dieser Studie nicht näher betrachtet.

Zentrale Herausforderung ist die Energiespeicherung im Fahrzeug. Um ausreichende Reichweiten zur Verfügung stellen zu können – insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen mit hohem Energieverbrauch und hohen Tagesfahrleistungen – erfordern aktuelle Batteriespeicher ein großes Gewicht und Volumen sowie hohe Investitionskosten. Die prognostizierte Entwicklung der Energiedichte und Batteriekosten lässt künftige Verbesserungen erwarten. Zudem stellen lange Ladezeiten sowie die noch nicht flächendeckend ausgebaute Ladeinfrastruktur eine Herausforderung für flexible und zeitoptimierte Logistikkonzepte dar.

Eine Alternative zur Stromspeicherung an Bord mit Nachladen an stationsbasierten Ladesäulen besteht in einer kontinuierlichen Energiezufuhr während der Fahrt über eine dynamische Stromversorgung (Electric Road System, ERS). In diesem Fall kann der Energiespeicher an Bord erheblich kleiner ausfallen, was verschiedene Vorteile wie geringere Fahrzeugkosten, größere Nutzlast und den Wegfall von Standzeiten für die Batterieladung mit sich bringt.

#### **5.2.4.1. Stromversorgung durch Ladesäulen**

Ein klassisches batterieelektrisches Fahrzeug, das seine Traktionsenergie an Ladesäulen punktuell nachlädt, muss seine gesamte Traktionsenergie in einem bordinternen Batteriespeicher mit sich führen. Die aktuellen Batteriepreise und Energiedichten ermöglichen im Pkw-Bereich bereits ökonomisch konkurrenzfähige Fahrzeuge mit Reichweiten von mehreren hundert Kilometern.

Für Nutzfahrzeuge - insbesondere im schweren Fernverkehr - sind aufgrund des höheren Energieverbrauchs und der höheren Tagesfahrleistung erheblich größere und schwerere Batterien erforderlich. Dies führt zu folgenden Einschränkungen:

- Verlust an Nutzlast
- höhere Achslast (ggf. 3. Achse erforderlich)
- hohe Investitionskosten
- lange Batterieladedauer bzw. sehr hohe erforderliche Ladeleistung.

Nutzlastverluste führen bei gewichtsbeschränkten Transporten zu höheren Transportkosten, da weniger Fracht pro Fahrzeug transportiert werden kann, was im sehr kostensensitiven Logistikmarkt eine hohe Bedeutung besitzt. Die langen Ladezeiten bedeuten Herausforderungen für die Planung der Fahrereinsatzzeiten. Da Ladesäulen zudem noch nicht flächendeckend verfügbar sind, ist auch die Umlaufplanung der Fahrzeuge selbst eine Herausforderung. Um kürzere Ladezeiten zu ermöglichen sind sehr hohe Ladeleistungen notwendig. Eine entsprechende Infrastruktur an Schnellladesäulen ist derzeit noch nicht vorhanden, im Aufbau kostenintensiv und stellt hohe Anforderungen an die Integration ins Stromnetz.

Auf absehbare Zeit ist daher zunächst ein Einsatz vollelektrischer Lkw eher im Bereich des städtischen und regionalen Verteilerverkehrs mit vergleichsweise kurzen Strecken realistisch. Dieses Thema besitzt aufgrund der Debatte um Fahrverbote in Innenstädten mit hoher Luftschadstoffbelastung eine hohe Relevanz und es sind bereits Fahrzeuge für den leichten Verteilerverkehr in Betrieb (z. B. Fuso eCanter). Für den schweren Verteilerverkehr gibt es Ankündigungen von großen Herstellern (z. B. Mercedes eActros). Das Unternehmen Tesla hat aktuell einen batterieelektrischen schweren Sattelzug für den Fernverkehr angekündigt.

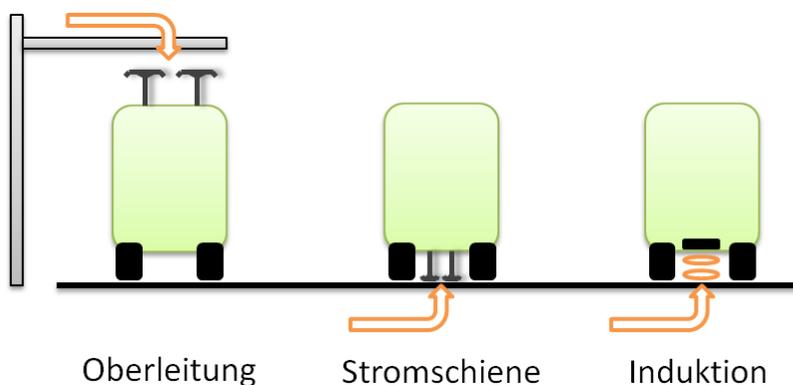
#### **5.2.4.2. Dynamische Stromversorgung während der Fahrt – Electric Road System (ERS)**

Im Gegensatz zum punktuellen Nachladen an Ladesäulen besteht die Möglichkeit, die Traktionsenergie dem Fahrzeug während der Fahrt über eine entlang des Fahrwegs angebrachte Infrastruktur

zuzuführen (sogenannte ERS). Die dynamische Stromzufuhr ermöglicht eine unbegrenzte Reichweite innerhalb des entsprechenden Infrastrukturnetzes und macht eine Batterie an Bord oder einen alternativen Antrieb nur für Fahrten außerhalb des Systems notwendig. Bei einem rein elektrischen Fahrzeug kann so die Batterie erheblich kleiner konzipiert werden, was Einsparungen an Kosten und Gewicht ermöglicht. Gleichzeitig sind aber am Fahrzeug zusätzliche technische Komponenten für die Stromabnahme notwendig, die von der jeweils eingesetzten Infrastrukturtechnologie abhängen. Nachteile ergeben sich durch die hohen anfänglichen Investitionskosten für den Infrastrukturaufbau und potenziell weitere Herausforderungen, wie aufwändige Bauverfahren mit Einschränkungen der Fahrbahnverfügbarkeit, aufwändige Genehmigungsverfahren oder mangelnde Akzeptanz durch den Eingriff in das Landschaftsbild.

Mögliche Konzepte zur dynamischen Energiezufuhr sind konduktive Systeme über eine Oberleitung oder über eine in der Fahrbahn eingelassene Stromschiene sowie alternativ die induktive Energieübertragung (siehe Abbildung 5-1).

**Abbildung 5-1: Konzepte der dynamischen Energieversorgung**



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

Der Anschluss der Versorgungsinfrastruktur an das Mittelspannungsnetz und die Unterwerke sind bei allen Varianten der dynamischen Stromzuführung sehr ähnlich. Das Übertragungssystem zum Fahrzeug unterscheidet sich jedoch in vielen Punkten. Jedes Konzept besitzt unterschiedliche Stärken und Schwächen. Insbesondere die induktive Stromübertragung besitzt gegenüber konduktiven Technologien den Nachteil eines geringen Wirkungsgrads durch Verluste bei der Energieübertragung. **Der Fokus der Betrachtungen im Projekt StratON liegt auf dem Oberleitungssystem als der bislang ausgereiftesten Variante.**

Das Oberleitungssystem besteht aus zwei Fahrdrähten, die oberhalb der Fahrzeuge an einem System aus Masten längs zur Fahrtrichtung gespannt sind. Am Fahrzeug selbst sind zwei Pantographen befestigt, die über direkten Kontakt zum Fahrdraht eine Energieübertragung ermöglichen. Das An- und Abkoppeln an die Oberleitung geschieht automatisch. Verlässt der Lkw die elektrifizierte Fahrstrecke kann er entweder ausschließlich über eine Batterie versorgt werden (O-BEV) oder durch einen konventionellen Antrieb wie zum Beispiel einen Diesel- oder Gasmotor (O-HEV). Die Hybridisierung kann dabei parallel oder seriell als Range-Extender (O-REEV) erfolgen. Der O-BEV besitzt den Vorteil, dass nur ein Antriebsstrang verbaut werden muss, was Kosten und Gewicht spart.

Das Oberleitungssystem befindet sich bereits in der Erprobungsphase. Eine Teststrecke in Großdöln ist seit 2012 in Betrieb und es sind derzeit mehrere Pilotstrecken für Feldversuche in Deutschland im Bau befindlich bzw. es wurde die erste Strecke im Mai 2019 im öffentlichen Straßenraum

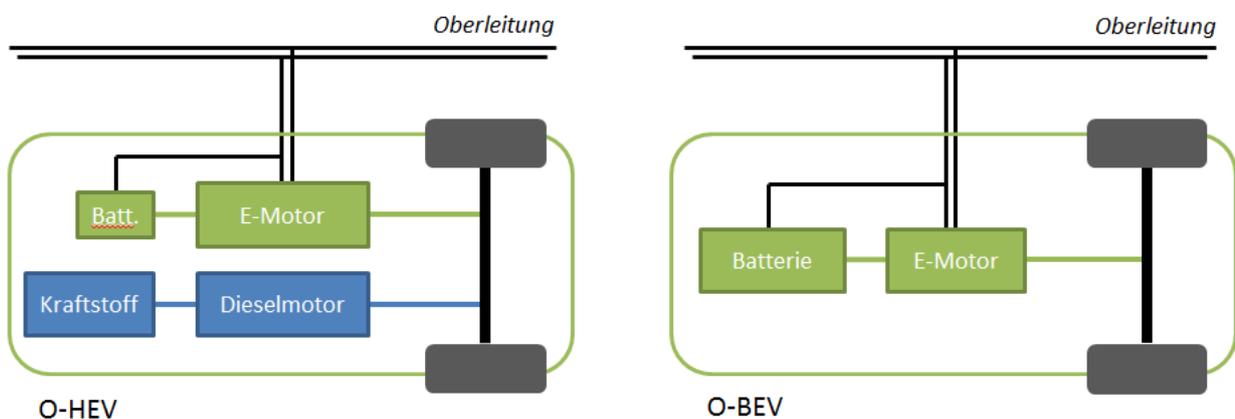
auf der A5 bei Frankfurt eröffnet. Auch in den USA und Schweden sind bzw. waren in den vergangenen Jahren erste Teststrecken in Betrieb.

#### 5.2.4.3. Mögliche Ausgestaltungsvarianten des O-Lkw

Da O-Lkw auch Strecken abseits der elektrifizierten Autobahn zurücklegen, müssen sie mit anderen Antriebskonzepten kombiniert werden. Möglichkeiten hybrider Antriebe sind parallele oder serielle Konzepte mit konventionellen Dieselmotoren, LNG-Motoren, Brennstoffzellen oder Traktionsbatterien.

Im Folgenden werden zwei grundlegende Fahrzeugkonfigurationen betrachtet: Ein paralleler Oberleitungshybrid-Lkw mit konventionellem Dieselmotor (O-HEV) und ein Oberleitungshybrid-Lkw mit Traktionsbatterie (O-BEV). Serielle Hybridkonzepte (Range-Extender) sind theoretisch auch denkbar, werden aber nicht näher betrachtet. Sie liegen technisch zwischen O-HEV und O-BEV und versprechen in der Analyse wenig zusätzlichen Erkenntnisgewinn.

Abbildung 5-2: Schematischer Aufbau eines O-HEV und O-BEV



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

Die Konfiguration des **O-HEV** (Abbildung 5-2, links) erfolgt in Anlehnung an Meszler et al. (2018). Das Fahrzeug besitzt je einen vollwertigen Diesel- und Elektroantriebsstrang mit je 350 kW Leistung. Im Vergleich zu Meszler et al. (2018) wird eine höhere Leistung des Elektromotors gewählt, damit auch längere Steigungsstrecken an der Oberleitung vollständig elektrisch zurückgelegt werden können. Die Pufferbatterie für Überholvorgänge besitzt eine Kapazität von nur 2 kWh (vgl. Meszler et al. 2018; Wietschel et al. 2017). Damit kann der O-HEV auf der Autobahn nur auf elektrifizierten Abschnitten elektrisch fahren. Die Möglichkeit der batterieelektrischen Traktion spielt aufgrund der kleinen Batterie lediglich bei niedrigen Geschwindigkeiten eine Rolle, z. B. beim Rangieren auf Werksgeländen, in Stausituationen oder bei zähflüssigem Verkehr und im Stadtverkehr.

Der **O-BEV** (Abbildung 5-2, rechts) besitzt einen rein elektrischen Antriebsstrang, bestehend aus einem 350 kW Elektro-Motor, Batterie, Pantograph und Leistungselektronik. Der O-BEV hat je nach verbauter Batteriekapazität eine begrenzte Reichweite abseits von elektrifizierten Strecken und somit eine eingeschränkte Einsatzflexibilität. Die Batteriegröße ist aber modular und kann auf die Anforderungen des Nutzers (insb. elektrische Reichweite und Nutzlast) abgestimmt werden. Es muss allerdings beachtet werden, dass bei einer großen Batteriekapazität Nutzlastverluste auftreten. Es werden zwei Varianten näher betrachtet. Ein O-BEV mit einer verhältnismäßig kleinen rein

batterieelektrischen Reichweite von 100 km (O-BEV 100) sowie ein O-BEV mit deutlich größerer batterieelektrischer Reichweite von 200 km (O-BEV 200) und damit größerer Einsatzflexibilität.

Die dafür notwendigen Batteriekapazitäten werden für das Jahr 2025 unter Berücksichtigung des spezifischen Energieverbrauchs und der Entladetiefe auf 175 kWh beim O-BEV 100 und 350 kWh beim O-BEV 200 geschätzt. Es wird angenommen, dass die gleichen Batteriezellen wie im Pkw-Bereich verwendet werden, um Synergien bei der Produktion und damit Kosteneinsparungen zu ermöglichen. Verbaut werden daher Hochenergiezellen, die auf Energiedichte und Kosten optimiert sind. Diese haben eine begrenzte Zyklenanzahl, welche für den Pkw-Betrieb ausreicht, jedoch angesichts der hohen Fahrleistung nicht für die Gesamtlebensdauer eines Fern-Lkw. Das Batteriesystem wird daher ausgetauscht, wenn die Batterie eine zu geringe nutzbare Kapazität erreicht hat. Dazu wird das Batteriesystem einfach zugänglich eingebaut, sodass ein Austausch problemlos möglich ist.

**Tabelle 5-1: Fahrzeugspezifikationen O-Lkw im Jahr 2025**

Parameter	Einheit	O-HEV	O-BEV 100	O-BEV 200
Leistung Fahrmotor	kW	2x350	350	350
Elektr. Reichweite abseits der Oberleitung	km	-	100	200
Batteriekapazität	kWh	2	175	350
Batteriegewicht	kg	60	730* - 875**	1.460* - 1.750**

\* entspricht einer Energiedichte von 240 Wh/kg (auf Batteriesystem-Ebene)

\*\* entspricht einer Energiedichte von 200 Wh/kg (auf Batteriesystem-Ebene)

Quelle: Eigene Annahmen

### 5.3. Treibhausgasminderungspotenzial und Kosten der Technologieoptionen im Vergleich

#### 5.3.1. Treibhausgasminderungspotenzial

Die erforderliche, drastische Minderung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs ist die Haupttriebfeder für die Diskussion von Antriebsalternativen im Straßengüterfernverkehr zum etablierten Diesel-Lkw. Noch stärker als beim Personenkraftwagen (Pkw) werden bei Fern-Lkw die Treibhausgasemissionen angesichts der hohen Jahresfahrleistung von der Nutzungsphase<sup>7</sup> dominiert.

Im Vergleich der Antriebstechnologien zeigen die elektrischen Fahrzeugvarianten (O-Lkw und BEV) bis zum Jahr 2030 die höchsten Treibhausgas-Minderungspotenziale. Im Vergleich zu heutigen Diesel-Fern-Lkw können O-Lkw unter Berücksichtigung des jüngst beschlossenen Kohleausstiegs die betriebsbedingten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2025 nahezu halbieren (minus 46 %) und bis 2030 eine Minderung um 60 % erreichen. Rein batterieelektrische Lkw (BEV) können sogar noch minimal höhere Emissionsminderungen im Betrieb erzielen, allerdings bei einem höheren fahrzeugseitigen Ressourcenbedarf und tendenziell höheren Emissionen in der Herstellungsphase. Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) haben bei Herstellung von Wasserstoff auf Basis des deutschen Strommixes angesichts der geringeren Gesamtenergieeffizienz aktuell mehr als doppelt so hohe Treibhausgasemissionen wie Diesel-Lkw. Im Jahr 2025 wird trotz Berücksichtigung des Kohleausstiegs

<sup>7</sup> Die Emissionen aus der Fahrzeugherstellung und -entsorgung fallen angesichts der hohen Jahresfahrleistung im Vergleich zu Pkw deutlich weniger stark ins Gewicht.

und eines weiter zunehmenden Anteils der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung lediglich ein geringfügiger Emissionsvorteil von etwa 10 % gegenüber heutigen Diesel-Lkw erreicht. Das Minderungspotenzial von Brennstoffzellen-Lkw bis zum Jahr 2030 auf Basis des deutschen Strommixes liegt mit rund 30 % im Bereich des maximalen technischen Treibhausgasminderungspotenzials von Diesel-Lkw.

Die mittelfristig bestehenden Treibhausgasminderungspotenziale von LNG-Lkw müssen im Zusammenhang mit der Tatsache bewertet werden, dass eine über das dargestellte Niveau hinausgehende Minderung auf Basis von fossilem Methan kaum noch möglich ist und damit in dieser Ausgestaltung keine langfristige Dekarbonisierungsoption darstellt. Eine zunehmende Nutzung von synthetischem Methan auf Basis von EE-Strom wäre nach heutigem Kenntnisstand auch jenseits von 2030 mit höheren Kraftstoffkosten verbunden. Außerdem ist die Gesamtenergieeffizienz (WTW-Wirkungsgrad) deutlich geringer als bei einer direkten Stromnutzung in Elektrofahrzeugen.

Insgesamt weisen die elektrischen Fahrzeugvarianten (BEV, O-BEV) die höchste Energieeffizienz (TTW) auf. Ihr Endenergiebedarf ist etwa halb so hoch wie bei Diesel- und LNG-Fahrzeugen. Brennstoffzellenfahrzeuge sind im Betrieb zwar ebenfalls (etwa 15 bis 20 %) effizienter als konventionelle Lkw. Die elektrolytische Wasserstoffherstellung führt aber zu einem zwei- bis dreimal so hohen Gesamtenergiebedarf (WTW) im Vergleich zur direkten Stromnutzung. Bei der gleichen Menge an eingesetztem Strom aus erneuerbaren Energien können Fahrzeuge mit direkter Stromnutzung daher auch die größte Minderung an Treibhausgasemissionen pro Kilometer generieren.

Für eine umfassende Darstellung der Ergebnisse und der Erläuterung von Methodik und Annahmen des Technologievergleichs sei auf den bereits oben erwähnten StratON-Teilbericht „Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr“ (Kühnel et al. 2018) verwiesen. Bei den oben aufgeführten Treibhausgasminderungspotenzialen auf Fahrzeugebene und den anschließenden Szenariobetrachtungen (Kapitel 8) wurden die Energieverbrauchsannahmen der Fahrzeuge sowie insbesondere die Emissionsfaktoren der Stromerzeugung auf Grund des jüngst beschlossenen Kohleausstiegs gegenüber Kühnel et al. 2018 leicht adaptiert bzw. aktualisiert. Daraus resultieren leichte Abweichungen bei den Ergebnissen zu Stromnachfrage und Treibhausgasemissionen gegenüber der vorangegangenen Publikation.

### **5.3.2. Kostenbetrachtung aus Nutzerperspektive**

Die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen im Logistikmarkt wird maßgeblich von den Transportkosten bestimmt. Eine zentrale Anforderung an die eingesetzten Fahrzeuge, und damit für den Markterfolg einer Antriebstechnologie, sind daher konkurrenzfähige Gesamtkosten für einen typischen Nutzungszeitraum des Fahrzeugs im Fernverkehr. Perspektivisch werden sich im Logistikmarkt alternative Antriebstechnologien nur dann durchsetzen können, wenn sie die Gesamtkosten der etablierten Dieselseite unterbieten können.

Der Betrieb von schweren – in der Regel dieselbetriebebenen – Nutzfahrzeugen im Straßengüterfernverkehr wird heute von den Personalkosten dominiert. Es folgen die Kosten für Kraftstoff, Fahrzeugbeschaffung und -wartung (in dieser Reihenfolge). Die Personalkosten sind unabhängig von der Art des Fahrzeugantriebs. Durch den Einsatz von neuen Antriebsalternativen kann es jedoch zu deutlichen Verschiebungen der antriebsspezifischen Kosten in Bezug auf ihre Anteile als auch die absolute Höhe kommen.

Im Rahmen des StratON-Vorhabens wurden die oben eingeführten Fahrzeugvarianten für unterschiedliche Rahmenbedingungen und Zeitpunkte analysiert und wichtige Einflussgrößen im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen hinsichtlich ihres Einflusses auf das Gesamtergebnis analysiert. Die

Gesamtkostenbetrachtung der verschiedenen Antriebstechnologien und Fahrzeugkonfigurationen bezieht sich jeweils auf eine Sattelzugmaschine, die für einen Zeitraum von 5 Jahren (Haltedauer des Erstnutzers) im Straßengüterfernverkehr eingesetzt wird.

Die Ergebnisse der Nutzerkostenanalysen (TCO) lassen sich mit Blick auf alternative Antriebe, insbesondere O-Lkw, für den Betrachtungszeitraum bis 2030 wie folgt zusammenfassen. Weiterführende Analysen und Hintergründe können dem o.g. StratON-Teilbericht (Kühnel et al. 2018) entnommen werden.

- Bei elektrischen Antrieben verschiebt sich die Kostenstruktur im Vergleich zum Dieselantrieb. Die Dominanz der Energiekosten nimmt ab, dafür fallen Mehrkosten bei der Fahrzeuganschaffung an.
- Bereits im Jahr 2025 erreichen O-Lkw unter den getroffenen Baseline-Rahmenbedingungen – je nach Konfiguration – bereits Kostenparität bzw. sogar leichte Kostenvorteile gegenüber dem Dieselvergleichsfahrzeug. Die Ursache sind deutlich geringere Kilometerkosten der elektrischen Antriebsvarianten. Der Trend verstärkt sich bis 2030 aufgrund zusätzlich sinkender Technologiekosten.
- Auch batterieelektrische Lkw mit bis zu 800 km Reichweite können in diesem Zeitraum die Wirtschaftlichkeitsschwelle bereits erreichen. Nutzlastverluste durch die schwerere Batterie und eine eingeschränkere Einsatzflexibilität sowie außerordentliche hohe Anforderungen an die Schnellladeinfrastruktur wurden jedoch nicht berücksichtigt, könnten aber Restriktionen für den (wirtschaftlichen) Einsatz darstellen.
- Brennstoffzellenfahrzeuge können im Betrachtungszeitraum die Wirtschaftlichkeitsschwelle nicht erreichen. LNG-Fahrzeuge erreichen diese zwar bereits heute, weisen aber insbesondere längerfristig ein vergleichsweise geringes Treibhausgasemissionsminderungspotenzial auf.
- Im Jahr 2025 beschaffte O-Lkw erreichen in der vorteilhaftesten Fahrzeugkonfiguration die Wirtschaftlichkeitsschwelle bereits nach 1,5 Jahren. LNG-Fahrzeuge haben mit etwa 8 Monaten die kürzeste Amortisationsdauer. Eine denkbare Mautbefreiung für E-Lkw würde die Amortisationsdauer in etwa halbieren. Auch wirkt sich ein möglichst hoher elektrischer Fahranteil positiv auf die Amortisationsdauer aus.
- Die Wirtschaftlichkeit von alternativen Antrieben bei Fern-Lkw zeigt die größte Sensitivität bezüglich der kilometerabhängigen Kosten, insbesondere der Energiepreise (Diesel, Strom, Wasserstoff) sowie der Mauthöhe. Die Relevanz der Batteriepreisentwicklung steigt mit zunehmender Batteriegröße, ist bei den betrachteten O-Lkw-Konfigurationen jedoch von untergeordneter Bedeutung. Auch die Variation des Fahrzeugrestwertes hat einen vergleichsweise geringen Einfluss auf das Ergebnis.

Die Analyse der Nutzerkosten liefert eine wichtige Grundlage für die Bewertung der diskutierten Antriebsalternativen im Straßengüterfernverkehr. Direkte Schlussfolgerungen hinsichtlich der Marktperspektiven der betrachteten Antriebskonzepte lassen sich aus diesem Analyseschritt jedoch aus verschiedenen Gründen nicht ableiten. Zwar wird die Einführung alternativer Antriebe vor dem Hintergrund der Minderung der Treibhausgasemissionen diskutiert, unter den hier getroffenen Rahmenbedingungen werden ein geringer Energieeinsatz sowie geringe Treibhausgasemissionen jedoch nicht explizit honoriert (z. B. Mautvorteil von elektrischen Lkw, vergleichbare THG-Minderung für fossile Kraftstoffe). Wäre dies der Fall, würden sich die Nutzerkosten noch stärker zu Gunsten der elektrischen Antriebsvarianten verschieben. Aus ökologischer Sicht ist für die Bewertung zudem der Bedarf an nicht-energetischen Ressourcen der unterschiedlichen Antriebs- und Infrastruktursysteme von Relevanz.

Die Reichweite und Einsatzflexibilität der betrachteten Alternativen variiert teilweise erheblich und ist stark von der verfügbaren Energieversorgungsinfrastruktur abhängig. Vor dem Hintergrund der heutigen Anforderungen und der Organisation des Logistikmarkts kann dies zu Zusatzkosten durch eine geringere Auslastung der Fahrzeuge führen und damit den Einsatz neuer Antriebe hemmen.

Der Aufbau der Energieversorgungsinfrastruktur für alternative Antriebe ist mit Investitionen verbunden. In den oben erwähnten Analysen werden diese nicht auf die Fahrzeuge umgelegt. Insbesondere in einer frühen Marktphase bei geringer Auslastung der Infrastruktur würde dies zu hohen Zusatzkosten führen und die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge beeinträchtigen (siehe hierzu die weiterführenden Analysen in Kühnel et al. (2018)).

### 5.3.3. Kostenbetrachtung aus volkswirtschaftlicher Perspektive

Der TCO-basierte Technologievergleich kann aufzeigen, ob alternative Antriebsvarianten in Zukunft unter weitestgehend unveränderten Rahmenbedingungen aus Nutzerperspektive konkurrenzfähig sein können. Angesichts der gesellschaftlichen Herausforderung einer weitgehenden Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs bis zur Mitte des Jahrhunderts sind jedoch darüber hinausgehende Analysen notwendig, die die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten der verschiedenen Antriebsoptionen vor dieser Zielstellung betrachten und weitere Markteintrittsbarrieren für alternative Antriebskonzepte in den Blick nehmen. Erste Analysen weisen auf O-Lkw als einen auch unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten vielversprechenden Dekarbonisierungspfad hin (siehe u.a. Kasten et al. 2016 und Mottschall et al. 2019).

## 5.4. Ausgestaltung der Oberleitungsinfrastruktur

Bei der Energieversorgung via Oberleitung handelt es sich um eine etablierte Technologie, die jedoch für die Anwendung im Straßengüterfernverkehr adaptiert werden muss. Erste Feldversuche mit O-Lkw im öffentlichen Straßenraum befinden sich in der Durchführung bzw. im Aufbau.

Gegenüber den etablierten Anwendungen besteht auf Grund des Hybridantriebskonzepts bei Lkw keine zwingende Notwendigkeit einer durchgehenden Elektrifizierung und es kommen damit unterschiedliche Ausgestaltungsvarianten für die O-Infrastruktur in Frage, die veränderten Rahmenbedingungen (z. B. Anzahl und Antriebskonzept der Fahrzeuge) und möglichen Restriktionen (z. B. technischen Bauwerken, Genehmigungsverfahren/Akzeptanz) Rechnung tragen können. Grundsätzlich kann zwischen einer Teilelektrifizierung, im StratON-Projekt als „Lückenkonzept“ bezeichnet, und dem Konzept einer (nahezu) kontinuierlichen Elektrifizierung unterschieden werden. Dabei ist ersteres durch lediglich abschnittsweise verfügbare Oberleitungen gekennzeichnet, während bei letzterem nur wenige kurze Abschnitte von der Elektrifizierung ausgenommen werden (z. B. aus technischen Gründen).

Das Lückenkonzept reduziert die Kosten und den Materialbedarf pro Autobahnkilometer und ermöglicht es, schwierig zu elektrifizierende Abschnitte auszunehmen. Eine kontinuierliche Elektrifizierung ist infrastrukturseitig zwar mit höheren Kosten verbunden, bietet aber die Möglichkeit auch im Falle eines Diesel-Hybridantriebs (O-HEV) einen hohen elektrischen Fahranteil zu erzielen, während beim Lückenkonzept ein batterieelektrischer Antrieb (O-BEV) notwendig ist, um auch auf den nicht-elektrifizierten Abschnitten einen elektrischen Fahrzeugbetrieb zu ermöglichen. Gleichzeitig muss die O-Infrastruktur in letzterem Fall auf eine höhere Leistung ausgelegt werden, da neben der Fahrzeugtraktion auch die Batterienachladung gewährleistet werden muss. Wenn der Elektrifizierungsanteil auf 50 % reduziert wird, muss auf den elektrifizierten Abschnitten – je nach Auslastung des O-Systems – eine bis zu doppelt so hohe Leistung pro Kilometer installiert werden.

Eine Elektrifizierung von unter 50 % ist für die Anwendung im Straßengüterfernverkehr aus mehreren Gründen ungeeignet. Zum einen würde bei O-HEV ein zu geringer elektrischer Fahranteil resultieren, um bei den üblichen Fahrleistungen im Fernverkehr einen wirtschaftlichen Betrieb dieser Fahrzeuge zu ermöglichen. Zum anderen würde bei O-BEV die Batterie sehr stark beansprucht werden, wenn auf kurzen elektrifizierten Abschnitten in kurzer Zeit ausreichend Energie für längere Elektrifizierungslücken nachgeladen werden müsste. Insbesondere bei O-BEV-Varianten, die dank des O-Systems mit vergleichsweise kleinen Batterien auskommen, führt ein Elektrifizierungsgrad von unter 50 % zu hohen C-Raten (Ladeleistungen), Batteriehuben (Entladetiefen) und Vollzyklenzahlen, die für einen Regelbetrieb auf elektrifizierten Fernstraßen zu hoch erscheinen und die Lebensdauer der Batterie stark beeinträchtigen.

Mit einer zunehmenden Anzahl an O-Lkw steigen die Leistungsanforderungen an das O-Infrastruktursystem. Dem höheren Leistungsbedarf kann u.a. durch die Schließung von Lücken im O-System, der Verstärkung der Infrastruktur (Zubau von zusätzlichen Unterwerken, Verstärkungsleitungen u.a.) sowie perspektivisch auch einer Anhebung des Spannungsniveaus begegnet werden. Im Rahmen des StratON-Vorhabens wurden drei technische Ausgestaltungsmöglichkeiten (Leistungskonfigurationen) für die O-Infrastruktur analysiert, die zu verschiedenen Zeitpunkten bzw. für verschiedene Fahrzeugdichten jeweils ein Optimum darstellen könnten (siehe Kühnel et al. 2018).

Schließlich wurden drei Ausbaustufen für das O-System (Start-, Ausbau- und Endausbaunetz) näher betrachtet, die durch eine zunehmende Netzlänge und Leistungsfähigkeit gekennzeichnet sind. Den Überlegungen liegt dabei eine Systemspannung von 750 V<sub>DC</sub> zu Grunde, die aus zwei Gründen als Vorzugsvariante für den Netzaufbau empfohlen wird. Zum einen ist dieses Spannungsniveau mit der zunehmend im Pkw- und Nutzfahrzeugbereich eingesetzten Hochvolttechnik kompatibel, zum anderen kann mit dieser Spannungsebene die Leistungsfähigkeit des O-Systems auch bei zunehmender Fahrzeuganzahl mittel- bis langfristig sichergestellt werden.

Die Dauerleistung des Netzes, dessen Streckenlänge von 500 km auf 4.000 km im Endausbau ansteigt, beträgt zu Beginn 500 MW und erreicht ja nach Endausbaustand 8 – 16 GW, so dass die versorgbare Fahrzeuganzahl von zu Beginn 5.000 Fahrzeugen auf über 100.000 Fahrzeuge ansteigen kann. Die Gesamtkosten des Infrastruktursystems können je nach Art der Systemauslegung variieren. Für die betrachteten Netzausbaustufen ergeben sich unter den getroffenen Annahmen Investitionskosten von 0,85 Mrd. € für das Startnetz (500 km), 5,1 Mrd. € für das Ausbaunetz (2.000 km) und 10,2 bis 12,2 Mrd. € für das Endausbaunetz (4.000 km). Die unterstellten ansteigenden Investitionskosten pro Kilometer erklären sich mit der unterstellten, ansteigenden Leistungsfähigkeit des Systems je Streckeneinheit, die eine höhere Streckenkapazität ermöglicht (siehe auch Kühnel et al. 2018). Zusätzlich werden jährliche Betriebskosten in Höhe von 2 % der Investitionskosten angenommen.

## **5.5. Mögliche Synergien von O-Lkw und -Infrastruktur mit anderen elektrischen Antriebskonzepten**

Hohe Tagesfahrleistungen und hohe spezifische Energieverbräuche von Fern-Lkw haben bislang den Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen angesichts der sehr hohen Batteriekosten und des erheblichen Zusatzgewichts unwahrscheinlich gemacht. Angesichts der fortschreitenden Batterieentwicklung und entsprechender Produktankündigungen wird der batterieelektrische Betrieb von Fern-Lkw mittlerweile ernsthaft diskutiert. Die Gesamtkostenanalysen weisen auf vergleichbare Nutzerkosten zum O-Lkw und eine Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugbetriebs gegenüber dem Referenz-Dieselfahrzeug in den kommenden 5 bis 10 Jahren hin (Kühnel et al. 2018). Die Hauptherausforderung für den Einsatz von batterieelektrischen Lkw stellt, neben der Integration einer Batterie mit 600 bis 1.200 kWh Kapazität ins Fahrzeug, der Aufbau eines Netzes an Hochleistungs-ladepunkten dar.

Zudem ist mit dem batterieelektrischen Antrieb eine Minderung der Nutzlast durch das erhebliche Batteriegewicht verbunden, die bei schweren Gütern zusätzliche Fahrten erforderlich machen kann und sich damit negativ auf die Kosten und die THG-Emissionen des Transports auswirkt.

Das Oberleitungssystem ermöglicht es, die Batterie von elektrischen Fern-Lkw deutlich kleiner ausulegen und ihre Beanspruchung gering zu halten, so dass sich deutliche Vorteile des O-Lkw in Bezug auf Nutzlast und Ressourceneinsatz gegenüber der batterieelektrischen Konfiguration ergeben. Der Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur auf hoch ausgelasteten Autobahnabschnitten bietet zudem die Möglichkeit, eine öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur möglichst vielen Nutzern zur Verfügung zu stellen und somit den Durchbruch des elektrischen Antriebs im Straßengüterverkehr zu beschleunigen. Hinsichtlich Aufwand und Kosten für die Integration in die bestehende Stromversorgungsinfrastruktur (bzw. deren Ertüchtigung) stellt das Oberleitungssystem, das im Vergleich zu Hochleistungsladestationen an Autobahnraststätten einen räumlich und zeitlich gleichmäßigeren Leistungsbedarf erwarten lässt, die günstigere Option dar. Außerdem dürfte die Möglichkeit zur dynamischen Energieversorgung und Batterieladung während der Fahrt mit Blick auf autonom fahrende E-Lkw, die auf Ruhezeiten der Fahrer verzichten können, zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen.

Im Vergleich der beiden Technologien lassen sich jedoch auch Synergien zwischen den beiden Ansätzen erkennen. Die beiden Antriebskonzepte weisen im technischen Aufbau viele Parallelen auf, so dass beide Konzepte von Fortschritten bei der Entwicklung und Produktion von elektrischen Nutzfahrzeugen und ihren Schlüsselkomponenten profitieren. Diese können zu einer schnelleren Kostendegression und ggf. einer höheren Modellverfügbarkeit führen. Zudem stellt ein mögliches stationäres Schnellladernetz für batterieelektrische Lkw (BEV) auch für O-Lkw mit Traktionsbatterie (O-BEV) ein ergänzendes Energieversorgungsnetz zur Batterieladung jenseits elektrifizierter Straßenabschnitte dar und erweitert damit das Einsatzspektrum. Im regionalen Verteilverkehr können BEV mit geringerer elektrischer Reichweite bereits kurzfristig zum Einsatz kommen und somit einen frühen Nachfragemarkt schaffen. Für den Betrieb von O-Lkw jenseits der elektrifizierten Strecken kommen zudem auch die Brennstoffzelle oder auch verbrennungsmotorische Antriebe in Kombination mit synthetischen Kraftstoffen auf EE-Basis als sogenannte „Reichweitenverlängerer“ in Zukunft in Frage. Das O-Lkw-System zeigt sich also anschlussfähig an eine Vielzahl an zukünftigen Antriebsoptionen und stellt keine frühzeitige Technologiefestlegung dar.

## 5.6. Fazit

O-Lkw können in unterschiedlichen Hybridvarianten ausgelegt werden. Unter der Oberleitung ist somit eine direkte Stromnutzung für den elektrischen Antrieb möglich, ohne aufwändige Zwischenspeicherung im Fahrzeug. Auf nicht elektrifizierten Abschnitten sichert eine Batterie die Stromversorgung oder ein verbrennungsmotorischer Antrieb ermöglicht den konventionellen Betrieb des Fahrzeugs mit der gewohnten Flexibilität.

Gemeinsam mit batterieelektrischen Fahrzeugvarianten zeigen O-Lkw im elektrischen Betrieb die höchste TTW-Energieeffizienz im Vergleich der Antriebs- und Energieversorgungsoptionen. Entsprechend können E-Lkw bereits kurzfristig einen deutlichen WTW-Treibhausgasemissionsvorteil gegenüber Diesel-Lkw erzielen. Brennstoffzellenfahrzeuge haben angesichts einer 50 % geringeren WTW-Effizienz doppelt so hohe THG-Emissionen bei gleichem EE-Anteil an der Stromerzeugung. O-Lkw könnten – vergleichbare Jahresfahrleistungen vorausgesetzt – bereits in den nächsten Jahren unter den gegebenen Rahmenbedingungen wirtschaftlich betrieben werden. Eine Vorfinanzierung der Infrastruktur wäre jedoch notwendig, um einen wirtschaftlichen Betrieb der ersten Fahrzeuge zu ermöglichen.

Die Oberleitungsinfrastruktur kann in unterschiedlichen Ausgestaltungsvarianten (kontinuierlich oder mit Unterbrechungen) und Leistungsstufen aufgebaut und somit veränderten Rahmenbedingungen im Zeitverlauf Rechnung tragen werden. Die Investitionskosten für ein denkbare Endausbaunetz von etwa 4.000 km Länge werden auf 10,2 bis 12,2 Mrd. € geschätzt.

## 6. Verkehrliche Analysen zur möglichen Netzbildung der Oberleitungsinfrastruktur

### 6.1. Einleitung

Ziel dieses Kapitels ist es, auf Basis von verkehrlichen Analysen besonders geeignete Abschnitte des deutschen Autobahnnetzes für den Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur zu ermitteln. Unter Berücksichtigung der verkehrlichen Bedeutung von Autobahnstrecken, der technischen Spezifika von O-Lkw und unter Fortschreibung der Prognose zur Güterverkehrsentwicklung werden hierfür zunächst einzelne Streckenabschnitte hinsichtlich des Verkehrsmengenpotenzials analysiert (Kapitel 0). Auf Basis der Ergebnisse der Einzelstreckenanalysen wird ein mögliches Kernnetz elektrifizierter Autobahnen in Deutschland entworfen und bezüglich der Verkehrsmengenpotenziale untersucht. Zusätzlich werden mögliche Netzausbaustrategien betrachtet und die Verkehrsmengenpotenziale für unterschiedliche Ausbaustände quantifiziert und verglichen (Kapitel 6.3).

### 6.2. Identifikation von Pilotstrecken anhand verkehrlicher Kriterien

#### 6.2.1. Vorgehensweise

Bei den zu identifizierenden Pilotstrecken geht es nicht um Teststrecken, sondern um **erste Anwendungstrecken**, die für sich bereits spürbare verkehrliche Wirkungen und Wirkungen auf den **CO<sub>2</sub>-Ausstoß** haben sollen und wirtschaftliche Kriterien im Hinblick auf ein sinnvolles Nutzen-Kosten-Verhältnis einhalten müssen. Erster Arbeitsschritt bei der Identifikation von Pilotstrecken war die Vorauswahl **aus verkehrlicher Sicht**. Andere Kriterien wie Topographie der Strecke, technische Rahmenbedingungen, Realisierungshürden, z. B. aus planungsrechtlicher Sicht, sind Gegenstand eines weiter unten erläuterten Arbeitsschrittes.

Bei der Vorauswahl werden zunächst alle potenziellen Strecken betrachtet. Die endgültige Auswahl erfolgt dann unter Berücksichtigung der genannten anderen Kriterien. Gleichzeitig stellt die Vorauswahl die Grundlage für die Entwicklung eines größeren zusammenhängenden Netzes dar, in dem z. B. die Strecken sinnvoll zusammengesetzt werden, um ganze Verkehrskorridore abzudecken oder ganze Teilnetze entwickeln zu können. Die Vorgehensweise bei der verkehrlichen Analyse ist wie folgt:

- Erschließung und (noch nicht streckenbezogene) Hochrechnung der Datengrundlagen (siehe Kap. 6.2.2)
- Entwicklung von Kriterien für die Vorauswahl der Strecken (siehe Kap. 6.2.3)
- Streckenspezifische Datenanalyse (siehe Kap. 6.2.4)
- Aufbereitung und Einordnung aus verkehrlicher Sicht (siehe Kap. 6.2.5 und 6.2.6)

#### 6.2.2. Erschließung und Hochrechnung der quantitativen Grundlagen

Basis für die (noch nicht streckenspezifischen) quantitativen Analysen sind die **Quelle-Ziel-Matrizen** aus der **Bundesverkehrswegeplanung** (Verflechtungsprognose 2030, Intraplan et al. 2014). Die

Verwendung dieser vom BMVI für die Zwecke des Forschungsvorhabens StratON freigegebenen Daten ist aus mehreren Gründen sinnvoll bzw. unerlässlich.

- a) Die Quelle-Ziel-Matrizen basieren auf **empirischen Ausgangsdaten** (KBA Verflechtungsdaten, Verkehrsdaten mit Versand und Empfang aller Nutzfahrzeuge, u.a.)
- b) Die Verflechtungsprognose 2030 ist eine **anerkannte** Grundlage, die nicht nur der Bundesverkehrswegeplanung diene, sondern für Bund, Länder und Verbände die Richtschnur für die erwartete Verkehrsentwicklung bilden.
- c) Sie enthält unter anderem eine **vollständige** Erfassung des Straßengüterverkehrs bzw. der **Verflechtungen** im Straßengüterverkehr sowie im Schienengüterverkehr und in der Binnenschifffahrt und schließt den Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr sowie den Hafen-Hinterlandverkehr ein.

Bezogen auf das Basisjahr 2010 wird in der "Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen" bis 2030 ein Zuwachs des Güterverkehrs, hier der Tonnenkilometer auf dem deutschen Straßen-, Schienen- und Wasserstraßennetz, in Höhe von 38 % erwartet. Im Straßengüterverkehr werden sogar 39 % Zuwachs erwartet, d. h. dessen Marktanteil steigt trotz der unterstellten massiven Investitionen gerade im Schienennetz sogar noch leicht an (von 72,0 % auf 72,5 %). Die durchschnittliche jährliche Zuwachsrate liegt bei 1,7 % zwischen 2010 und 2030.

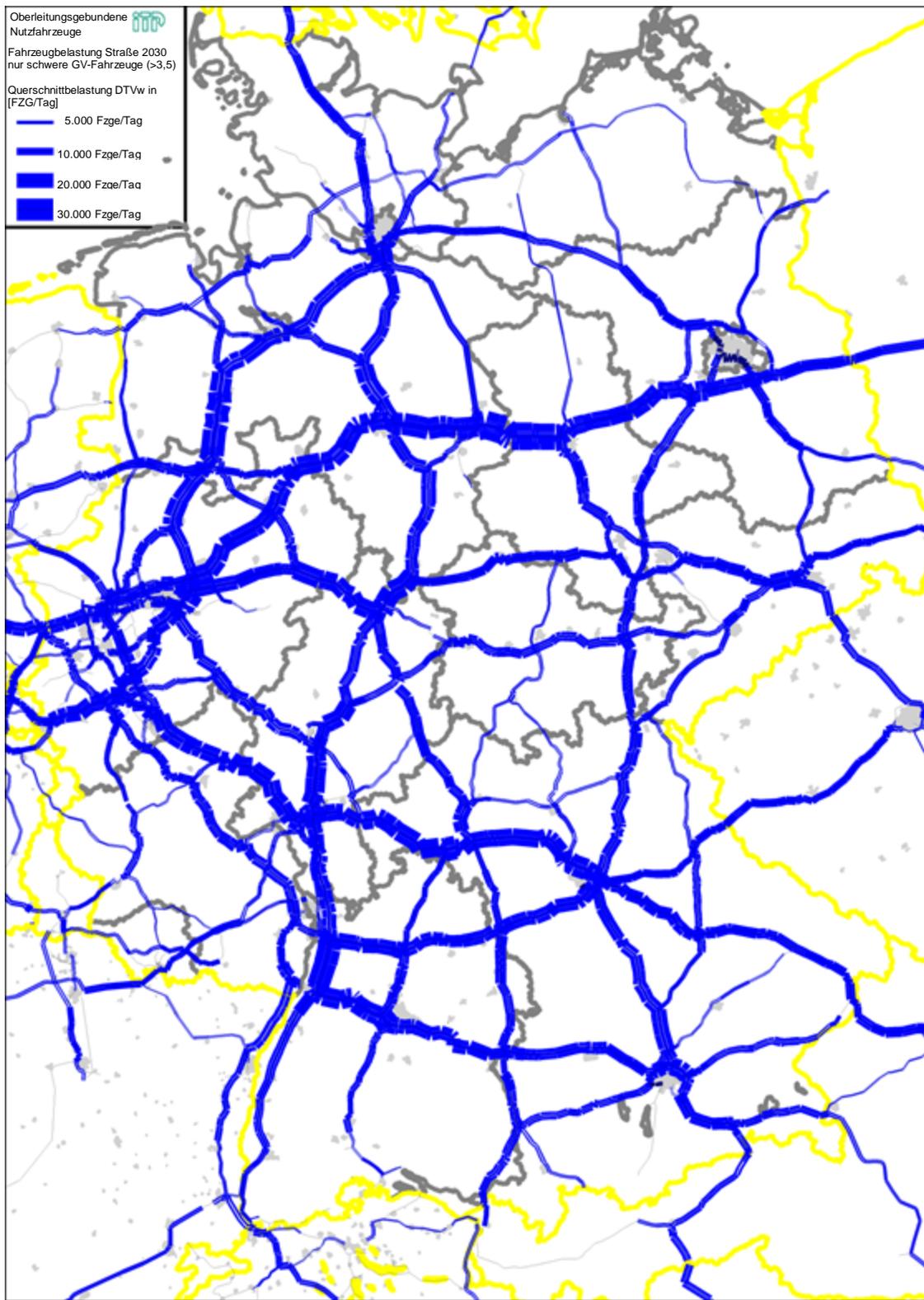
Die Belastungen des Autobahnnetzes in Deutschland im Jahr 2030<sup>8</sup> gemäß der Prognose zum BVWP (Verflechtungsprognose 2030) sind in Abbildung 6-1 gezeigt. Dabei wird nach wie vor von einer gegenüber heute höheren Durchschnittsbelastung ausgegangen, was vor allem strukturelle Ursachen hat (stärker wachsender Fernverkehr, vor allem internationaler Verkehr, als Nah- und Regionalverkehr, der durchschnittlich mit kleineren Fahrzeugen durchgeführt wird), aber auch Effizienzgründe hat (sinkende Leerfahrtenanteile, Lang-Lkw usw.). So steigt die Lkw-Fahrleistung auf deutschen Straßen um 24,5 % bis 2030, das heißt deutlich weniger als die Transportleistung (Tonnenkilometer).

Abbildung 6-2 zeigt davon den Verkehr mit größeren Fahrzeugen, hier ab 4 Achsen. Man erkennt im Vergleich zu Abbildung 6-1, dass auf den großen Magistralen außerhalb der Ballungsräume der Verkehr mit großen Lkw dominiert, während in den Ballungsgebieten die beiden Abbildungen große Unterschiede zeigen: Hier ist der Anteil des Verkehrs mit kleineren Lkw größer, weil hier auch ein erheblicher Lokal- und Regionalverkehr auf den Autobahnen anzutreffen ist. Die Fahrleistung bei den großen Lkw steigt gegenüber 2010 um 31 %, also deutlich stärker als die Fahrleistung im Lkw-Verkehr insgesamt (24,5 %), aber weniger als die Transportleistung (39 %).

---

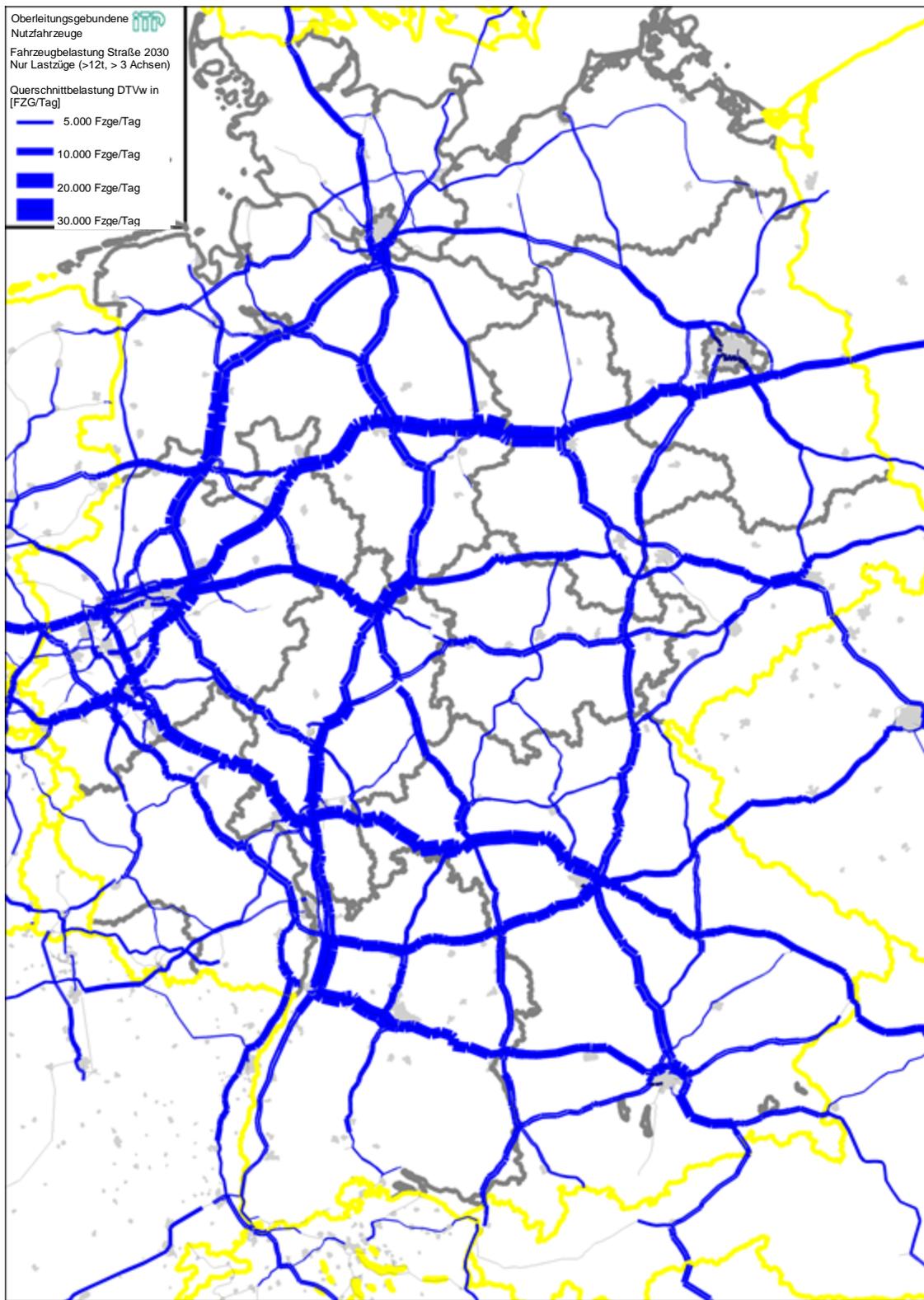
<sup>8</sup> Das Straßennetz in Deutschland für das Jahr 2030 umfasst neben den heute schon existierenden Straßen alle geplanten Maßnahmen des BVWP, die entweder bereits fest disponiert oder als „vordringlicher Bedarf“ eingestuft sind. Planungen zum Ausbau des Straßennetzes im Ausland sind sinngemäß berücksichtigt.

**Abbildung 6-1: Verkehrsverflechtungsprognose 2030, zugeordnet auf Fahrzeugarten, Binnen-, Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehrs Deutschland: Verkehrsbelastungen auf BAB mit Lkw > 3,5 t**



Quelle: ITP, eigene Berechnung und Darstellung

**Abbildung 6-2: Verkehrsverflechtungsprognose 2030, zugeordnet auf Fahrzeugarten, Binnen-, Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehrs Deutschland: Verkehrsbelastungen auf BAB mit Lkw ab 4 Achsen**



Quelle: ITP, eigene Berechnung und Darstellung

Die auf das Jahr 2030 bezogene Prognose war aufgrund der Langfristigkeit der Projektidee "oberleitungsgebundener Lkw-Verkehr" bzw. der möglichen Netzdurchdringung dieser Technologie auf den Prognosehorizont 2050 **fortzuschreiben**. Hierzu waren Annahmen zu den wesentlichen Prognosetreibern zu treffen. Diese sind im Vergleich zu den Annahmen für die BVWP in Tabelle 6-1 dargestellt.

**Tabelle 6-1: Prämissen zur Fortschreibung der Prognose auf 2050**

Bereich	Annahmen BVWP	Annahmen StratON	Quelle/Kommentar
Bevölkerungsentwicklung BVWP	2010: 80,21 Mio. 2030: 78,24 Mio.	(2016: 83,40 Mio.) 2030: 82,9 Mio. 2050: 79,0 Mio.	Basis: 13. KVB, aktualisiert 2017
Erwerbstätigkeit	2010: 41,02 Mio. <sup>1)</sup> 2030: 40,20 Mio.	(2016: 43,5 Mio.) 2030: 44,3 Mio. 2050: 42,9 Mio.	realistisch unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung und der steigenden Alterserwerbsquote
Wirtschaftsentwicklung Deutschland (BIP)	2010–2030: +25,4 % (+ 1,14 % p.a.)	2016 – 2020: + 1,5 % p.a. 2020 – 2030: + 1,4 % p.a. 2030 – 2040: + 1,2 % p.a. 2040 – 2050: + 1,1 % p.a.	Die gängigen Wirtschaftsprognosen für Deutschland (OECD, EU, PwC, Wirtschaftsforschungsinstitute gehen bis 2030 von 1,3 bis 1,5 % p.a. aus (tatsächlich 2010 – 2016: + 10,2 % (+ 1,63 % p.a.))
Ölpreis	2010: 79 \$/barrel 2030: 120 \$/barrel (2010er Preise)	2016: 41 \$/barrel 2030: 100 \$/barrel 2050: 120 \$/barrel (alles 2010er Preise)	Institute (u.a. EIA/AEI) gehen langfristig wieder von steigendem Ölpreis aus.
Nutzerkosten (beim Pkw variable Kosten, Angaben in % p.a.)	Pkw: + 0,5 % Lkw: ± 0,0 % KV: - 0,5 % übr. SGV: ±0,0 % Binnensch.: - 0,6 %	Pkw: + 0,5 % Lkw: ± 0,0 % KV: - 0,5 % übr. SGV: ±0,0 % Binnensch.: - 0,6 %	trotz derzeitiger Rückgänge <sup>2)</sup> gegenüber BVWP beizubehalten aufgrund von Mauteffekt, regulatorischen Rahmenbedingungen, Konsolidierung, wieder steigenden Energiepreisen (ggf. einschl. Steuererhöhungen aufgrund der real seit 2003 zurückgegangenen Energiesteuersätze)

1) an die revidierte amtliche Statistik angepasst

2) Rückgang Pkw 2010 – 2016 ca. 20 %, Rückgang Lkw 2010 – 2016 < 10 %, Rückgang Schiene 2010 – 2016 > 10 %

Quelle: Eigene Darstellung

Die Hochrechnung der Daten erfolgte unter Anwendung des Modells ProMove (Intraplan 2010), das auch beim BMVI für Fragen von Sensitivitätsrechnungen bzw. Variantenuntersuchungen eingesetzt wird.

Die Ergebnisse der Prognosefortschreibung auf 2050 sind in der folgenden Tabelle gezeigt.

**Tabelle 6-2: Ergebnisse der Prognosefortschreibung**

	2010	2030 (BVWP)	(Zuwachs ggü. 2010 in % p.a.)	2050	(Zuwachs ggü. 2010 in % p.a.)
<b>Transportaufkommen (Mio. t)</b>					
Schiene	358,9	443,7	1,1	528,3	1,0
Straße	3.116,1	3.639,1	0,8	4.533,0	0,9
Binnenschiff	229,6	275,6	0,9	305,4	0,7
<b>Summe</b>	<b>3.704,7</b>	<b>4.358,4</b>	<b>0,8</b>	<b>5.366,7</b>	<b>0,9</b>
<b>Transportleistung (Mrd. tkm, territorial)</b>					
Schiene	107,6	153,7	1,8	179,6	1,3
Straße	437,3	607,4	1,7	788,6	1,5
Binnenschiff	62,3	76,5	1,0	88,4	0,9
<b>Summe</b>	<b>607,1</b>	<b>837,6</b>	<b>1,6</b>	<b>1.056,6</b>	<b>1,4</b>

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

Demnach gehen wir beim Straßengüterverkehr von einem Zuwachs von gut 437 Mio. tkm im Jahr 2010 - dem Basisjahr der Bundesverkehrswegeplanung - auf den deutschen Straßen auf 789 Mio. Tonnenkilometer bis 2050 aus, was einen Zuwachs von 80 % oder durchschnittlich rund 1,5 % p.a. bedeutet. Das Wachstum in der Periode 2030 bis 2050 wird also nur unwesentlich geringer sein als in der Periode 2010 bis 2030. Auch weiterhin wird die Zunahme der Fahrleistung (Fahrzeugkilometer) geringer ausfallen als die Zunahme der Transportleistung (Tonnenkilometer). Erstere steigt zwischen 2010 und 2050 um knapp 39 %. Bei den schweren Lkw sind es über 44 %.

### 6.2.3. Kriterien für die Vorauswahl der Strecken

Die Streckenvorauswahl erfolgte unter folgenden Kriterien:

- (1) **Mindestlänge:** Die Strecke sollte möglichst etwa 200 km lang sein. Dies entspricht etwa der Entfernung der großen Wirtschaftsräume in Deutschland untereinander. Neben diesem siedlungsstrukturellen Kriterium gibt es dafür aber auch eine technische Erklärung: Bei batteriebetriebenen Lkw ist derzeit von einer technisch und wirtschaftlich sinnvollen Reichweite von mindestens 80-100 km auszugehen. Ein Oberleitungssystem muss diese Strecke deutlich übertreffen.
- (2) **Fernverkehrsbedeutung:** Die Strecken sollen hohe Verkehrsbelastungen aufweisen und vor allem dem Fernverkehr dienen und im Hinblick auf Kapazitätsmöglichkeiten den Charakter einer Magistrale haben. Daher sind vor allem die "einstelligen" Autobahnen in Deutschland (A1 bis A9) gefragt.

- (3) **Homogenität:** Es sollen möglichst wenig Verzweigungen bestehen, der Verkehr also eine klare Verkehrsrichtung haben bzw. der Verkehr sollte großenteils die Gesamtstrecke befahren. Eine Autobahn im Rhein-Ruhr-Raum oder eine Ringautobahn wie die A10 oder die A100 als „Stadtautobahn“ sind wenig geeignet, weil hier die Verkehre häufig nur Teilabschnitte befahren.
- (4) **Konkurrenz zur Bahn:** Abschnitte, bei denen eine nennenswerte zusätzliche Verlagerung vom Straßengüterverkehr auf den Schienengüterverkehr dort nur schwer realisierbare, derzeit nicht im vordringlichen Bedarf geplante Neubaumaßnahmen erforderlich machen würde, sind für Oberleitungs-Abschnitte besonders geeignet (z. B. Frankfurt Main – Würzburg – Nürnberg – Passau).  
Zudem wurden nur BAB-Strecken in Betracht gezogen, die entweder bereits heute bestehen oder gemäß BVWP voraussichtlich bis 2030 oder kurz danach fertiggestellt sind, d. h. dass
- die Elektrifizierung nur auf Strecken im Bestand (bezogen auf 2030) erfolgt,
  - damit kein Neubau oder über die Elektrifizierung hinausgehender Ausbau von BAB-Strecken erforderlich ist und
  - somit keine zusätzlichen Kapazitäten im Autobahnnetz für den Straßengüterverkehr geschaffen werden.
- Von der Infrastrukturseite wurde also keine zusätzliche Konkurrenz zum Schienenverkehr geschaffen und von der Nachfrageseite wurde angenommen, dass es nicht zu einer (Rück-) Verlagerung vom Schienengüterverkehr zum Straßengüterverkehr kommt und dass die Randbedingungen der Konkurrenz zwischen Schiene und Straße, nämlich Transportzeit, Transportkosten und Transport-Zuverlässigkeit, sich durch die Elektrifizierung der Straße nicht grundlegend ändern.
- (5) **Erweiterungsmöglichkeiten:** Die Strecken sollen im Sinne von Verkehrskorridoren erweiterbar sein (keine Insellösungen), um sie so für langlaufende und durchgängige Verkehre noch attraktiver zu machen als die Pilotstrecke allein.

Anhand dieser Kriterien:

- ca. 200 km Länge,
- hohe Verkehrsbelastung durch schwere Lkws (siehe Abbildung 6-2),
- homogene Struktur (lange ununterbrochene Strecke mit Korridor-Charakter),
- hoher Anteil langlaufender Verkehre

wurden 17 BAB-Strecken zur weiteren verkehrlichen Analyse ausgewählt. Diese sind in Abbildung 6-3 graphisch dargestellt und in Tabelle 6-3 genau definiert.

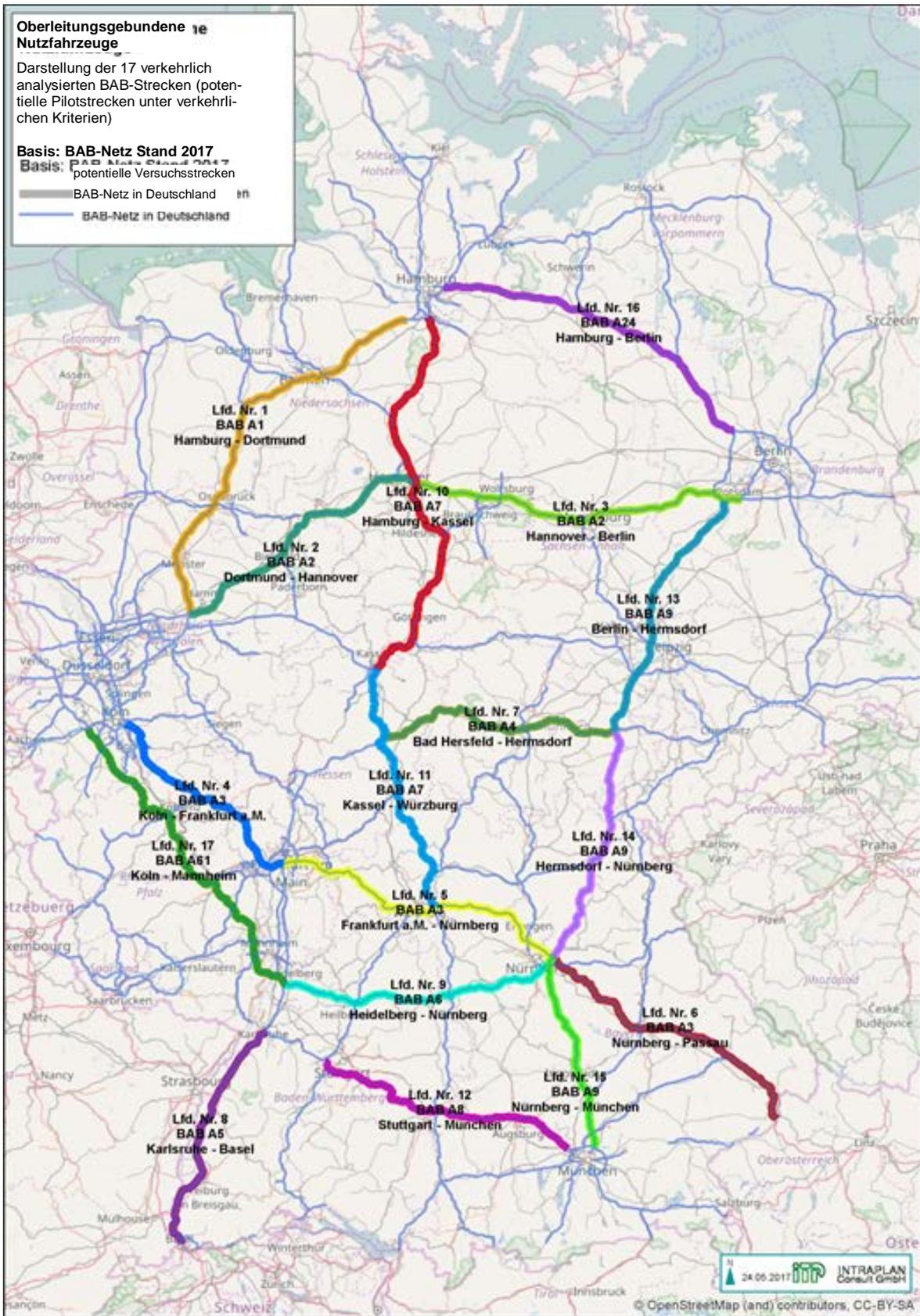
Die Kriterien der Streckenauswahl orientieren sich an der Hauptzielstellung des Projekts und damit maßgeblich an den Potenzialen zum Einsatz von O-Lkw im Güterfernverkehr. Zusätzliche Potenziale durch den Regionalverkehr werden nicht explizit betrachtet und durch das gewählte Vorgehen daher tendenziell womöglich unterschätzt. In Abschnitt 8.4.2 werden daher mögliche zusätzliche Potenziale durch den Regionalverkehr eingeordnet.

Die realisierten Teststrecken mit O-Lkw auf der A5 bei Frankfurt (Projekt ELISA) und auf der A1 bei Lübeck (Projekt FESH) sind nicht Bestandteil der Auswahlstrecken und im Falle der Teststrecke zwischen Hamburg und Lübeck auch nicht Teil des vorgeschlagenen Kernnetzes. Diese Tatsache ist jedoch nicht mit fehlenden verkehrlichen Potenzialen dieser Abschnitte gleichzusetzen. So kommt

der Netzergänzung auf dem Abschnitt Bad Hersfeld – Karlsruhe (A5) angesichts der Verkehrsstärke dieser Strecke eine zentrale Bedeutung für das Kernnetz zu (siehe Abschnitt 6.3). Das Fehlen der Strecke nach Lübeck im Kernnetz erklärt sich mit der Fokussierung des Projekts auf nationale Verkehre. Mit Blick auf mögliche internationale Korridore wurde dieser Streckenabschnitt im Rahmen des Projekts jedoch als eine wichtige Anschlussstrecke für ein länderübergreifendes Oberleitungsnetz identifiziert.

Mögliche Verlagerungseffekte von Verkehren bei einer frühzeitigen Elektrifizierung von Einzelstrecken im Falle von weitgehend parallellaufenden Autobahnstrecken (siehe beispielsweise A3 und A 61) wurden bei den verkehrlichen Analysen nicht berücksichtigt.

Abbildung 6-3: Ergebnis der Streckenvorauswahl



Quelle: ITP, eigene Darstellung

**Tabelle 6-3: Streckenvorauswahl: Gewählte Strecken mit genauer Definition**

Lfd. Nr.	Auto- bahn Nr.	Abschnitt (grob)		Abschnitt (fein)		km
		von	nach	von	nach	
1	A1	Hamburg	Dortmund	AK Dreieck Buchholz A1/A261	AK Kamener Kreuz A1/A2	287
2	A2	Dortmund	Hannover	AK Kamener Kreuz A1/A2	AK Hannover Ost A2/A7	197
3	A2	Hannover	Berlin	AK Hannover Ost A2/A7	AD Dreieck Nubetal A2/A115	231
4	A3	Köln	Frankfurt a.M.	AD Heumar A3/A4/A59	AK Frankfurter Kreuz A3/A5	171
5	A3	Frankfurt a.M.	Nürnberg	AK Frankfurter Kreuz A3/A5	AK Nürnberg A3/A9	231
6	A3	Nürnberg	Passau	AK Nürnberg A3/A9	AG Grenze Suben A3	226
7	A4	Bad Hersfeld	Hermsdorf	AK Kirchheimer Dreieck A4/A7	AK Hermsdorfer Kreuz A4/A9	180
8	A5	Karlsruhe	Basel	AD Karlsruhe A5/A8	AG Grenze Weil A5	186
9	A6	Heidelberg	Nürnberg	AK Walldorf A5/A6	AK Nürnberg Ost A6/A73	204
10	A7	Hamburg	Kassel	AK Horster Dreieck A1/A7	AK Kassel A7/A44	286
11	A7	Kassel	Würzburg	AK Kassel A7/A44	AK Kreuz Biebelried A3/A7	204
12	A8	Stuttgart	München	AK Dreieck Leonberg A8/A81	AK Dreieck Eschenried	203
13	A9	Berlin	Hermsdorf	AK Potsdam A2/A9	AK Hermsdorfer Kreuz A4/A9	186
14	A9	Hermsdorf	Nürnberg	AK Hermsdorfer Kreuz A4/A9	AK Nürnberg A3/A9	185
15	A9	Nürnberg	München	AK Nürnberg A3/A9	AK München Nord	152
16	A24	Hamburg	Berlin	AK Hamburg Ost A1/A24	AK Dreieck Havelland	227
17	A61	Köln	Mannheim	AK Kreuz Kerpen A4/A61	AK Walldorf A5/A6	261

Quelle: Eigene Darstellung

#### 6.2.4. Streckenspezifische Datenanalysen

Bei der Ermittlung der für eine weitere verkehrliche Untersuchung geeigneten Pilotstrecken wurde wie folgt vorgegangen:

Die auf das Jahr 2050 fortgeschriebenen Quelle-Ziel-Matrizen des Straßengüterverkehrs gemäß Kapitel 6.2.2 wurden auf das Verkehrsnetz zur Darstellung des Gesamtverkehrs umgelegt (**Umlegung (1)**). In einer **zweiten Umlegung** wurden nun nur die schweren Lkw ab 4 Achsen, die im Fernverkehr mindestens 100 km unterwegs sind, im durchschnittlich täglichen Werktagsverkehr (1/300 des Jahres) dargestellt. Auf Basis dieser Umlegungen erfolgte eine sogenannte **Strombündelanalyse**. Hier wurden die Quelle-Ziel-Matrizen aller Lkw-Fahrten (ab 4 Achsen) erfasst, die zwischen zwei Knoten auf der Auswahlstrecke verkehren, die mindestens 100 km voneinander entfernt sind. Bei den häufig vorkommenden Mehrfacherfassungen wird in diesem Falle, also bei ein und

derselben Quelle-Ziel-Relation derjenige Wert herangezogen, der die längste Entfernung auf der Auswahlstrecke erfasst.

Die auf diese Weise gefilterte Ergebnismatrix wird hinsichtlich der Entfernungen im Vor- und Nachlauf dann in Kategorien eingeteilt, Die Entfernungen werden dabei aus der Umlegung der Quelle-Ziel-Matrizen auf das Straßennetz berechnet, die Vorlaufentfernung ist dabei die Entfernung von der Quelle bis zur Auffahrt auf die BAB-Auswahlstrecke, die Nachlaufentfernung die Entfernung von der Abfahrt von der BAB-Auswahlstrecke bis zum Ziel der Fahrt, wobei Entfernungen im Ausland mit berücksichtigt werden.

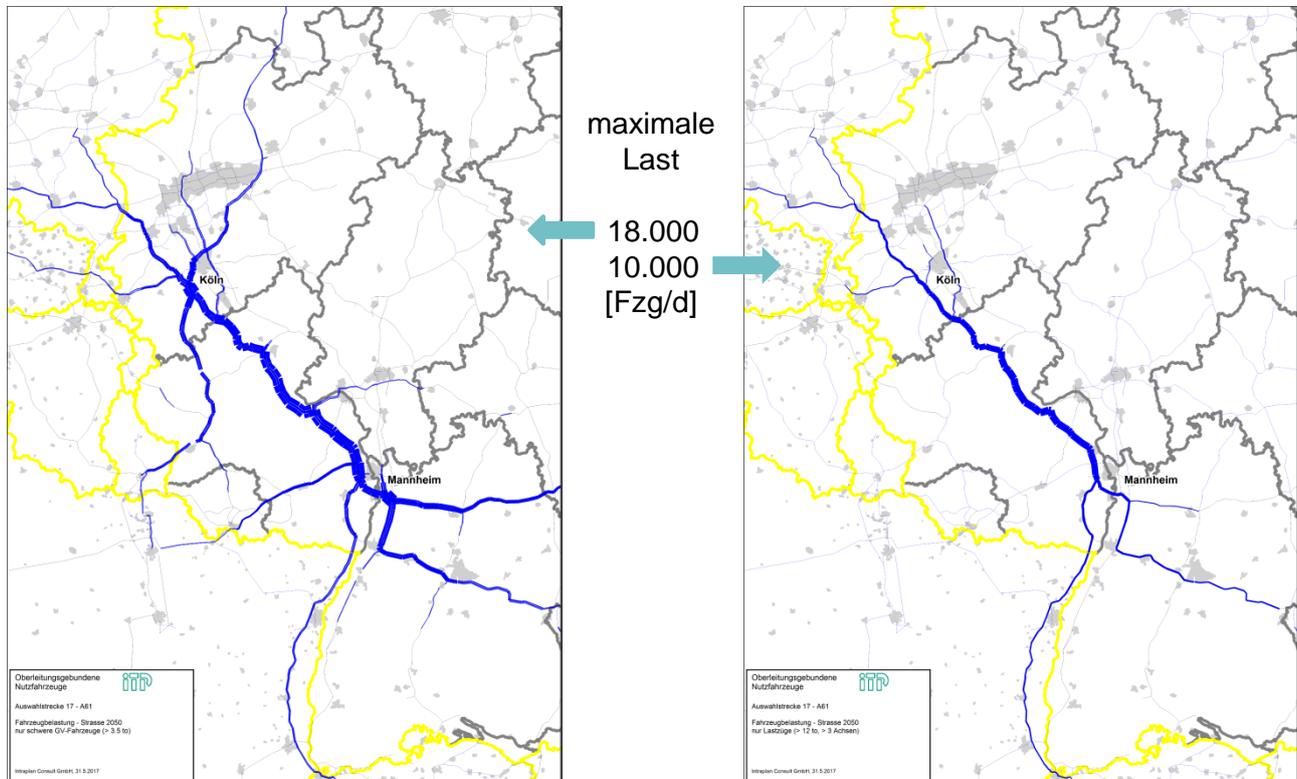
#### **6.2.5. Ergebnisse – Beispielstrecke A61**

Beispielhaft sind die Ergebnisse der Datenaufbereitung in der folgenden Abbildung 6-4 anhand der BAB A61 zwischen Köln und Mannheim dargestellt. Dabei zeigen die Abbildung links die Streckenbelastung (mit Vor- und Nachlauf) aller Lkw, die irgendeinen Abschnitt der A61 zwischen Köln und Mannheim befahren, und rechts die Belastung nur mit schweren Lkw ab 4 Achsen, die mehr als 100 km auf der A61 unterwegs sind. Gezeigt ist die jeweilige Last im Abschnitt zwischen dem Autobahnkreuz Kerpen (A4/A61) bei Köln und dem Kreuz Walldorf (A5/A6) bei Mannheim, und zwar jeweils mit Vor- und Nachlauf. Daraus wird der Bündelungseffekt der Strecke deutlich. Bei den schweren Lkw ist die Fahrtrichtung/Verzweigung des Verkehrs im Norden Richtung Niederlande deutlich. Im Süden teilt sich der Verkehr vor allem auf die A5 (Oberrhein) und die A8 (Richtung München) auf. Auf den stärksten Abschnitten sind insgesamt etwa 18.000 Lkw im DTV-w (linke Abbildung) bzw. rund 10.000 schwere Lkw (rechte Abbildung) unterwegs.

**Abbildung 6-4: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 17 – A61 zwischen Köln und Mannheim – bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 t

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

In Tabelle 6-4 sind korrespondierend zur Abbildung 6-4, rechte Seite die Ergebnisse der Datenanalysen zusammengefasst. Dargestellt sind die Verkehrsleistungen, und zwar die Fahrten und Fahrzeugleistungen kategorisiert nach Entfernungsstufen im Vor- und Nachlauf für schwere Lkw mit mind. 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke. Mögliche zusätzliche Potenziale durch den Regionalverkehr und andere Fernverkehre mit weniger als 100 km auf der Auswahlstrecke wurden hingegen nicht betrachtet, könnten aber ein zusätzliches Potenzial für die Elektrifizierung darstellen (siehe Abschnitt 8.4.2).

So wurden auf der A61 im genannten Abschnitt 2.668 Fahrzeuge im schweren Lkw-Verkehr ermittelt, die rund 525.000 Fzg-km im DTV-w auf dieser Strecke zurücklegen, die sowohl im Vorlauf zur als auch im Nachlauf von der Auswahlstrecke weniger als 100 km unterwegs sind. Dabei handelt es sich immerhin um 22 % des Verkehrs mit schweren Lkw auf dem Streckenabschnitt. Falls die Auswahlstrecke elektrifiziert wäre, könnten diese Lkw also nicht nur 525.000 Fzg-km pro Tag "unter Fahrdracht" zurücklegen, sie könnten auch im Vor- und Nachlauf batteriebetrieben unterwegs sein, wenn man von einer Reichweite der Batterien von künftig 100 km ausgeht. Daher ist diese Kategorie (bis 100 km Vor- und Nachlauf) hier dunkelgrün hervorgehoben, weil die Verkehre technisch auf der ganzen Strecke, also einschließlich Vor- und Nachlauf elektrisch betrieben werden können.

**Tabelle 6-4: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 17 – A61 zwischen Köln und Mannheim 2050 im DTV-w**

Auswahlstrecke 17						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungs- klasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungs- klasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	104.995	2.668	525.282	22,0 %	bis 100	107.350
bis 100	63.464	1.503	344.680	14,4 %	101 - 250	257.123
bis 100	34.144	704	157.958	6,6 %	251 - 500	229.067
bis 100	23.331	403	93.863	3,9 %	ab 501	275.934
101 - 250	288.072	1.601	362.834	15,2 %	bis 100	71.449
101 - 250	181.347	985	243.074	10,2 %	101 - 250	170.969
101 - 250	102.668	530	132.627	5,6 %	251 - 500	173.277
101 - 250	42.898	264	61.204	2,6 %	ab 501	181.268
251 - 500	204.486	629	141.465	5,9 %	bis 100	31.402
251 - 500	106.594	343	80.233	3,4 %	101 - 250	61.164
251 - 500	63.121	214	51.788	2,2 %	251 - 500	70.884
251 - 500	30.389	99	22.111	0,9 %	ab 501	71.144
ab 501	267.075	385	85.539	3,6 %	bis 100	21.448
ab 501	229.110	325	55.363	2,3 %	101 - 250	51.840
ab 501	102.120	141	29.528	1,2 %	251 - 500	42.615
ab 501	0	0	0	0,0 %	ab 501	0

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

Bei weiteren zusammen 4.100 Lkw, die zusammen 950.000 Fzg-km pro Tag auf der Auswahlstrecke zurücklegen (in der Tabelle hellgrün unterlegt), beträgt der Vor- und Nachlauf von/zur Auswahlstrecke weniger als 250 km. Hier wäre möglicherweise ein Range-Extender eine technische Lösung, um sowohl oberleitungsgebunden als auch auf sonstigen Strecken elektrisch verkehren zu können.

Die wichtigsten Kenngrößen für diese Strecke sind in Tabelle 6-5 wiedergegeben.

**Tabelle 6-5: Relevante Kennziffern der Auswahlstrecke 17 - A61 zwischen Köln und Mannheim 2050**

Kategorie	Einheit	Wert
1. Streckenlänge	(km)	261
2.1 Fahrleistung Lkw	(1000 Fzg-km/DTV-w)	4.334
2.2 davon schwere Lkw	(1000 Fzg-km/DTV-w)	2.388
3. mittlere Fahrtweite der schweren Lkw		
3.1 -auf der Auswahlstrecke	(km)	221
3.2 -im Vorlauf	(km)	171
3.3 -im Nachlauf	(km)	168
4.1 Fahrleistung schwere Lkw mit Vor- und Nachlauf $\leq 100$ km	(1000 Fzg-km/DTV-w)	<b>525</b>
4.2 Anteil am Lkw-Verkehr insgesamt	(%)	22
4.3 Fahrleistung schwere Lkw mit Vor- und Nachlauf $\leq 250$ km	(1000 Fzg-km/DTV-w)	<b>1.476</b>
4.4 Anteil am schweren Lkw-Verkehr insgesamt	(%)	62
5.1 Verhältnis gesamter Schwerverkehr (Ziff. 2.2) zu Streckenlänge	(Fzg-km DTV-w/km Strecke)	<b>9.149</b>
5.2 Verhältnis Schwerverkehr mit Vor- und Nachlauf $\leq 250$ km (Ziff. 4.3) zu Streckenlänge	(Fzg-km DTV-w/km Strecke)	<b>5.655</b>
5.3 Verhältnis Schwerverkehr mit Vor- und Nachlauf $\leq 100$ km (Ziff. 4.1) zu Streckenlänge	(Fzg-km DTV-w/km Strecke)	<b>2.011</b>

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

Demnach werden fast 1,5 Mio. Fzg-km pro Werktag (0,44 Mrd. Fzg-km/Jahr) von Fahrzeugen zurückgelegt, bei denen sowohl der Vor- als auch Nachlauf zur Ausweichstrecke bis 250 km beträgt. Diese Fahrzeuge erzeugen mit Verbrennungsmotoren ca. 0,4 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr. Wenn davon nur ein Teil des Verkehrs mit Oberleitung betrieben würde, wären also erhebliche Einsparungen von CO<sub>2</sub> möglich.

Das Verhältnis von Fahrzeugkilometern in dieser Kategorie zur Streckenlänge beträgt 1:5.655, das heißt pro Streckenkilometer verkehren pro Werktag 5.655 Fahrzeuge in der genannten Kategorie.

### 6.2.6. Ergebnisse alle Strecken

Die in Kap. 6.2.5 gezeigten Analysen wurden für alle ausgewählten Strecken durchgeführt. Die Detailergebnisse sind in Anhang A für jede Einzelstrecke gezeigt, und zwar

- a) die der Abbildung 6-4 entsprechenden Strombündelanalysen für den gesamten und den schweren Lkw-Verkehr (mit Angabe der maximalen Fahrzeugbelastungen auf den am stärksten belasteten Abschnitten).

b) die Aufteilung der Ströme nach Entfernungsstufen des Vor- und Nachlaufs gemäß Tabelle 6-4. Dabei sind die Belastungen - hier Fahrzeugkilometer - der Strecken sowohl im Güterverkehr ab 3,5 t als auch im schweren Güterverkehr (ab 4 Achsen) zum Teil deutlich höher als bei der oben gezeigten Beispielstrecke A 61 (siehe Tabelle 6-6). Dies trifft vor allem auf die A2 zwischen Hannover und Berlin zu (11 Mio. Fzg-km/Werntag im Lkw-Verkehr, davon 3,6 Mio. im schweren Lkw-Verkehr, die mindestens 100 km unterwegs sind), die A1 zwischen Hamburg und Dortmund (7,7 Mio. Fzg-km/Tag, davon 3,9 Mio. mit schweren Lkw ab 100 km) und die A2 zwischen Dortmund und Hannover (7,8 Mio. Fzg-km/Tag, davon 2,0 Mio. mit schweren Lkw ab 100 km).

**Tabelle 6-6: Relevante verkehrliche Kennwerte der Auswahlstrecken – Lkw-Verkehr, davon schwere Lkw ab 4 Achsen, die mindestens 100 km auf der Auswahlstrecke unterwegs sind, mittlere Fahrtweiten im Vor- und Nachlauf der Auswahlstrecke**

Auto- bahn- Nr.	von	nach	Strecken- länge  km	Fahrleistung		mittlere Fahrtweite der schweren Lkw ab 100 km (Spalte 3)		
				alle Lkw  1000 Fzg- km/DTV- w	schwere Lkw, die mind. 100 km auf der Strecke unter- wegs sind  1000 Fzg- km/DTV- w	km auf der Aus- wahl- strecke	km im Vorlauf	km im Nach- lauf
			1	2	3	4	5	6
A1	Hamburg	Dortmund	287	7.694	3.887	212	175	202
A2	Dortmund	Hannover	197	7.780	2.038	170	402	314
A2	Hannover	Berlin	231	10.988	3.617	184	416	323
A3	Frankfurt/M	Nürnberg	231	8.573	3.470	174	345	330
A3	Köln	Frankfurt/M	171	5.533	2.376	153	321	315
A3	Nürnberg	Passau	226	6.300	2.133	189	441	428
A4	Bad Hers- feld	Hermsdorf	180	3.179	1.122	159	228	236
A5	Karlsruhe	Basel	186	3.597	863	149	219	178
A6	Heidelberg	Nürnberg	204	6.227	2.104	177	326	400
A7	Hamburg	Kassel	286	6.518	2.921	188	172	180
A7	Kassel	Würzburg	204	3.304	1.249	131	273	254
A8	Stuttgart	München	203	5.058	1.752	178	298	276
A9	Berlin	Hermsdorf	186	3.565	1.188	143	299	281
A9	Hermsdorf	Nürnberg	185	3.697	1.662	153	287	298
A9	Nürnberg	München	152	4.013	1.730	144	254	217
A24	Hamburg	Berlin	227	3.137	1.023	192	145	139
A61	Köln	Mannheim	261	4.334	2.388	221	171	168

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

Dabei sind die mittleren Fahrtweiten im Vor- und Nachlauf zur Auswahlstrecke zum Teil deutlich unterschiedlich. Auffallend ist dabei, dass die Strecken, die auf Hamburg zulaufen, hier niedrigere Werte haben als bei den anderen Strecken. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Hamburg aufgrund des Hafens und des damit zusammenhängenden Logistikzentrums ein im Vergleich zu den anderen deutschen Städten höheres Quell- und Zielverkehrsaufkommen hat. Die niedrigsten Werte des durchschnittlichen Vor- und Nachlaufs hat die Strecke Hamburg – Berlin aufzuweisen. Diese Strecke hat zwar ein vergleichsweise niedriges Gesamtaufkommen. Der Anteil des Verkehrs aber, der die größten deutschen Kernstädte Hamburg oder Berlin entweder als Quelle oder Ziel oder sogar als Quelle und Ziel hat, ist größer als der bei allen anderen Strecken.

Demgegenüber weisen vor allem die großen internationalen Transitstrecken, vornehmlich die A2 (Dortmund – Hannover und Hannover – Berlin) und die A3 (vor allem Nürnberg – Passau), hohe Vor- und Nachlaufmengen auf. Hier sind die langlaufenden internationalen Verkehre und Transitverkehre dominant. Die Potenziale für O-Lkw würden sich insbesondere auf diesen Strecken bei einem grenzüberschreitenden Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur deutlich erhöhen und bilden damit sinnvolle Ansatzpunkte für eine internationale Ausbaustrategie. In Tabelle 6-7 sind die wichtigsten Kennwerte zum Potenzial für oberleitungsgebundene Lkw gezeigt.

**Tabelle 6-7: Kennwerte zum Verkehrspotenzial auf den Auswahlstrecken – schwere Lkw, die mindestens 100 km auf der Auswahlstrecke unterwegs sind, darunter Verkehr mit Vor- und Nachlauf bis 250 km und darunter bis 100 km**

Auto- bahn- Nr.	von	nach	Fahrleistung				
			schwere Lkw, die mind. 100 km auf der Strecke unterwegs sind	davon mit Vor und Nachlauf ≤ 250 km	Anteil Spalte (2) an Spalte (1)	davon mit Vor und Nachlauf ≤ 100 km	Anteil Spalte (4) an Spalte (1)
			1000 Fzg- km/DTVw	1000 Fzg- km/DTVw	%	1000 Fzg- km/DTVw	%
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
A1	Hamburg	Dortmund	3.887	2.368	61	1.071	28
A2	Dortmund	Hannover	2.038	788	39	280	14
A2	Hannover	Berlin	3.617	1.144	32	284	8
A3	Frankfurt/M	Nürnberg	3.470	1.107	32	247	7
A3	Köln	Frankfurt/M	2.376	806	34	263	11
A3	Nürnberg	Passau	2.133	489	23	285	13
A4	Bad Hers- feld	Hermsdorf	1.122	511	46	110	10
A5	Karlsruhe	Basel	863	411	48	298	35
A6	Heidelberg	Nürnberg	2.104	724	34	300	14
A7	Hamburg	Kassel	2.921	1.615	55	635	22
A7	Kassel	Würzburg	1.249	419	34	52	4
A8	Stuttgart	München	1.752	790	45	388	22
A9	Berlin	Hermsdorf	1.188	404	34	186	16
A9	Hermsdorf	Nürnberg	1.662	719	43	150	9
A9	Nürnberg	München	1.730	691	40	314	18
A24	Hamburg	Berlin	1.023	715	70	429	42
A61	Köln	Mannheim	2.388	1.476	62	525	22

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

Demnach hat die A1 zwischen Hamburg und Dortmund die höchste Fahrleistung im Schwerverkehr, der mindestens 100 km auf der Auswahlstrecke unterwegs ist. Dies gilt auch bei denjenigen Fahrzeugen, die sowohl im Vor- als auch im Nachlauf höchstens 250 km zurücklegen. Das trifft hier für 61 % der Fahrten zu, ein vergleichsweise hoher Anteil, der nur durch die Strecke A24 Hamburg – Berlin (70 %) und der oben beschriebenen A61 Köln – Mannheim (62 %) übertroffen wird, die allerdings absolut ein niedrigeres Aufkommen aufweisen als die A1. Die niedrigsten Anteile haben hier wiederum die großen Transitstrecken A2 (Westeuropa – Osteuropa) und A3 (Benelux – Südosteuropa) aufzuweisen, weil hier der Vor- und Nachlauf größtenteils im Ausland stattfindet.

Bei Betrachtung des Schwerverkehrs, der nur höchstens 100 km sowohl im Vor- als auch im Nachlauf zur Auswahlstrecke zurückzulegen hat, eine Distanz also, die möglicherweise batteriebetrieben durchgeführt werden kann, ist ebenfalls bei der A1 das höchste Potenzial mit rund 1,1 Mio. Fzg-km pro DTVw anzutreffen. 28 % der Fahrten auf dieser Strecke haben sowohl im Vor- als auch im

Nachlauf zur Auswahlstrecke weniger als 100 km zurückzulegen. Es handelt sich hier um die wohl größten Verkehrsströme in Deutschland im Fernverkehr mit schweren Lkw, nämlich die Relation Hamburg – Rhein/Ruhr.

Anteilmäßig hat in diesem Kriterium die A24 Hamburg – Berlin den höchsten Wert: 42 % der Fahrten haben sowohl Vor- als auch Nachlaufängen nur bis 100 km zurückzulegen. Auf der A24 sind also zum einen Lkws unterwegs, die tatsächlich zwischen den beiden größten deutschen Städten pendeln. Daneben fällt der mit 35 % hohe Wert auf der A5 zwischen Karlsruhe und Basel auf, obwohl es sich dabei um vergleichsweise "kleine" Städte handelt. Hier spielt Basel als Umschlagspunkt eine wichtige Rolle, z.T. aufgrund der dort stattfindenden Verladung von Containern oder Lkw auf die Bahn einerseits infolge der Beschränkungen im Straßenverkehr der Schweiz und andererseits aufgrund der Attraktivität und der Kapazität des alpenquerenden Schienenverkehrs der Schweiz. Dagegen hat die Strecke Kassel – Würzburg den niedrigsten Anteil der Fahrleistung im Vor- und Nachlauf bis 100 km. Der Verkehr führt hier fast ausschließlich an den genannten Städten vorbei und legt damit noch weitere Strecken zurück (z. B. zwischen Hamburg und München).

Die in Tabelle 6-6 und Tabelle 6-7 gezeigten Kennwerte sind insofern noch nicht vollständig aussagefähig, weil die Strecken unterschiedlich lang sind. Eine höhere Verkehrsleistung, z. B. auf der A1 zwischen Hamburg und Dortmund und der A2 zwischen Hannover und Berlin, hat auch mit der relativ großen Länge gerade dieser Strecken zu tun. In Tabelle 6-8 sind deshalb die Verkehrsleistungskennziffern auf die Streckenkilometer bezogen. Nur dadurch kann ein "fairer Vergleich" der Strecken erfolgen. Gleichzeitig angegeben ist in der Tabelle der "Rang" der Strecke bezogen auf

- die gesamten Fahrzeugkilometer im Schwerverkehr ab 100 km pro km Streckenlänge,
- davon der Verkehr, der im Vor- und Nachlauf höchstens 250 km zurückzulegen hat,
- davon der Verkehr, der im Vor- und Nachlauf höchstens 100 km zurückzulegen hat.

**Tabelle 6-8: Rangreihung der Auswahlstrecken nach Verkehrspotenzial beim Gesamtverkehr (Schwerverkehr, der mind. 100 km auf der Auswahlstrecke unterwegs ist), davon beim Verkehr mit Vor- und Nachlauf bis 250 km und bis 100 km**

Auto- bahn- Nr.	von	nach	Fahrleistung in km pro km Streckenlänge					
			alle schweren Lkw > 100 km	Rang	davon Vor- und Nach- lauf bis 250 km	Rang	davon Vor- und Nach- lauf bis 100 km	Rang
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
A1	Hamburg	Dortmund	13.544	4	8.251	1	3.732	1
A2	Dortmund	Hannover	10.345	6	4.000	8	1.421	10
A2	Hannover	Berlin	15.658	1	4.952	4	1.229	12
A3	Frankfurt/M	Nürnberg	15.022	2	4.792	5	1.069	13
A3	Köln	Frankfurt/M	13.895	3	4.713	6	1.538	8
A3	Nürnberg	Passau	9.438	9	2.164	16	1.261	11
A4	Bad Hers- feld	Hermsdorf	6.233	14	2.839	13	611	16
A5	Karlsruhe	Basel	4.640	16	2.210	14	1.602	7
A6	Heidelberg	Nürnberg	10.314	7	3.549	11	1.471	9

Auto- bahn- Nr.	von	nach	Fahrleistung in km pro km Streckenlänge					
			alle schweren Lkw > 100 km	Rang	davon Vor- und Nach- lauf bis 250 km	Rang	davon Vor- und Nach- lauf bis 100 km	Rang
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
A7	Hamburg	Kassel	10.213	8	5.647	3	2.220	2
A7	Kassel	Würzburg	6.123	15	2.054	17	255	17
A8	Stuttgart	München	8.631	12	3.892	9	1.911	5
A9	Berlin	Hermsdorf	6.387	13	2.172	15	1.000	14
A9	Hermsdorf	Nürnberg	8.984	11	3.886	10	811	15
A9	Nürnberg	München	11.382	5	4.546	7	2.066	3
A24	Hamburg	Berlin	4.507	17	3.150	12	1.890	6
A61	Köln	Mannheim	9.149	10	5.655	2	2.011	4

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

Demnach ist die Strecke mit dem höchsten Verkehrsaufkommen pro Streckenkilometer im Verkehr mit schweren Lkw, die mindestens 100 km auf der Auswahlstrecke unterwegs sind, die A2 zwischen Hannover und Berlin (15,7 Tsd. Fahrzeuge pro Kilometer), gefolgt von der A3 zwischen Frankfurt am Main und Nürnberg (15 Tsd. Fahrzeuge) und der A3 zwischen Köln und Frankfurt/M. (14 Tsd.). Bei diesen Strecken handelt es sich, wie erläutert, um die wichtigsten Transitstrecken durch Deutschland, d. h. mit einem hohen Anteil solcher langlaufenden Verkehre, die im Vor- und Nachlauf zur Auswahlstrecke sehr weite Strecken zurücklegen und damit wenig geeignet für einen Oberleitungsbetrieb wären. Daher erreichen diese Strecken trotz des insgesamt hohen Verkehrsaufkommens bei dem Kriterium Verkehr mit Vor- und Nachlauf bis 250 km (möglicherweise geeignet für Dualbetrieb Strom/Range Extender) nicht die oberen Rangplätze. Die sind belegt, allen voran, von der A1 Hamburg – Dortmund aufgrund der insgesamt hohen Verkehrsbelastung (Rang 4), aber vor allem aufgrund des großen Anteils von Verkehren zwischen dem größten deutschen Ballungs- und Wirtschaftsraum Rhein-Ruhr und dem größten deutschen Hafen und Logistikstandort Hamburg. Sowohl beim Kennwert "Verkehr mit Vor- und Nachlauf bis 250 km" (8,3 Tsd. Fahrzeuge/Streckenkilometer) als auch "bis 100 km" (3,7 Tsd. Fahrzeuge/Streckenkilometer), ggf. geeignet für Batteriebetrieb ist diese Strecke mit Abstand am besten als erste Auswahlstrecke für Oberleitungsbetrieb geeignet. Es folgen dann die A7 Hamburg - Kassel (5,7 Tsd. bzw. 2,0 Tsd. Fahrzeuge/Streckenkilometer) und die oben schon besprochene A61 Köln – Mannheim (5,6 Tsd. bzw. 2,2 Tsd. Fahrzeuge/Streckenkilometer).

Aus verkehrlicher Sicht ist daher die A1 zwischen Hamburg und Rhein-Ruhr als erste längere Anwendungsstrecke für oberleitungsgebundene Lkw zu empfehlen, weil hier

- insgesamt ein großes Verkehrsaufkommen im schweren Lkw-Verkehr besteht,
- ein hoher Anteil des Verkehrs geringe Vor- und Nachlaufängen aufzuweisen hat bzw. ein Großteil des Verkehrs Punkt-Punkt-Verkehr darstellt.

Obwohl diese Strecke nicht ganz so wichtig für den Transitverkehr ist wie die A2 und die A3, stellt sie doch auch den Kern einer wichtigen deutschen und europäischen Verkehrsachse dar, so dass hier auch gute Erweiterungsmöglichkeiten Richtung Nordosten (Dänemark) und Richtung Südwesten vorhanden sind (z. B. Richtung Köln/Aachen). Daher würde sich diese Strecke aus verkehrlicher

Sicht als erste Anwendungsstrecke eines deutschen oder europäischen oberleitungsgebundenen Autobahnnetzes anbieten.

### 6.3. Übertragung auf den Gesamtverkehr (Netzbetrachtung)

#### 6.3.1. Bildung Kernnetz

Die Elektrifizierung aller 17 Auswahlstrecken würde bereits ein relativ dicht geknüpftes Netz mit den verkehrlich wichtigsten Autobahnstrecken und entsprechend guten verkehrlichen Wirkungen ergeben. Die Analyse der Abbildung mit den 17 Auswahlstrecken (siehe Abbildung 6-3) zeigt aber, dass sich der Netzcharakter durch einige Lückenschlüsse im Autobahnnetz deutlich verstärken ließe. Diese Lückenschlüsse umfassen die in Tabelle 6-9 beschriebenen Autobahnabschnitte und sind in Abbildung 6-5 hervorgehoben. Die aktuelle O-Lkw-Pilotstrecke auf der A5 (Projekt ELISA) befindet sich auf dem wichtigsten Ergänzungsabschnitt 5 (Bad Hersfeld – Karlsruhe). Das sich dadurch ergebende Kernnetz elektrifizierter Autobahnabschnitte in Deutschland umfasst eine Länge von insgesamt ca. 4.300 Streckenkilometern.

**Tabelle 6-9: Lückenschlüsse im BAB-Netz**

Lfd. Nr.	Auto- bahn Nr.	Abschnitt (grob)		Abschnitt (fein)		km
		von	nach	von	nach	
1	A1	Hamburg	Hamburg	AD Buchholz A1/A261	AK Hamburg Ost A1/A24	38
2	A1/A4	Dortmund	Köln	AK Kamen A1/A2	AK Kerpen A4/A61	119
3	A3	Leverkusen	Köln	AK Leverkusen A1/A3	AD Heumar A3/A4/A59	36
4	A5	Bad Hersfeld	Karlsruhe	AD Hattenbach A5/A7	AD Karlsruhe A5/A8	256
5	A8	Karlsruhe	Stuttgart	AD Karlsruhe A5/A8	AK Stuttgart A8/A81	60
6	A10	Berlin	Berlin	AD Havelland A10/A24	AD Werder A2/A10	47
7	A39	Wolfsburg	Salzgitter	AK Wolfsburg/Königslutter A2/A39	AD Salzgitter A7/A39	50
8	A60/ A67	Bingen	Rüsselsheim	AD Nahetal A60/A61	AD Mönchhof A3/A67	54
9	A99	München	München	AD M-Eschenried A8/A99	AK München Nord A9/A99	18

Quelle: Eigene Darstellung

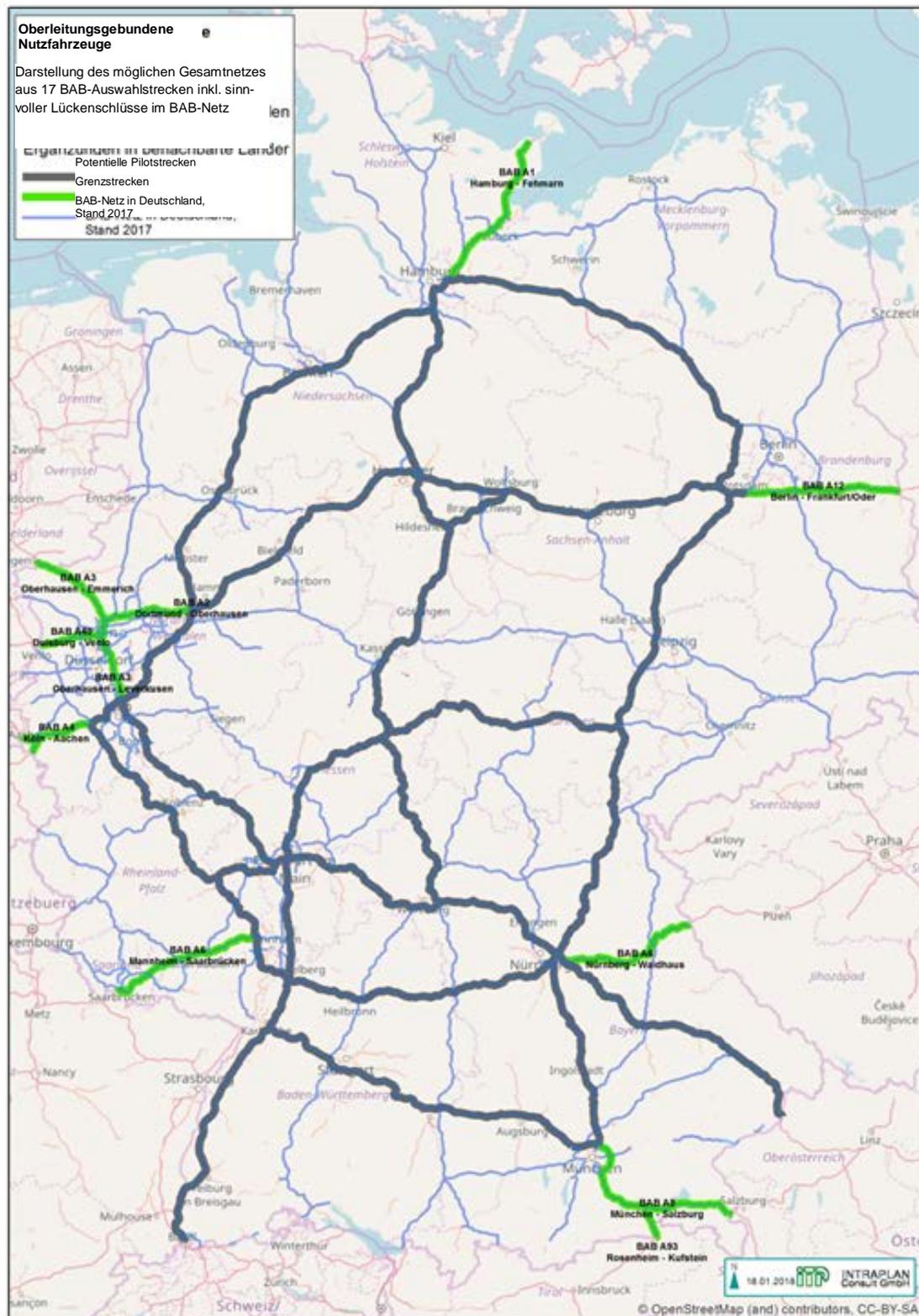
Aufbauend auf dem möglichen innerdeutschen Kernnetz aus Abbildung 6-5 sind in Abbildung 6-6 verkehrlich sinnvolle Ergänzungsstrecken ins benachbarte Ausland als nächsten möglichem Netzerweiterungsschritt nachrichtlich dargestellt. Im Rahmen des Forschungsprojektes StratON wurde diese Netz-erweiterung um grenzüberschreitende Autobahnstrecken jedoch nicht untersucht, da diese von der Bereitschaft der Nachbarländer abhängt, die entsprechende Oberleitungstechnologie einzuführen und die Autobahninfrastruktur bereitzustellen. Die O-Lkw-Teststrecke zwischen Hamburg und Lübeck (Projekt FESH) bildet eine der sinnvollen Anbindungsstrecken an das benachbarte Ausland. Die folgenden Betrachtungen und Ergebnisdarstellungen beziehen sich daher ausschließlich auf das in Abbildung 6-5 gezeigte mögliche innerdeutsche Kernnetz.

**Abbildung 6-5: Bildung Kernnetz aus 17 Auswahlstrecken inklusive sinnvoller Lückenschlüsse im BAB-Netz**



Quelle: ITP, eigene Darstellung

**Abbildung 6-6: Nachrichtlich: Bildung Kernnetz aus 17 Auswahlstrecken inklusive sinnvoller Lückenschlüsse im BAB-Netz mit möglichen Ergänzungen ins benachbarte Ausland**



Quelle: ITP, eigene Darstellung

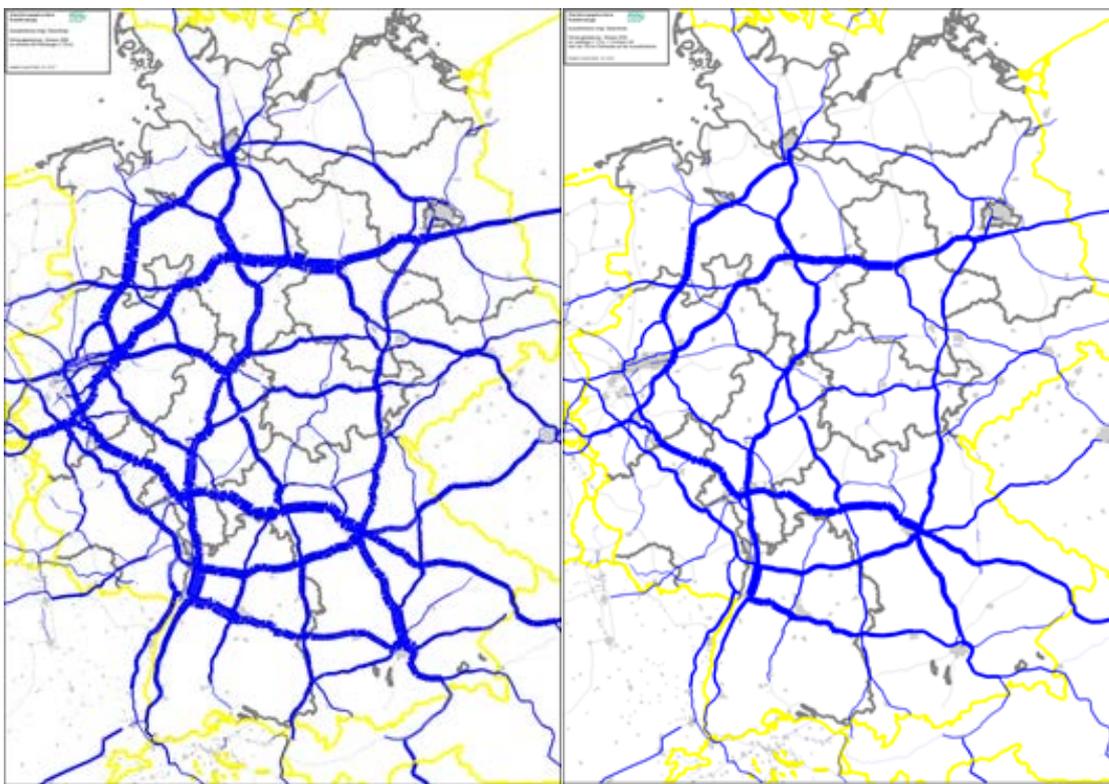
### 6.3.2. Ergebnisse mögliches Kernnetz

Die Verkehrsströme des möglichen innerdeutschen Kernnetzes elektrifizierter Autobahnen sind in Abbildung 6-7 dargestellt: die Abbildung links zeigt die Streckenbelastung (mit Vor- und Nachlauf) aller Lkw, die irgendeinen Abschnitt dieses Autobahn-Kernnetzes befahren, rechts ist die Belastung nur mit schweren Lkw ab 4 Achsen, die mehr als 100 km auf dem möglichen Kernnetz unterwegs sind, inklusive der Vor- und Nachläufe, abgebildet.

**Abbildung 6-7: Ergebnisse – Verkehre auf dem möglichen innerdeutschen Kernnetz – bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 t

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite  
auf dem möglichen Kernnetz



Quelle: ITP, eigene Berechnung und Darstellung

In beiden Abbildungen ist der Netzcharakter durch die Überlagerung von Verkehrsströmen verschiedener Richtungen gut erkennbar. Die Belastungsmaßstäbe sind in beiden Abbildungen identisch, in der linken Abbildung sind die Verkehrsströme wegen der Betrachtung des gesamten Lkw-Verkehrs >3,5 t und der fehlenden Filterung nach Entfernungen deutlich größer als in der rechten, die nur den Verkehr mit schweren Lkw (ab 4 Achsen) und einer Fahrtweite über 100 km auf der Auswahlstrecke umfasst. Die Vor- und Nachläufe auf Autobahnstrecken, die nicht zum möglichen Kernnetz gehören, sind deutlicher ersichtlich (z. B. auf der A19 Richtung Rostock oder der A96 zwischen München und Lindau). Ebenfalls in beiden Abbildungen ersichtlich sind die stärker belasteten Autobahnen, meist sind das die Autobahnen mit den einstelligen Nummern, z. B. die A1 zwischen Hamburg und dem Ruhrgebiet, die A2 zwischen dem Ruhrgebiet und Berlin, die A3 zwischen Köln und Regensburg, die A5 zwischen Kassel und Karlsruhe, die A6 vom Kreuz Walldorf bis Nürnberg, die A7 zwischen

Hamburg und Würzburg, die A8 zwischen Karlsruhe und München und die A9 zwischen Nürnberg und München. In der rechten Abbildung tritt der Bündelungseffekt bei den langlaufenden Verkehren auf die Autobahnabschnitte des möglichen Kernnetzes durch die schwächere Belastung der Vor- und Nachlaufstrecken auf dem übrigen Autobahnnetz stärker hervor. Ebenfalls deutlich ersichtlich ist die Ausstrahlung der Verkehrsströme, die das innerdeutsche Kernnetz befahren, bis ins benachbarte Ausland, z. B. über die A12 von Berlin Richtung Frankfurt a. d. Oder/polnische Grenze, die A6 Nürnberg - Waidhaus/tschechische Grenze oder die A4 Köln – Aachen und weiter Richtung niederländische und belgische Grenze. Dies belegt, dass die Ergänzung des innerdeutschen Kernnetzes um grenzüberschreitende Autobahnabschnitte zur Herstellung internationaler Verbindungen, wie in Abbildung 6-6 nachrichtlich skizziert, sinnvoll wäre.

In Tabelle 6-10 sind korrespondierend zur Abbildung 6-7, rechte Seite die Ergebnisse der Datenanalysen zusammengefasst. Dargestellt sind die Verkehrsleistungen, und zwar die Fahrten und Fahrzeugleistungen, kategorisiert nach Entfernungsstufen im Vor- und Nachlauf für schwere Lkw mit mind. 100 km Fahrtweite auf dem möglichen Kernnetz.

**Tabelle 6-10: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite im möglichen Kernnetz 2050 im DTV-w**

Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecken			Nachlauf	
Entfernungs- klasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungs- klasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	2.511.947	89.554	23.049.673	42,8 %	bis 100	2.468.570
bis 100	535.757	17.247	4.958.947	9,2 %	101 - 250	2.696.123
bis 100	223.179	6.762	2.198.149	4,1 %	251 - 500	2.298.770
bis 100	233.426	7.528	2.579.776	4,8 %	ab 501	5.367.500
101 - 250	3.204.367	19.816	5.736.677	10,7 %	bis 100	612.843
101 - 250	994.133	5.903	1.990.150	3,7 %	101 - 250	951.683
101 - 250	656.770	3.709	1.316.571	2,4 %	251 - 500	1.251.157
101 - 250	577.530	3.351	1.260.085	2,3 %	ab 501	2.457.063
251 - 500	2.966.820	8.850	2.699.306	5,0 %	bis 100	286.948
251 - 500	1.281.310	3.801	1.336.105	2,5 %	101 - 250	652.890
251 - 500	585.907	1.759	604.383	1,1 %	251 - 500	596.010
251 - 500	573.913	1.733	591.140	1,1 %	ab 501	1.394.833
ab 501	5.696.767	8.162	2.918.327	5,4 %	bis 100	277.192
ab 501	2.633.257	3.676	1.483.214	2,8 %	101 - 250	638.360
ab 501	1.479.230	1.971	669.305	1,2 %	251 - 500	647.517
ab 501	827.190	1.126	408.093	0,8 %	ab 501	793.930

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

Auf dem möglichen innerdeutschen Kernnetz würden demnach knapp 90.000 Lkw-Fahrten pro Tag stattfinden, bei denen die Entfernung sowohl im Vorlauf als auch im Nachlauf die 100 km-Grenze nicht überschreitet und die deshalb auf dem gesamten Laufweg vollständig elektrisch (Oberleitung mit Batterie) betrieben werden könnten (in der Tabelle dunkel hinterlegte Zeile). Dabei würden über 23 Millionen Lkw-Kilometer im DTV-w auf dem elektrifizierten BAB-Auswahlnetz zurückgelegt. Allein in dieser Kategorie würden damit ca. 43 % der gesamten Fahrleistung von 54 Millionen Lkw-Kilometern DTV-w der schweren Lkw mit mindestens 100 km Fahrtweite auf dem möglichen Kernnetz

erbracht. Im Vor- und Nachlauf kämen noch einmal 5 Millionen Lkw-Kilometer pro Tag dazu. In Summe über Haupt-, Vor- und Nachlauf ließen sich damit 28 Millionen Lkw-Kilometer pro Tag mit OBEV-Fahrzeugen durchführen, das entspricht einer Jahresfahrleistung von ca. 8,5 Milliarden Fzg-km.

Bei weiteren 43.000 Lkw-Fahrten beträgt die Entfernung im Vorlauf und im Nachlauf jeweils weniger als 250 km. Hier ist der Einsatz von Hybridfahrzeugen denkbar (in der Tabelle hell hinterlegte Zeilen). Diese legen zusammen 12,7 Millionen Lkw-Kilometer im DTV-w auf dem elektrifizierten BAB-Auswahlnetz zurück, das entspricht einem Anteil von 23,5 % der gesamten Fahrleistung auf dem möglichen Kernnetz. Die Jahresfahrleistung in diesem Segment beträgt 3,8 Milliarden Fzg-km. Hinzu kommen 13,8 Millionen Lkw-Kilometer pro Tag im Vor- und Nachlauf, die aufgrund der längeren Fahrtweiten nicht mehr rein elektrisch zurückgelegt werden können.

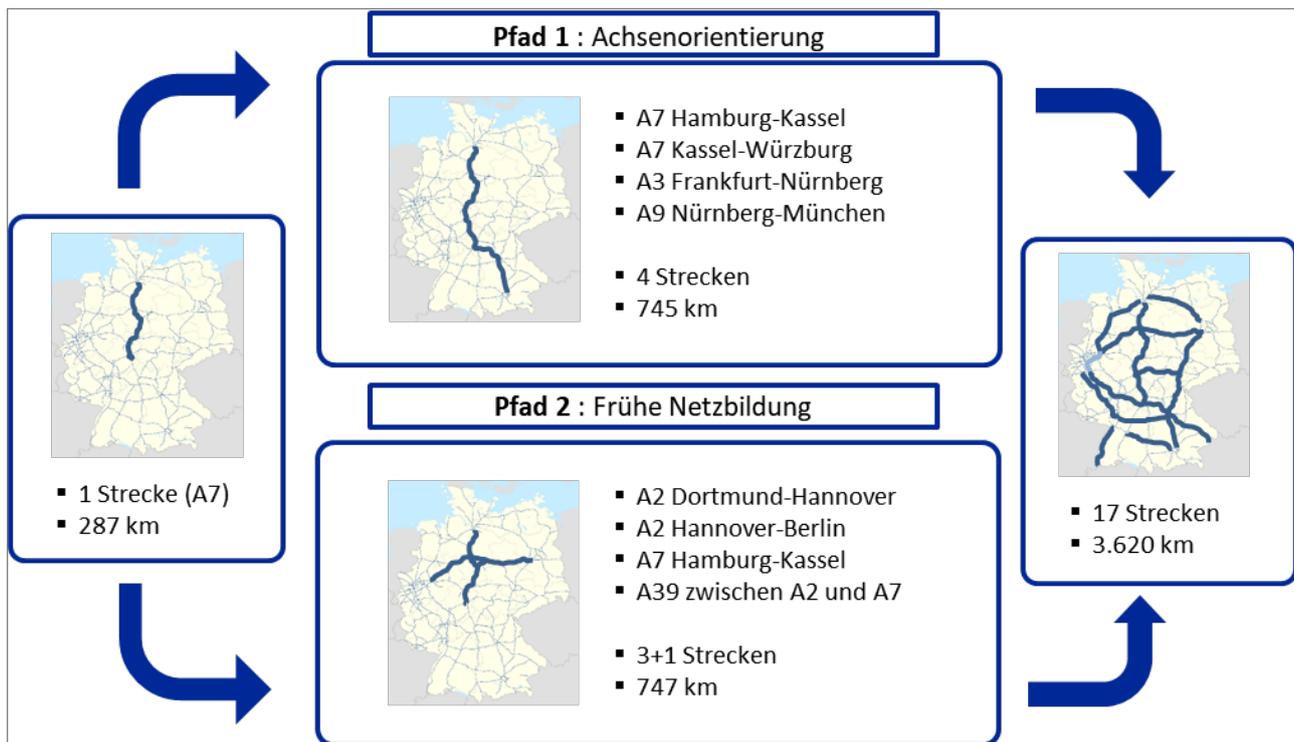
In Summe sind damit zwei Drittel der langlaufenden Verkehre mit schweren Lkw auf dem möglichen Kernnetz für O-Lkw geeignet, nämlich 35,7 von 54 Millionen Lkw-Kilometern pro Tag.

### **6.3.3. Netzentwicklungsstrategien – Achse versus Teilnetz**

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Auswahl und Ergebnisse verkehrlich sinnvoller Pilotstrecken sowie der Umfang und das Ergebnis eines möglichen innerdeutschen Kernnetzes aus Autobahnen mit Oberleitung beschrieben. In diesem Kapitel soll die Frage beantwortet werden, auf welchem geeigneten Weg ausgehend von einer ersten Pilotstrecke das mögliche Kernnetz entwickelt werden soll. Hierzu wurden zwei grundsätzliche Netzentwicklungsstrategien – ein achsenbezogener und ein teilnetzbezogener Ansatz – anhand von Beispielen auf ihre verkehrlichen Wirkungen untersucht.

Die folgende Abbildung 6-8 zeigt beide Netzentwicklungsstrategien im Überblick. Ausgehend von der Beispielstrecke 10, der A7 zwischen Hamburg und Kassel ist in Pfad 1 der achsenorientierte Ansatz dargestellt, die Verlängerung der A7 über Kassel hinaus bis Würzburg, weiter über die A3 bis Nürnberg und die A9 bis zum Endpunkt München und in Pfad 2 der Ansatz der frühen Netzbildung um Hannover durch Ergänzung um die Autobahnen A2 Dortmund – Hannover – Berlin sowie der A39 zwischen Wolfsburg und Salzgitter als Lückenschluss zwischen den Autobahnen A2 und A7. Die Gesamtlänge der mit Oberleitungen auszustattenden Autobahnabschnitte ist dabei in beiden Ansätzen annähernd identisch, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse und möglicher verkehrlicher Wirkungen erleichtert: 745 Kilometer im achsenorientierten Netzentwicklungsansatz, 747 Kilometer im teilnetzorientierten Ansatz. In Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10 sind die gewählten Autobahnstrecken für beide Netzentwicklungsstrategien detaillierter hervorgehoben.

Abbildung 6-8: Netzentwicklungsstrategie: Achsen versus Teilnetze



Quelle: Hochschule Heilbronn, eigene Darstellung

**Abbildung 6-9: Achsenbezogene Netzentwicklung am Beispiel A3-A7-A9 von Hamburg über Würzburg und Nürnberg bis München**



Quelle: ITP, eigene Darstellung

**Abbildung 6-10: Teilnetzbezogene Netzentwicklung am Beispiel Hannover – A7 von Hamburg bis Kassel, A2 von Dortmund bis Berlin und A39 zwischen A7 und A2**



Quelle: ITP, eigene Darstellung

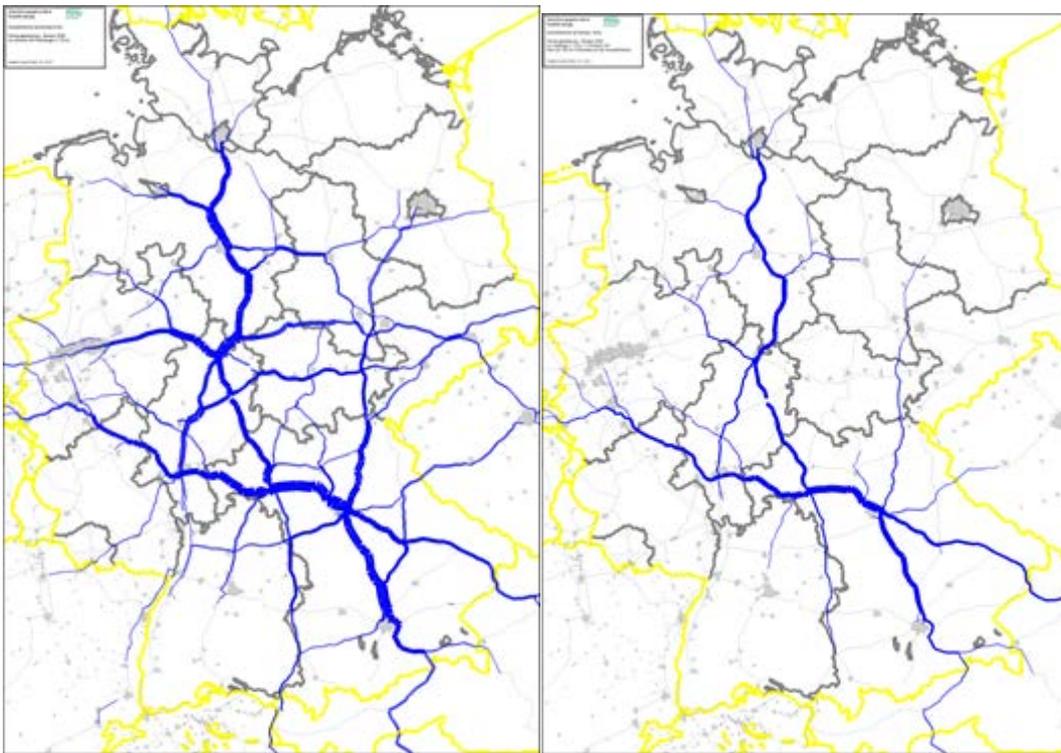
### 6.3.4. Ergebnisse der achsenorientierten Netzentwicklung

In Abbildung 6-11 links ist die Streckenbelastung (mit Vor- und Nachlauf) aller Lkw, die irgendeinen Abschnitt der Achse Hamburg – München befahren, dargestellt, rechts ist die Belastung nur mit schweren Lkw ab 4 Achsen, die mehr als 100 km auf der Autobahnachse zwischen Hamburg und München unterwegs sind, inklusive der Vor- und Nachläufe, abgebildet.

**Abbildung 6-11: Ergebnisse – Verkehre im achsenorientierten Ansatz am Beispiel A7-A3-A9 Hamburg – Würzburg – Nürnberg - München – bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 t

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlachse



Quelle: ITP, eigene Berechnung und Darstellung

In beiden Abbildungen ist gut zu erkennen, dass über die Autobahnachse Hamburg – München wie erwartet Verkehrsströme in Nord-Süd-Richtung und umgekehrt laufen, dass aber auch Verkehrsströme zwischen West und Ost (und umgekehrt) über Teilabschnitte der Achse abgewickelt werden. Aus der linken Abbildung ist ersichtlich, dass die West-Ost-Verkehre zwischen Ruhrgebiet und Halle/Leipzig (und darüber hinaus) den Achsenabschnitt auf der A7 zwischen Kassel und Göttingen (Dreieck Drammetal) benutzen und die Verkehre, die sich zwischen Nordrhein-Westfalen und Oberösterreich bündeln, den Achsenabschnitt auf der A3 zwischen Würzburg und Nürnberg befahren. Auch in der rechten Abbildung sind letztgenannte Verkehre noch deutlich zu erkennen, der A3-Abschnitt zwischen Würzburg und Nürnberg ist hier sogar der am stärksten belastete Abschnitt auf der gesamten Achse zwischen Hamburg und München. Ursache ist die Überlagerung der Nord-Süd- und West-Ost-laufenden Verkehre in diesem Abschnitt. Da die in der linken Abbildung ersichtlichen West-Ost-Verkehre zwischen Ruhrgebiet und Halle/Leipzig nur den kurzen Abschnitt der A7 zwischen Kassel und Dreieck Drammetal mit 37 km Länge befahren, erfüllen sie nicht das der rechten

Abbildung zugrundeliegende Auswahlkriterium „Fahrtweite mehr als 100 km auf der Auswahlachse“. Tabelle 6-11 zeigt die zur rechten Abbildung korrespondierenden Ergebnisse.

**Tabelle 6-11: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite im achsenorientierten Ansatz zur Netzentwicklung 2050 im DTV-w**

Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungs- klasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungs- klasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	316.336	9.217	1.874.929	21,6 %	bis 100	298.573
bis 100	187.465	5.276	1.182.101	13,6 %	101 - 250	845.507
bis 100	85.138	2.292	475.566	5,5 %	251 - 500	779.843
bis 100	35.556	943	213.355	2,5 %	ab 501	657.600
101 - 250	868.857	5.345	1.169.994	13,5 %	bis 100	175.056
101 - 250	460.123	2.782	545.610	6,3 %	101 - 250	452.677
101 - 250	364.240	2.136	363.914	4,2 %	251 - 500	759.110
101 - 250	191.648	1.159	189.082	2,2 %	ab 501	845.173
251 - 500	1.004.460	2.958	615.391	7,1 %	bis 100	100.181
251 - 500	756.940	2.141	365.756	4,2 %	101 - 250	356.707
251 - 500	853.450	2.352	372.177	4,3 %	251 - 500	865.923
251 - 500	736.500	2.009	305.062	3,5 %	ab 501	1.529.227
ab 501	849.620	1.252	262.701	3,0 %	bis 100	51.741
ab 501	948.233	1.368	231.746	2,7 %	101 - 250	222.351
ab 501	1.625.403	2.195	308.386	3,5 %	251 - 500	827.097
ab 501	1.134.877	1.579	215.679	2,5 %	ab 501	1.038.567

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

Auf der Autobahnachse Hamburg – München würden täglich in Summe 45.000 Fahrten mit Lkw ab vier Achsen und mindestens 100 km Fahrtweite auf der Autobahnachse stattfinden, die zusammen 8,7 Millionen Kilometer im DTV-w auf der Autobahnachse zurücklegen. 9.200 Lkw-Fahrten davon haben eine Vor- und Nachlaufentfernung zu den Autobahnabschnitten auf der Achse von weniger als 100 km (siehe dunkle Markierung), sind daher für den vollständigen elektrischen Betrieb geeignet und legen 1,9 Millionen Kilometer auf den Abschnitten der Autobahnachse zurück, das entspricht einem Anteil von 22 % an der gesamten Verkehrsleistung wie oben genannt. Weitere 13.400 Lkw-Fahrten, die 2,9 Millionen Kilometer auf der Achse zurücklegen, haben eine Vor- und Nachlaufentfernung von weniger als 250 km (helle Markierung), wären damit wohl am besten für Hybrid-Fahrzeuge geeignet, dies sind 33 % der Fahrleistung auf der Autobahnachse.

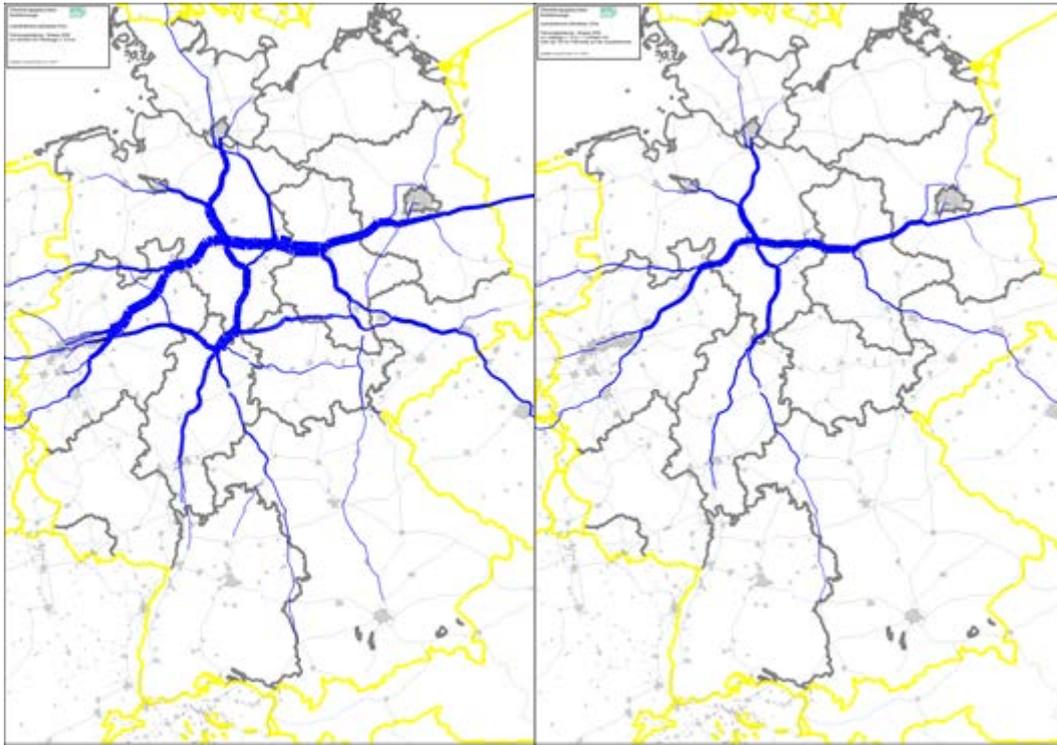
### 6.3.5. Ergebnisse der teilnetzorientierten Netzentwicklung

Die Verkehre mit Lkw größer 3,5 Tonnen, die irgendeinen Abschnitt des Autobahnteilnetzes bestehend aus der A2 Dortmund-Berlin, der A7 Hamburg-Kassel und der A39 Wolfburg-Salzgitter, befahren sind in Abbildung 6-12 links dargestellt. Die Abbildung rechts zeigt die Belastung mit Lkw ab vier Achsen, die einen mindestens 100 km langen Abschnitt des Teilnetzes Hannover befahren. In beiden Fällen sind die Vor- und Nachläufe auf Autobahnabschnitten außerhalb des Teilnetzes Hannover mit abgebildet.

**Abbildung 6-12: Ergebnisse – Verkehre im teilnetzorientierten Ansatz am Beispiel Hannover: A7 Hamburg – Kassel, A2 Dortmund – Berlin und A39 Wolfsburg – Salzgitter – bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 t

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf dem Teilnetz



Quelle: ITP, eigene Berechnung und Darstellung

In Abbildung links ist die Überlagerung von Verkehren zwischen Nord und Süd (Hamburg/Bremen Richtung Hessen und weiter nach Süden) sowie zwischen West und Ost (Niederlande/Belgien/Nordrhein-Westfalen Richtung Berlin/Polen/Tschechien) auf dem Teilnetz Hannover deutlich erkennbar, bei den West-Ost-Verkehren ist eine zweite südliche Achse zwischen Ruhrgebiet – Kassel – Göttingen nach Halle/Leipzig mit schwächerer Belastung erkennbar, die den Abschnitt Kassel – Dreieck Drammetal des Teilnetzes befahren. In Abbildung rechts entfallen diese Verkehre aufgrund der geringen Länge des Autobahnabschnitts mit 37 Kilometern Länge. Ersichtlich bleibt die Überlagerung der Verkehre Nord-Süd und West-Ost um Hannover. Die verkehrlichen Kennwerte zur teilnetzorientierten Netzentwicklung sind in Tabelle 6-12 dokumentiert.

**Tabelle 6-12: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite im teilnetzorientierten Netzentwicklungsansatz 2050 im DTV-w**

Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstreck			Nachlauf	
Entfernungs- klasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungs- klasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	401.030	11.580	2.406.494	25,1 %	bis 100	412.647
bis 100	170.136	4.684	1.036.428	10,8 %	101 - 250	777.183
bis 100	92.024	2.508	563.893	5,9 %	251 - 500	870.953
bis 100	80.714	1.846	478.290	5,0 %	ab 501	1.322.283
101 – 250	754.537	4.448	1.019.896	10,7 %	bis 100	162.262
101 – 250	366.297	2.077	561.423	5,9 %	101 - 250	351.497
101 – 250	201.966	1.163	303.457	3,2 %	251 - 500	400.377
101 – 250	197.470	1.184	348.961	3,6 %	ab 501	878.470
251 – 500	927.597	2.702	619.147	6,5 %	bis 100	98.114
251 – 500	489.793	1.393	364.785	3,8 %	101 - 250	245.940
251 – 500	317.880	915	242.089	2,5 %	251 - 500	303.111
251 – 500	178.939	568	159.639	1,7 %	ab 501	434.073
ab 501	1.804.330	2.352	698.332	7,3 %	bis 100	111.295
ab 501	930.400	1.248	357.893	3,7 %	101 - 250	215.217
ab 501	699.850	971	285.999	3,0 %	251 - 500	296.999
ab 501	217.736	325	122.141	1,3 %	ab 501	227.792

Quelle ITP, eigene Berechnungen

In Summe über alle Entfernungsklassen würden täglich ca. 40.000 Fahrten mit Lkw ab vier Achsen und einer Mindestfahrweite von 100 km auf den Autobahnabschnitten des Teilnetzes Hannover stattfinden. Zusammen würden sie dabei 9,6 Millionen Kilometer im DTV-w auf dem Teilnetz zurücklegen. 11.600 Lkw-Fahrten davon haben eine Vor- und Nachlaufentfernung zu den Autobahnabschnitten des Teilnetzes von weniger als 100 km (siehe dunkle Markierung), sind daher für den vollständigen elektrischen Betrieb geeignet und legen dabei 2,4 Millionen Kilometer auf den Abschnitten des Teilnetzes zurück, das entspricht einem Anteil von 25 % an der oben genannten gesamten Verkehrsleistung. Weitere 11.200 Lkw-Fahrten, die 2,6 Millionen Kilometer auf dem Teilnetz zurücklegen, haben eine Vor- und Nachlaufentfernung von weniger als 250 km (helle Markierung) und wären damit für Hybrid-Fahrzeuge geeignet. Dies sind 27 % der gesamten Fahrleistung auf dem Teilnetz.

### 6.3.6. Vergleich der Ergebnisse der achsenorientierten und der teilnetzorientierten Netzentwicklung

Ein Vergleich wichtiger verkehrlicher Eckwerte aus den beiden Netzentwicklungsstrategien ist in Tabelle 6-13 dargestellt.

**Tabelle 6-13: Vergleich der Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite im achsenorientierten und im teilnetzorientierten Netzentwicklungsansatz 2050 im DTV-w**

Netzentwicklungsstrategie	Entfernung im Vorlauf und im Nachlauf bis 100 km			Entfernung im Vorlauf und im Nachlauf bis 250 km		
	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d] <sup>1)</sup>	Bemerkung	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d] <sup>1)</sup>	Bemerkung
achsen-orientiert	9.217	1.874.929	OBEV-geeignet	22.620	4.772.634	OH-geeignet
teilnetz-orientiert	11.580	2.406.494	OBEV-geeignet	22.788	5.024.241	OH-geeignet

1) Lkw-Km im Hauptlauf auf den BAB-Auswahlstrecken

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

Die wichtigsten verkehrlichen Eckwerte aus den Ergebnissen beider Netzentwicklungsstrategien liegen relativ nahe beieinander, insbesondere wenn man die Vorlauf- und Nachlaufentfernung bis 250 km betrachtet, also die für Hybrid-Fahrzeuge geeigneten Entfernungsklassen im Vor- und Nachlauf. Bei Vor- und Nachlaufentfernungen bis 100 km weist jedoch die teilnetzorientierte Netzentwicklungsstrategie bessere Werte auf. Dies spricht dafür, bei einer zukünftigen Netzentwicklung einen eher teilnetzorientierten Ansatz zu verfolgen, auch vor dem Hintergrund, dass Akteure, die im Zentrum des Teilnetzes ihre Niederlassungen haben (in diesem Fall wäre das die Region Hannover), ggf. eher bereit sind sich O-Lkw anzuschaffen, wenn sie diese auf Autobahnen in alle Himmelsrichtungen einsetzen können.

## 6.4. Fazit

Die Ergebnisse der verkehrlichen Analysen zeigen, dass bereits bei Elektrifizierung von Einzelstrecken, sofern sie über eine sinnvolle Länge von ca. 200 km erfolgen, beträchtliche Potenziale für den oberleitungsgebundenen Lkw-Verkehr zu erschließbar sind. Insbesondere die A1 zwischen Hamburg und dem Ruhrgebiet empfiehlt sich aufgrund ihres Verkehrspotenzials als erste längere Anwendungsstrecke. Durch Ergänzung um weitere benachbarte Strecken ließen sich die elektrifizierten Autobahnabschnitte entweder achsenbezogen oder über regionale Teilnetze weiterentwickeln hin zu einem innerdeutschen Kernnetz als Zielzustand, das ca. 4.300 Autobahn-Kilometer mit Oberleitungsinfrastruktur umfassen würde (abzüglich eines möglichen Lückenanteils).

Weitere Verkehrspotenziale für den oberleitungsgebundenen Lkw-Verkehr ergeben sich durch mögliche Verbindungen ins benachbarte Ausland und durch Regionalverkehre, die die Oberleitungsinfrastruktur auf den Autobahnen zum Aufladen der Batterien nutzen könnten.

## 7. Geschäftsmodelle für Infrastruktur und Fahrzeuge

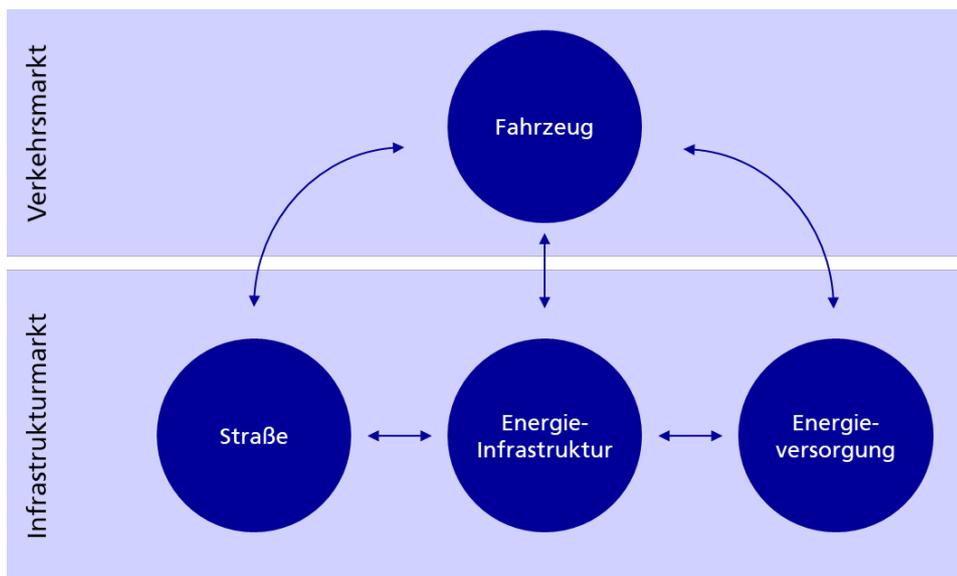
### 7.1. Betrachtungsperspektiven und Beurteilungskriterien

Neben der Identifikation geeigneter Pilotstrecken und der Entwicklung eines Kernnetzes war es eine Aufgabe des Vorhabens, auch die wirtschaftlichen Herausforderungen für die Technologieeinführung zu beleuchten. Insbesondere sollen geeignete Finanzierungs- und Geschäftsmodelle für den Aufbau und den Betrieb der notwendigen Komponenten des Systems O-Lkw untersucht, und unter

spezifischen Aspekten bewertet werden. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden im Folgenden vorgestellt.

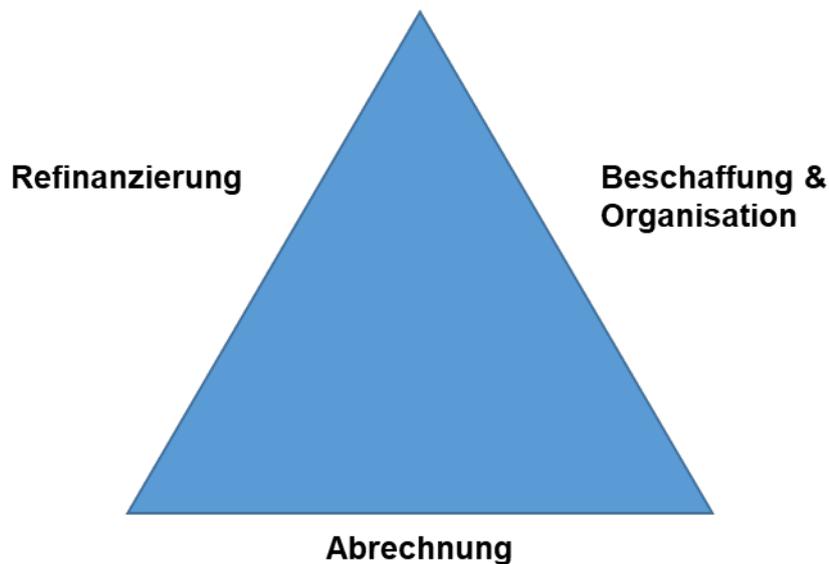
Das System „Oberleitungs-Lkw“ besteht aus zwei wesentlichen Komponenten: dem Fahrzeug, d. h. einer Zugmaschine, die über einen Elektromotor und einen Stromabnehmer verfügt, und der Infrastruktur, d. h. einer elektrischen Anlage, über die das Fahrzeug während der Fahrt mit Strom versorgt wird. Im weiteren Sinne zählen außerdem die Straße, i.d.R. eine Autobahn, sowie das Stromnetz zum System „Oberleitungs-Lkw“. Es kann somit zwischen dem Verkehrsmarkt (Fahrzeug) und dem Infrastrukturmarkt bzw. Energiemarkt (Elektrische Anlagen, Energieversorgung, Straße) unterschieden werden.

**Abbildung 7-1: Das System Oberleitungs-Lkw**



Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Infrastrukturbereitstellung muss zwischen dem *Beschaffungs- und Organisationsmodell* der *Refinanzierung* und dem *Abrechnungsmodell* unterschieden werden. Beschaffungsart und die Organisation des Betriebs beziehen sich auf verschiedene Varianten der Eigentümerschaft und den damit einhergehenden Rollenverteilungen auf dem Infrastrukturmarkt. Die Frage der Refinanzierung fokussiert die Frage, wer schlussendlich die Kosten für den Aufbau und den Betrieb der Infrastruktur trägt, unabhängig davon, wie der Aufbau vorfinanziert und der Betrieb organisiert wird. Die Frage der Abrechnungsmodelle zwischen den beteiligten Akteuren wiederum stellt das Bindeglied zwischen Infrastruktur- und Verkehrsmarkt dar (vgl. Abbildung 7-2).

**Abbildung 7-2: Betrachtungsperspektiven potenzieller Geschäftsmodelle**

Quelle: Eigene Darstellung

Um diese drei Betrachtungsperspektiven umfassend beurteilen zu können, bieten sich fünf Beurteilungskriterien an:

- Nutzerakzeptanz, d. h. die bedarfsgerechte Ausgestaltung des Systems für Nutzer (z. B. Einfachheit des Zugangs für Frachtführer) und Nicht-Nutzer (z. B. umfassender Aufprallschutz an Fahrleitungsanlagen).
- Resilienz, d. h. der Widerstandsfähigkeit des Systems bei Störungen (z. B. Netzausfällen) oder unbefugten Eingriffen (z. B. Manipulation der Fahrleitung),
- internationale Anschlussfähigkeit, d. h. die – zumindest europäische – uneingeschränkte Interoperabilität des Systems (z. B. Spannungsebene, Polarität, Fahrdrahtabstand),
- rechtliche und regulatorische Umsetzung der Markteinführung, insbesondere die Berücksichtigung der Energiemarktregulierung (diskriminierungsfreier Netzzugang, Grundversorgung usw.),
- Transaktionskosten, d. h. die mit den verschiedenen Organisations- und Abrechnungsmodellen einhergehenden Verwaltungs- und Betriebskosten.

Sowohl die drei Betrachtungsperspektiven als auch die fünf Beurteilungskriterien werden in den jeweils relevanten Kapiteln aufgegriffen und näher betrachtet.

## 7.2. Geschäftsmodelle für die Fahrzeugbereitstellung

### 7.2.1. Varianten der Fahrzeugbereitstellung

Die klassische Form Fahrzeugbereitstellung im Straßengüterverkehr ist der Fahrzeugkauf. Dabei geht das Fahrzeug (Lkw) in das Eigentum des Nutzers (bspw. Frachtführer) über. Dieser übernimmt alle Betriebskosten und ist auch für die Versicherung und Wartung des Fahrzeugs verantwortlich. Der mit dem Kauf verbundene Mehraufwand und der höhere Kapitalbedarf im Vergleich zu Miet- und

Leasingangeboten werden üblicherweise durch geringere Gesamtnutzungskosten gerechtfertigt (Lanzinger 2018).

Unter Fahrzeugleasing wird die Überlassung eines Lkw durch einen Leasinggeber (Leasinggesellschaft) zur Nutzung an einen Leasingnehmer (Frachtführer) verstanden. Hierfür wird eine zuvor vereinbarte Gegenleistung (Leasingrate) fällig. Als Leasinggeber treten entweder die Hersteller selbst (direktes Leasing) oder eine zwischengeschaltete Leasinggesellschaft (indirektes Leasing) auf, die für den Leasingnehmer die Finanzierung des gewünschten Fahrzeugs übernehmen (vgl. Gabler Wirtschaftslexikon 2018). Im Straßengüterverkehr kann zwischen „dry leasing“ und „wet leasing“ unterschieden werden. Beim „dry leasing“ werden nur Beschaffung und Zulassung vom Leasinggeber übernommen; nach Ablauf der Leasingdauer geht das Fahrzeug zurück an den Leasinggeber. Zunehmend wird auch Full-Service-Leasing („wet leasing“) angeboten, wobei der Leasinggeber die Verantwortung für gewisse Instandhaltungsfragen sowie ggf. für Zusatzleistungen wie etwa Reifenersatz, Versicherungs- und Steuerabwicklung, sowie die Tank- und Mautabrechnung über Flottenkarten übernimmt (vgl. Mercedes-Benz CharterWay 2018).

Mietmodelle lassen sich insbesondere durch die schnelle, unkomplizierte Anmietung sowie durch kürzere Vertragslaufzeiten (i.d.R. zwischen 1 Tag und 1 Jahr) vom Leasing abgrenzen. Zudem hat der Mieter andere Verpflichtungen als ein Leasingnehmer. Es können bei der Miete auch meist weder spezielle Eigenschaften der Mietsache (z. B. die Farbe) noch der Hersteller des Mietobjekts (z. B. der Preis) beeinflusst werden. Mietmodelle finden vor allem bei kurzfristigem Fahrzeugersatz und zum Ausgleich von Kapazitätsengpässen Anwendung.

Ausgewählte Mietfirmen bieten die Vermietung von Zugmaschine und Auflieger inklusive Fahrer an. Dies gibt Frachtführern und Spediteuren im Selbsteintritt die Möglichkeit, neben Fahrzeugausfällen auch kurzfristige Personalengpässe auszugleichen (vgl. Mercedes-Benz CharterWay 2018). Im Unterschied zur Situation bei Beauftragung eines ausführenden Frachtführers wird das Fahrzeug aber unverändert rechtlich dem Fuhrpark des Mieters zugeordnet. Vergleichbare Modelle, die insbesondere auf Sattelzugmaschinen übertragbar sind, werden im Schienenverkehr praktiziert. Unter sogenannten Traktionsdienstleistern werden Anbieter verstanden, die mit eigenen Triebfahrzeugen den Transport von Wagen, Wagengruppen oder Ganzzügen Dritter übernehmen (vgl. Hoffmann 2007).

Aus dem Pkw-Markt sind „mobility as a service“-Modelle (MaaS) bekannt. So wird etwa bei den Carsharing-Anbietern »car2go« und »DriveNow« nach Nutzungsdauer abgerechnet – die Anzahl gefahrener Kilometer und der Kraftstoffverbrauch spielen keine Rolle, Versicherung und Wartung sind im Preis inkludiert. Einen Schritt weiter gehen sogenannte „Ride Hailing“-Dienste wie bspw. »Uber« oder »Lyft«. Der Nutzer ist nur dafür verantwortlich, anzugeben, wann er von wo nach wo befördert werden möchte. Mit »Instafreight« und »Uber Freight« existieren bereits Angebote, die dieses Konzept auf den Frachtmarkt übertragen.

### **7.2.2. Fahrzeugbereitstellungs-Optionen für den Oberleitungs-Lkw**

Aus der Betrachtung etablierter Modelle der Fahrzeugbereitstellung lassen sich für den O-Lkw eine Vielzahl potenziell geeigneter Optionen ableiten (Tabelle 7-1). In Abbildung 7-3 ist die Verteilung der Verantwortlichkeiten bei den unterschiedlichen Modellen dargestellt.

**Tabelle 7-1: Denkbare Fahrzeugbereitstellungsoptionen für den O-Lkw**

Modell	Erläuterung
Fahrzeugkauf	Fahrzeug geht in das Eigentum des Nutzers über; dieser trägt Versicherung sowie Wartung/Instandhaltung und stellt den Fahrer
Dry-Leasing	Eigentum des Fahrzeugs verbleibt beim Leasinggeber; Nutzer trägt Versicherung sowie Wartung/Instandhaltung und stellt den Fahrer
Wet-Leasing	Wie Dry-Leasing, jedoch übernimmt der Leasinggeber auch Wartung/Instandhaltung und Versicherung
VMI-Miete	kurzfristige Miete, die Fahrzeug (vehicle), Wartung/Instandhaltung (maintenance) und Versicherung (insurance) beinhaltet
VDMI-Miete	kurzfristige Miete, die Fahrzeug (vehicle), Fahrer (driver), Wartung/Instandhaltung (maintenance) und Versicherung (insurance) beinhaltet
Trucksharing	Ähnlich wie VMI-Miete, jedoch sind auch die Kosten für Kraftstoff bzw. Strom im Mietpreis enthalten (pay per use)
Ausführender Frachtführer	In Anlehnung an „MaaS“ bzw. Traktionsdienstleister; die komplette Verantwortung von Bereitstellung des Fahrzeugs bis Organisation des Transports geht vom beauftragenden Spediteur (Nutzer) auf den ausführenden Frachtführer über
Ausführender Frachtführer mit Betreibermonopol	für den Transport mittels O-Lkw muss ein „ausführender Frachtführer“ (Monopolist) beauftragt werden

Quelle: Eigene Darstellung

**Abbildung 7-3: Optionen der Fahrzeugbereitstellung: Überblick**

In Verantwortung von: <input checked="" type="checkbox"/> Nutzer <input type="checkbox"/> Dritte	Kauf	Leasing [Fahrzeug nach Wunsch]		Miete [wenig Einfluss auf Fahrzeug]			ausführender Frachtführer	ausführender Frachtführer (Betreibermonopol)
		Dry	Wet	VMI*	VDMI*	Truck-Sharing (PPU*)		
Fahrzeug	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wartung und Versicherung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Personal (Fahrer)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kraftstoff/ »Strom«	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Transport der Fracht	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

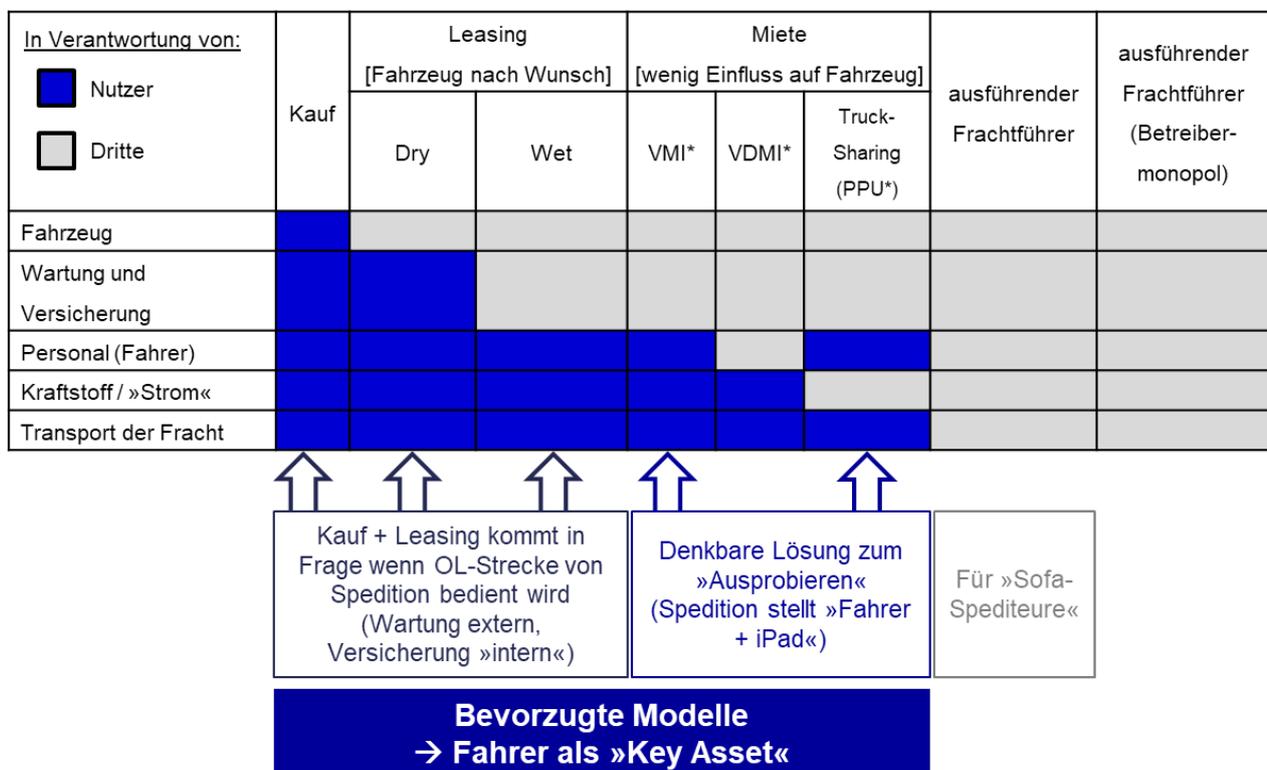
\* VMI = vehicle, maintenance, insurance / VDMI = vehicle, driver, maintenance, insurance / PPU = pay per use

Quelle: Eigene Darstellung

Im Rahmen eines Fachworkshops im Mai 2018 wurde u.a. eine erste Einschätzung der oben dargestellten Modelle der Fahrzeugbereitstellung aus Nutzersicht vorgenommen. Hieran waren Vertreter von Speditionen wie auch Verlader beteiligt. Insbesondere für die anwesenden Spediteure kamen Modelle, bei denen der Fahrer des Fahrzeugs durch Dritte gestellt wird, nicht in Frage. Der Fahrer gilt als „Key Asset“ und entscheidendes Differenzierungsmerkmal im Wettbewerb. Hingegen kann die Beauftragung eines ausführenden Frachtführers für Logistikunternehmen ohne eigene Fahrzeuge und Fahrer durchaus interessant sein, zumindest solange damit keine Monopolisierung verbunden ist.

Mietmodelle erscheinen interessant, um erste Erfahrungen mit einem O-Lkw zu sammeln und die Technologie in der Praxis auszuprobieren. Bei Leasing-Modellen wird tendenziell das Dry-Leasing bevorzugt, wenngleich aufgrund fehlender Kompetenzen in der Wartung von (hybrid-)elektrischen Fahrzeugen diese ggf. nicht in der eigenen Werkstatt, sondern durch Dritte durchgeführt werden soll.

**Abbildung 7-4: Optionen der Fahrzeugbereitstellung: Praxisbeurteilung**



Quelle: Eigene Darstellung

Von besonderer Bedeutung für das Fahrzeug-Geschäftsmodell ist der Zweitmarkt. Während heute ein Großteil gebrauchter Diesel-Lkw nach Afrika und Süd-/Osteuropa abgesetzt werden kann (Heerwagen 2015), können O-Lkw nur dort sinnvoll eingesetzt werden, wo auch eine Oberleitungsinfrastruktur vorhanden ist. Fehlt diese Infrastruktur in potenziellen Zweitmärkten, so kommen nur noch eine Verlängerung der Nutzungsdauer oder ein Rückbau zu einem konventionellen Lkw in Frage. Die mit Letzterem verbundenen Kosten wirken sich allerdings negativ auf den Restwert des Fahrzeugs und damit die Wirtschaftlichkeit des Geschäftsmodells insgesamt aus.

## 7.3. Geschäftsmodelle für die Infrastrukturbereitstellung

### 7.3.1. Kosten für Oberleitungsbau im Vergleich

Um ein Gefühl für die Größenordnung des Finanzierungsbedarfs zu bekommen, bietet es sich an, die geschätzten Investitionsausgaben (CAPEX) für den Aufbau der Oberleitung (Kühnel et al. 2018) anderen Infrastrukturkosten bzw. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten gegenüberzustellen (vgl. Abbildung 7-5). Hierbei ist zu beachten, dass bei den Kosten für die Oberleitung die möglichen Kosten für einen ggf. nötigen Ausbau bzw. den Anschluss an das Stromnetz sowie zu erwartende Instandhaltungskosten nicht berücksichtigt sind.

Abbildung 7-5: Infrastrukturkosten im Vergleich<sup>9</sup>



Quelle: Eigene Darstellung

Es zeigt sich, dass die Gesamtkosten für den Aufbau eines Oberleitungs-Kernnetzes von rund 4.000 km in Deutschland in etwa dem Investitionsvolumen entsprechen, das jährlich für die Verkehrswege des Bundes oder für den Ausbau der erneuerbaren Energien anfällt. Auch im Vergleich mit den erforderlichen Lade- bzw. Tankstelleninfrastrukturen für eine umfassende Dekarbonisierung des Pkw-Sektors schneidet die Oberleitung mit 20 bis 25 % der Kosten verhältnismäßig günstig ab.

### 7.3.2. Refinanzierung der Infrastruktur

Bei der Frage nach der Finanzierung von Infrastrukturen kann grundsätzlich zwischen der (einmaligen) Finanzierung des Aufbaus (CAPEX – capital expenditures) und der (kontinuierlichen) Finanzierung des Betriebs (OPEX – operating expenditures) unterschieden werden. Je nach Ausgestaltung des Finanzierungsmodells können die beiden Phasen mehr oder weniger eng miteinander verknüpft sein. Grundsätzlich sind vier Refinanzierungs-Modelle denkbar:

<sup>9</sup> Vgl. BMF (2018); BMWi (2016); FAZ (2017); Heuzeroth (2016); Kartschall (2016); Robinius et al. (2017)

1. **Refinanzierung durch Staat aus Steuermitteln:** Die Oberleitungs-Infrastruktur wird aus allgemeinen Haushaltsmitteln des Bundes finanziert; analog zu Bau und Erhaltung der Bundesfernstraßen vor Einführung der entfernungsabhängigen Lkw-Maut im Jahr 2005.
2. **Refinanzierung allein durch Nutzer über Entgelt für Infrastrukturnutzung:** Die Oberleitungs-Infrastruktur wird allein durch diejenigen finanziert, die sie nutzen (O-Lkw); analog zu Netzentgelten im Bahnstromnetz.
3. **Refinanzierung durch Nutzer und Nichtnutzer gleichermaßen:** Die Oberleitungs-Infrastruktur wird durch alle (mautpflichtigen) Nutzer der Autobahn finanziert.
4. **Refinanzierung allein durch Nichtnutzer:** Die Oberleitungs-Infrastruktur wird z. B. durch alle nicht CO<sub>2</sub>-emissionsfreien Lkw auf elektrifizierten Autobahnstrecken finanziert (Anlastung externer Kosten).

Alle Varianten haben Vor- und Nachteile (vgl. Abbildung 7-6). So ergibt sich bspw. aus der Finanzierung aus Steuermitteln eine zusätzliche Belastung der öffentlichen Haushalte. Würde man hingegen nur die Nutzer der Oberleitung an der Finanzierung beteiligen, macht das den O-Lkw für potenzielle Umsteiger weniger attraktiv. Umgekehrt kann eine Mautbefreiung für Oberleitungs-Nutzer ein entscheidender Anreiz zum Umstieg sein. Entfielen die Maut allerdings für O-Lkw dauerhaft vollständig, so wäre dies nicht kompatibel mit der europäischen Grundidee einer verursachungsgerechten Anlastung von Wegekosten und unter diesem Gesichtspunkt kritisch zu hinterfragen. Unproblematischer erscheint hier eine generelle Einpreisung der Oberleitungs-Kosten in die Lkw-Maut, d. h. eine Finanzierung durch Nutzer und Nicht-Nutzer gleichermaßen. Nutzer gleichermaßen. Nach einer Überarbeitung der Wegekostenrichtlinie wäre hier auch eine Mautspreizung, die sich an den CO<sub>2</sub>-Emissionen des Fahrzeugs orientiert, eine Option.

**Abbildung 7-6: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Finanzierungsmodelle**

Refinanzierung durch Staat aus Steuermitteln	+ wenig komplex	- zusätzliche Belastung für Verkehrshaushalt
Refinanzierung allein durch Nutzer über Entgelt für Infrastrukturnutzung	+ verursachungsgerecht + internationale Anschlussfähigkeit relativ gut realisierbar	- zusätzliche Belastung für Pioniere: ggf. Akzeptanzprobleme bei Nutzern
Refinanzierung durch Nutzer und Nichtnutzer	+ wenig komplex + internationale Anschlussfähigkeit relativ gut realisierbar	- wenig verursachungsgerecht: ggf. Akzeptanzprobleme bei Nicht-Nutzern? - rechtliche Machbarkeit ist zu prüfen (Gebühr nur für tatsächliche Inanspruchnahme einer Leistung möglich)
Refinanzierung allein durch Nichtnutzer via Anlastung externer CO <sub>2</sub> -Kosten	+ setzt Anreiz für CO <sub>2</sub> -Reduktion + gut für erste Strecken geeignet	- fördert auch andere CO <sub>2</sub> -arme Technologien - schafft sich irgendwann selbst ab (weniger für Gesamtnetz geeignet) - rechtliche Machbarkeit ist zu prüfen

Quelle: Eigene Darstellung

Im Fachworkshop war wiederum bei den anwesenden Speditionsvertretern eine klare Präferenz zu erkennen: Bevorzugt wurde eine Einpreisung in die Lkw-Maut, also eine gemeinschaftliche

Finanzierung durch Nutzer und Nichtnutzer der Oberleitung gleichermaßen. Allerdings dominierte als Argument für diese Variante weniger die (vermeintliche) Fairness als vielmehr der Wunsch nach einer möglichst unkomplizierten Form der Abrechnung.

Die Auswirkungen von unterschiedlichen Finanzierungs- und Abgabenmodellen auf den möglichen Markthochlauf von O-Lkw und die Auswirkungen auf den Staatshaushalt wurden im Rahmen der Markthochlaufmodellierung in StratON untersucht und werden in Kapitel 8 diskutiert.

### 7.3.3. Beschaffungs- und Organisationsmodelle

Die Beschaffungs- und Organisationsmodelle für die Oberleitungs-Infrastruktur lassen sich anhand eines von der ÖPP-Initiative NRW entwickelten „Werkzeugkastens“ eingrenzen (Alfen & Buschmeier 2013). Ausgangspunkt ist dabei ein allgemeines Lebenszyklusmodell. Die fünf Phasen der Projektrealisierung (siehe Abbildung 7-7) eignen sich auch zur Gliederung der Schritte, die im Rahmen einer aufzubauenden Oberleitung zu betrachten sind.

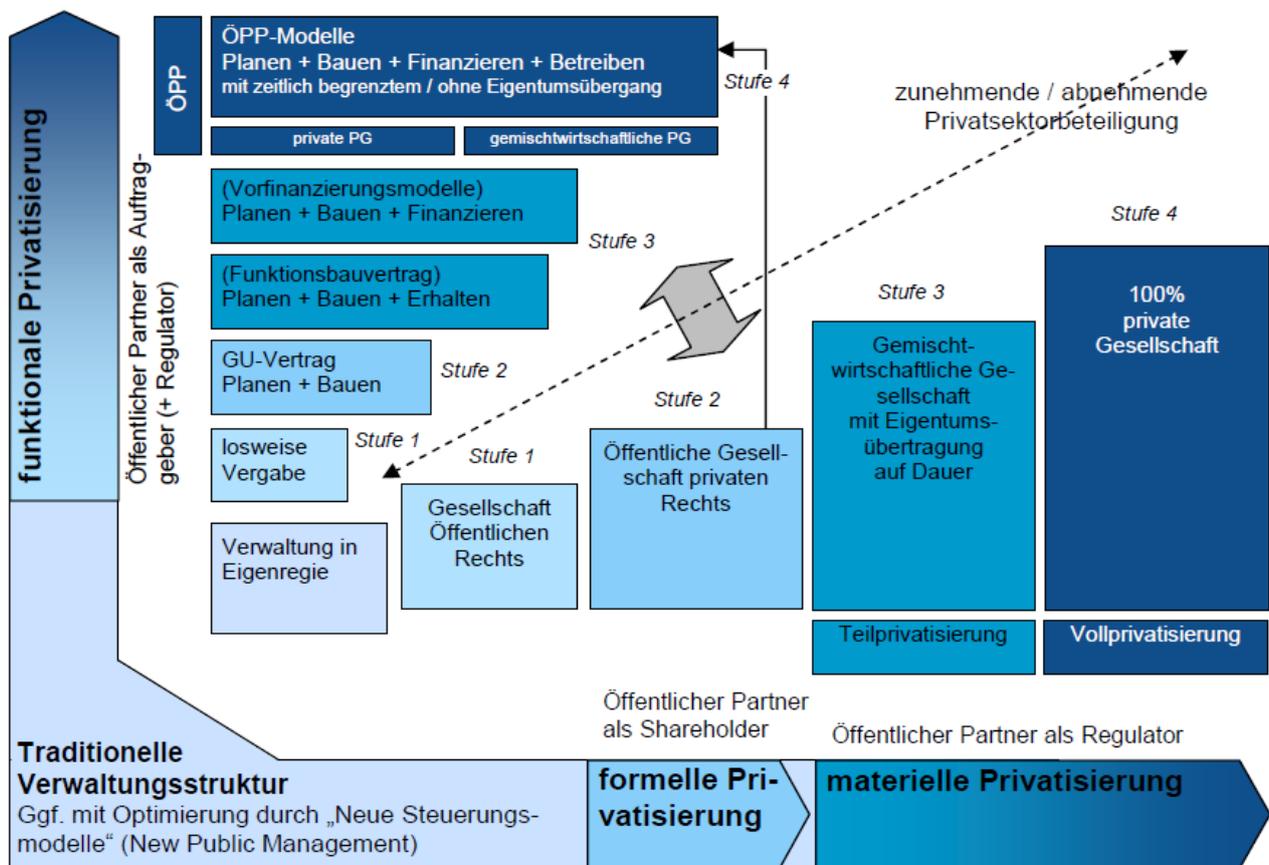
**Abbildung 7-7: Lebenszyklusphasen in der Projektrealisierung**



Quelle: Eigene Darstellung

Eine rein staatliche Leistungserbringung, bei der Planung, Bau, Betrieb und Erhaltung der Infrastruktur allein durch staatliche Ressourcen erbracht werden, ist grundsätzlich denkbar, und spiegelt auch die grundsätzliche Infrastrukturverantwortung des Bundes nach Art. 90 GG wider. Alleine für die „Transfer“-Phase, d. h. die Zuordnung der Eigentumsrechte nach der Errichtungs- bzw. Erntungsphase, ist dabei ein dauerhafter Übergang in Privateigentum (und eine damit verbundene Vollprivatisierung) gesetzlich ausgeschlossen. Für alle anderen Phasen hingegen sind diverse Privatisierungsmöglichkeiten bzw. Öffentlich-private Partnerschaften denkbar. Das Spektrum reicht von der losweisen Vergabe einzelner Aufgaben (bspw. Herstellung) über eine öffentlich-private Partnerschaft für den gesamten Lebenszyklus bis zur materiellen Teilprivatisierung (siehe Abbildung 7-8).

Abbildung 7-8: Privatisierungsmodelle (Alfen & Buschmeier 2014)



Quelle: Eigene Darstellung

Insbesondere im Fernstraßenbau ist heute eine funktionale Privatisierung üblich, d. h. der Bau der Straße sowie aufwändigere Erhaltungsarbeiten werden an private Unternehmen übertragen. Zunehmend wird im Rahmen von PPP-Modellen auch die Betriebsphase von Privaten erbracht (vgl. Abbildung 7-8).

Tabelle 7-2: Möglichkeiten der funktionalen Privatisierung

Modell	Erläuterung
Vergabe in Losen	Teilleistungen werden einzeln ausgeschrieben und vergeben.
Generalunternehmer-Vertrag (GU-Vertrag)	Alle Bauleistungen (inkl. Planung) werden zusammen ausgeschrieben und an einen Generalunternehmer vergeben.
Funktionsbauvertrag	Wie GU-Vertrag, allerdings ist GU auch für Erhaltung der Infrastruktur zuständig.
Vorfinanzierungsmodell	Wie GU-Vertrag, allerdings ist GU auch oder ausschließlich für die Vorfinanzierung des Projekts zuständig.
ÖPP	Planung, Herstellung, Finanzierung, Betrieb und Erhaltung werden als Komplettleistung ausgeschrieben und vergeben.

Quelle: Eigene Darstellung

Die bisher in Deutschland im Straßenverkehr angewandten ÖPP-Modelle sind alle nach dem Schema „Build, Operate, Transfer“ strukturiert (vgl. Wolter 2004). Der private Auftragnehmer ist also sowohl für (Ausführungs-)Planung, Finanzierung und Bau der Infrastruktur als auch für deren Betrieb bzw. Erhaltung über einen vorab definierten Zeitraum zuständig. Zum Ende der Laufzeit geht die Verantwortung für Betrieb und Erhaltung dann wieder an den (öffentlichen) Auftraggeber über. Die Vergütung erfolgt dabei bisher nach einem der drei Modelle gemäß Tabelle 7-3.

**Tabelle 7-3: Vergütungsmodelle bei deutschen ÖPP-Modellen im Straßenverkehr**

	Vergütung	Abwicklung
<b>A-Modell</b>	verkehrsmengenbasiert	Auftragnehmer wird indirekt durch Nutzungsgebühren vergütet („Weiterleitung“ der Maut durch Auftraggeber). <sup>10</sup>
<b>F-Modell</b>		Auftragnehmer erhält Konzession um selbst Nutzungsgebühren zu erheben. <sup>11</sup>
<b>V-Modell</b>	verfügbarkeitsbasiert	Auftragnehmer wird durch monatliches Leistungsentgelt vergütet (in Abhängigkeit von Qualität und Verfügbarkeit der Infrastruktur). <sup>12</sup>

Quelle: Eigene Darstellung

Neben der funktionalen Privatisierung finden sich in Deutschland auch formelle und materielle Privatisierungsmodelle im Infrastrukturbereich. So sind bspw. die Verteil- und Übertragungsnetze für Strom und Gas materiell privatisiert. Der Staat tritt nur noch als Regulator auf. DB Netze und DB Energie wiederum, zusammen zuständig für einen Großteil des Schienen- und Bahnstromnetzes in Deutschland, sind als Tochterunternehmen der zu 100 % in Staatsbesitz befindlichen Deutsche Bahn AG formell privatisiert; eine vollständige materielle Privatisierung ist hingegen nach Art. 87e GG ausgeschlossen.

Direkt mit dem Privatisierungsmodell verknüpft ist die Art der Partnerschaft, die entweder als horizontal oder vertikal bezeichnet wird. Bei fast allen Formen der funktionalen Privatisierung handelt es sich um eine vertikale Partnerschaft, bei der die Rechte und Pflichten des Auftraggebers (i.d.R. der Staat) und des Auftragnehmers (bspw. eine Projektgesellschaft oder ein Einzelunternehmen) über Werk- und Dienstleistungsverträge geregelt sind. Bei materiellen Teilprivatisierungen und ÖPP mit gemischtwirtschaftlicher Projektgesellschaft hingegen handelt es sich um eine horizontale Partnerschaft, d. h. die Beziehung zwischen Staat und privaten Partnern wird über Gesetze und/oder einen Gesellschaftsvertrag definiert.

#### 7.3.4. Vergütungs- und Finanzierungsmodelle

Immer dann, wenn ein privater Partner eine Leistung erbringt, wird er dafür nach einem vertraglich festgelegten Vergütungsmodell entlohnt. Das Vergütungsmodell kann, muss aber nicht zwingend einen Bezug zum Abrechnungsmodell für die Nutzung der Oberleitung aufweisen. Beim

<sup>10</sup> Vgl. BMVI (2018a)

<sup>11</sup> Vgl. BMVI (2018b)

<sup>12</sup> Vgl. BMVI (2018c)

Vergütungsmodell geht es vielmehr darum, wie ein potenzieller privater Leistungserbringer vom Auftraggeber vergütet wird.

Alfen & Buschmeier (2014) unterscheiden zwischen sechs verschiedene Arten von Vergütungsmodellen. In Tabelle 7-4 ist dargestellt, inwiefern sich diese Modelle, nach erster Einschätzung, für die Vergütung privater Partner während der Errichtungs- bzw. Nutzungsphase einer Oberleitungs-Infrastruktur eignen.

**Tabelle 7-4: Vergütungsmodelle und deren Eignung in der Errichtungs- und Nutzungsphase**

Modell	Errichtungsphase	Nutzungsphase
Leistungsbasiert	X	X
Verfügbarkeitsbasiert	(X)	X
Mengenbasiert		
Erfolgsorientiert		
Nutzungsbasiert		X

X = geeignet / (X) = bedingt geeignet

Quelle: Eigene Darstellung

Die einfachste Form der Vergütung ist die leistungsbasierte Zahlung, bei der der Auftragnehmer für die Erbringung einer konkreten Leistung bezahlt wird. Dies kann beispielsweise ein pauschales Entgelt für Planung und Bau der Oberleitung auf einem bestimmten Abschnitt sein (Errichtungsphase) oder ein monatliches Entgelt für den Betrieb der Oberleitung (Nutzungsphase). Da in Abhängigkeit von der Definition der vereinbarten Leistung aber ggf. Anreize gesetzt werden, möglichst kostensparend zu arbeiten und damit eine Leistung zu erbringen, die gerade noch den vereinbarten Ansprüchen genügt, werden leistungsbasierte Zahlungen oft mit anderen Modellen kombiniert. So wird bei den oben genannten ÖPP-Modellen bspw. eine „Anschubfinanzierung“ (=leistungsbasiert) gewährt, diese aber mit nutzungsbasierten Zahlungen (A- und F-Modell) bzw. verfügbarkeitsbasierten Zahlungen (V-Modell) verbunden. Solch eine Kombination wäre prinzipiell auch für die Oberleitungsinfrastruktur denkbar.

Mengenbasierte Zahlungen beziehen sich i.d.R. auf Versorgungsleistungen wie Strom oder Wasser und sind daher für die Vergütung der reinen Infrastrukturbereitstellung nicht anwendbar. Erfolgsorientierte Vergütungsmodelle erschienen grundsätzlich denkbar, wenngleich sie schwierig zu vereinbaren sind: es müssen hier zunächst geeignete Ziele definiert werden, z. B. eine bestimmte Zahl genutzter Fahrzeuge, was im Falle einer neuen und unbekanntem Technologie eher schwerfallen dürfte.

Die Kapitalbereitstellung und Vorfinanzierung der Infrastruktur kann entweder rein öffentlich, rein privatwirtschaftlich oder in einer Mischform erfolgen. Bei der Wahl eines für die Oberleitung geeigneten Modells sind neben den Finanzierungskosten auch die Risikoallokation und Koordinierungs- bzw. Monitoringaufwände zu berücksichtigen.

Die öffentliche Finanzierung stellt prinzipiell die günstigste Form der Kapitalbereitstellung dar, da die notwendigen Mittel entweder direkt aus dem Staatshaushalt oder über niedrigverzinstes

Fremdkapital bereitgestellt werden. Dennoch herrscht in Deutschland ein anhaltender „Investitionsstau“ (Siems 2017), was den Bau und die Erneuerung der Infrastruktur angeht. Daher wird zunehmend auch die Beteiligung privater Unternehmen bzw. Kapitalgeber geprüft (Kleine et al. 2014). Für die privatwirtschaftliche Finanzierung bestehen grundsätzlich drei Optionen:

1. Projektfinanzierung
2. Unternehmensfinanzierung
3. Forfaitierung mit Einredeverzicht.

Die Projektfinanzierung bildet ein sich selbst tragendes, in sich abgegrenztes Projekt. Dabei wird zumeist eine neu gegründete Projektgesellschaft genutzt. Die Eigenkapitalgeber bzw. Investoren einer Projektgesellschaft können grundsätzlich in zwei Gruppen unterteilt werden, nämlich in strategische Investoren (Sponsoren) und in Finanzinvestoren. Strategische Investoren haben ein primäres Interesse an den Aufgaben der Projektgesellschaft. Das Interesse der Finanzinvestoren ist hingegen primär eine angemessene Rendite. Zu den Finanzinvestoren zählen bspw. internationale Banken, Versicherungen, Investment- & Pensionsfonds, Leasinggesellschaften, Immobilienaktiengesellschaften und Private Equity Firmen, wobei zwischen den verschiedenen Gruppen teils große Interessensunterschiede bestehen. Pensionsfonds und Versicherungen sind durch gesetzliche Regulierungen an langfristige Anlagen gebunden. Banken traten in der Vergangenheit häufig als Fremdkapitalgeber und Berater auf, Tochtergesellschaften der Banken, in Form von Leasing- oder Fondgesellschaften aber durchaus auch als Eigenkapitalgeber. Hierbei werden die erworbenen Beteiligungen durch bspw. geschlossene Fonds, den Kapitalmarkt oder durch Weiterveräußerung refinanziert (vgl. Wohlfahrt 2016).

Bei einer Unternehmensfinanzierung wird das Projekt nicht rechtlich ausgegliedert, sondern verbleibt im Unternehmen. Hierbei haftet das Unternehmen mit all seinen Werten. Im Vergleich zur Projektfinanzierung hat die Unternehmensfinanzierung geringere Organisationskosten und ist deutlich flexibler. Die Unternehmensfinanzierung eignet sich allerdings vornehmlich für kleinere Vorhaben (vgl. Wohlfahrt 2016).

Als weitere Finanzierungsform wäre eine Forfaitierung<sup>13</sup> mit Einrede-, Einwendungs- und Aufrechnungsverzicht denkbar. Dieses Modell ähnelt einer Kreditaufnahme durch den Auftraggeber, dieser kann aufgrund des Einredeverzichts jedoch Zahlungen (an den Forfaiteur) nicht aufgrund von Schlechtleistungen des Auftragnehmers (Forfaitist) vermindern. Die Fremdkapitalbeschaffung ist durch die Ausnutzung der öffentlichen Finanzierungsbedingungen sehr effizient. Außerdem kann der Staat Risiken minimieren, indem er sich bspw. durch Bürgschaften oder Garantien gegen die Insolvenz des Privaten schützt (vgl. Alfen & Buschmeier 2013).

## 7.4. Abrechnungsmodelle für die Infrastruktur

### 7.4.1. Heutiges System der Maut- und Kraftstoffabrechnung

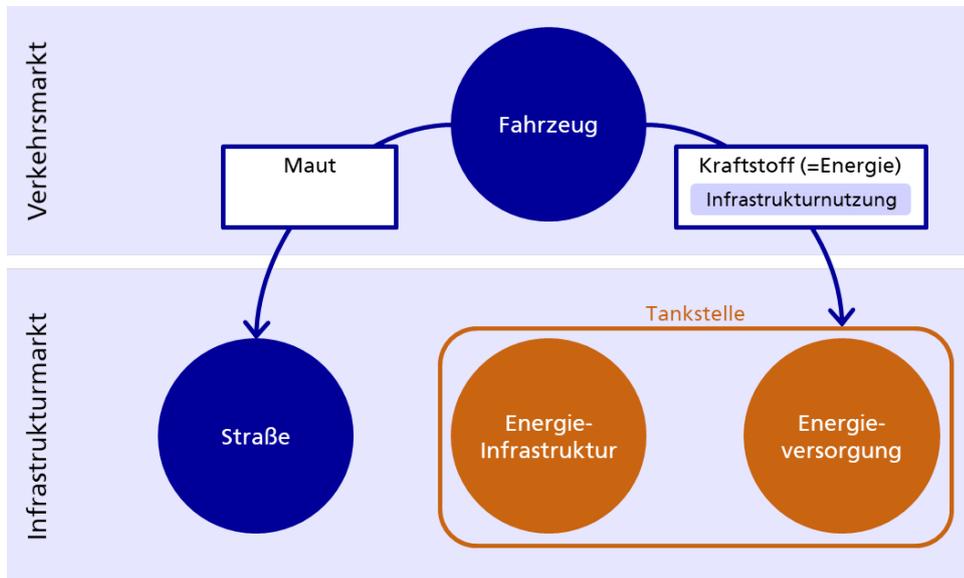
Am anschaulichsten lassen sich mögliche Abrechnungsmodelle für Oberleitung und Fahrstrom erläutern, wenn man die derzeitige Situation zum Ausgangspunkt nimmt. Wie in Abbildung 7-9 dargestellt, muss ein Spediteur bzw. Frachtführer i.d.R. für jedes Fahrzeug bei der Fahrt auf mautpflichtigen Straßen die fällige Maut entrichten und den für die Fahrt erforderlichen Kraftstoff beschaffen. Er hat dabei (prinzipiell) die freie Wahl, an welcher Tankstelle das Fahrzeug betankt wird. Die Nutzung

---

<sup>13</sup> An-/Verkauf von Forderungen

der Energieinfrastruktur ist bereits in den Kraftstoffkosten eingepreist; diese werden mengenbasiert in Euro pro Liter abgerechnet.

**Abbildung 7-9: Abrechnungsmodell für fossile Kraftstoffe**



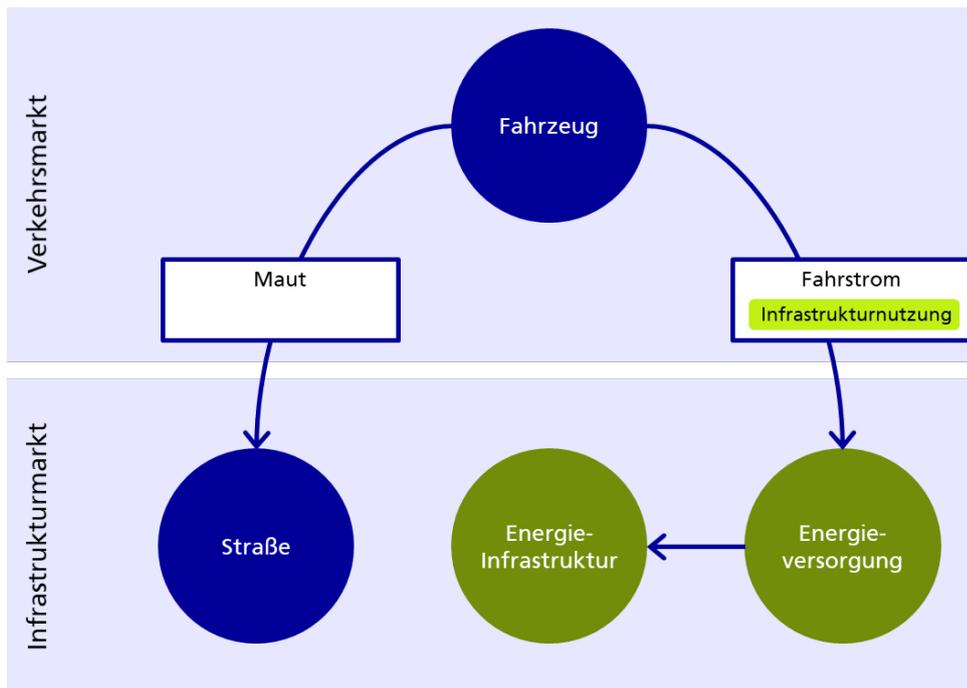
Quelle: Eigene Darstellung

#### 7.4.2. Denkbare Varianten im Oberleitungs-Modell

Im Vergleich zur Tankstelle handelt es sich bei Oberleitungen um eine systembasierte Energieversorgungsinfrastruktur. Dies schränkt die direkte Übertragbarkeit des oben dargestellten Modells deutlich ein. Ähnlich wie für Strom-, Gas- oder Wasserversorgungsnetze ergibt sich bei der Oberleitung ein natürliches Monopol. Es ist – ungeachtet der damit verbundenen technischen Probleme – ökonomisch nicht sinnvoll, wenn es an ein und derselben Straße mehrere konkurrierende Oberleitungen gibt. Eine Wahlfreiheit bei der physischen Infrastruktur ist daher zunächst nicht gegeben. Anderes gilt hingegen für den Energieversorger, wie z. B. auch bei der Hausstromversorgung.

Ein denkbare Abrechnungsmodell für O-Lkw nimmt daher den Hausstrom zum Vorbild: das Netzentgelt ist im Strompreis enthalten und wird über den Stromversorger abgerechnet (vgl. Abbildung 7-10). Wie der Verbraucher beim Hausstrom hat der Frachtführer dabei die Wahlfreiheit bzgl. der Energieversorgung.

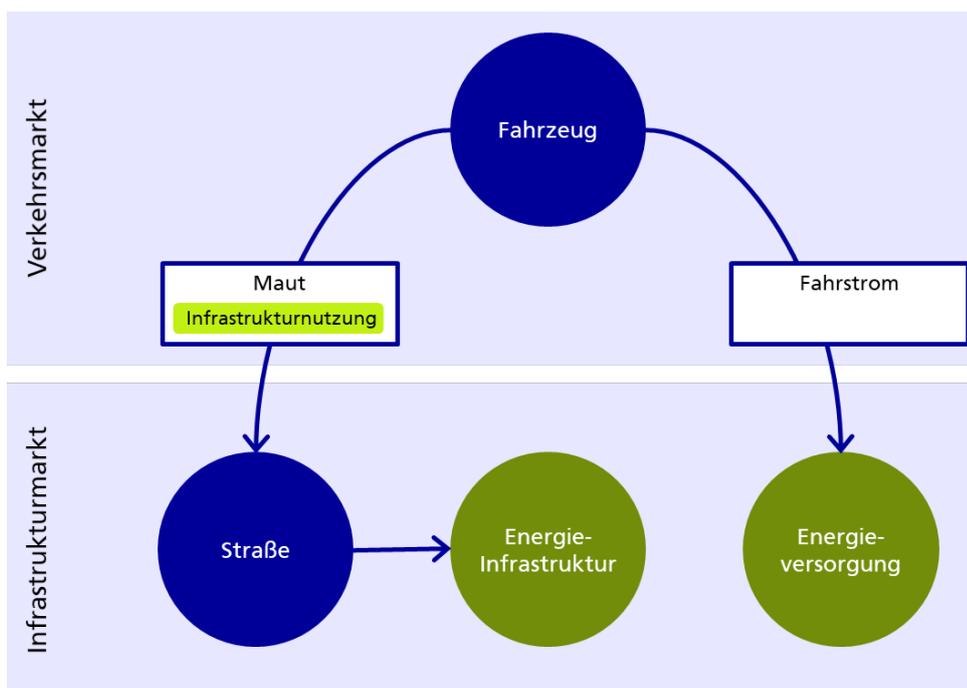
Abbildung 7-10: Abrechnungsmodell „Hausstrom“



Quelle: Eigene Darstellung

Eine weitere Möglichkeit wäre es, die Infrastrukturnutzung als Komponente der Maut abzurechnen (vgl. Abbildung 7-11). Dies würde insbesondere dann Sinn ergeben, wenn die Infrastruktur von allen mautpflichtigen Autobahnnutzern finanziert würde und dies durch einen geeigneten Abrechnungsmodus sicherzustellen ist.

Abbildung 7-11: Abrechnungsmodell „Maut“



Quelle: Eigene Darstellung

### 7.4.3. Bemessungsgrundlagen

Während der getankte Kraftstoff zwischen Tankstelle und Kunde vergleichsweise einfach über den Preis in Euro pro Liter abgerechnet werden kann, kommen bei Fahrstrom und Oberleitung mehrere Größen als Bemessungsgrundlage in Frage. Dieses Thema ist in ähnlicher Form aus dem Bereich Laden von Elektrofahrzeugen an öffentlicher (Schnell-)Ladeinfrastruktur bekannt: es wird hier entweder in Euro pro Energieeinheit (kWh), in Euro pro Zeiteinheit oder in Euro pro Ladevorgang abgerechnet. Zusätzlich werden die Preise oft nach Art der Ladung (Wechsel-/Gleichstrom) und Ladeleistung differenziert. Ein ähnlicher Ansatz wäre auch bei der Oberleitung denkbar, zusätzlich könnte hier aber auch eine Abrechnung in Euro pro Kilometer befahrener Strecke sinnvoll sein. Folgt man der Annahme, dass Energieinfrastruktur (Stromnetz bzw. Oberleitung) und Energieversorgung (Fahrstrom) separat abgerechnet werden, ergeben sich die in Tabelle 7-5 dargestellten Optionen.

**Tabelle 7-5: Mögliche Bemessungsgrundlagen für Infrastruktur- und Fahrstromabrechnung**

Abrechnungskomponente	Mögliche Bemessungsgrundlagen
Energieinfrastruktur (Nutzung der Oberleitung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Befahrene Strecke mit OL (km)</li> <li>▪ Zeit an OL (min)</li> <li>▪ Leistung (kW)</li> <li>▪ Grundgebühr (Monat/Jahr)</li> </ul>
Energieversorgung (Fahrstrom)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Energiemenge (kWh)</li> <li>▪ Leistung (kW)</li> <li>▪ Grundgebühr (Monat/Jahr)</li> </ul>

Quelle: Eigene Darstellung

Im Rahmen des StratON-Fachworkshops zeigte sich, dass die letztlich gewählte Bemessungsgrundlage für die Infrastruktur- und Fahrstromabrechnung nur eine nachrangige Rolle für Unternehmen zu spielen scheint. Wichtiger war für die Workshop-Teilnehmer, dass die Kosten planbar sind, also kalkuliert werden können, um sie anschließend „richtig“ einzupreisen.

### 7.4.4. Technisch-organisatorische Herausforderungen

Zur Versorgung der Oberleitungs-Infrastruktur ist angedacht, diese an das öffentliche Mittel- oder Hochspannungsnetz anzuschließen. Für die an den Einspeisepunkten aus dem öffentlichen Netz gelieferten Strommengen sind vom Betreiber der Oberleitung Netzentgelte an die jeweiligen Verteil- bzw. Übertragungsnetzbetreiber zu bezahlen. Diese vorgelagerten Netzentgelte könnten dann Bestandteil eines vom Betreiber der Oberleitung erhobenen Entgelts für die Infrastrukturnutzung sein. Da die vorgelagerten Netzentgelte je nach Region, und damit auch entlang einer elektrifizierten Strecke sehr stark variieren können, ist eine verursachungsgerechte Abrechnung nur sehr aufwändig realisierbar.

Im – geschlossenen – Bahnstromnetz wird dieses Problem umgangen, indem für alle Nutzer ein einheitliches Entgelt erhoben wird, das auf einem gemittelten Erfahrungs- bzw. Prognosewert basiert (vgl. DB Energie 2018). Sollten diese Werte deutlich von den tatsächlichen Werten abweichen, werden die Netzentgelte angepasst. Generell wäre dieses Modell auch für die Abrechnung bei O-Lkw geeignet, auch wenn verschiedene Teilstrecken von unterschiedlichen Betreibern abgerechnet werden. Es wird jedoch ein zusätzlicher Ausgleich und damit erhöhter Koordinationsaufwand zwischen den Betreibern nötig.

Demgegenüber würde es eine exakt verursachungsgerechte Lösung erforderlich machen, bei der Stromzählung immer auch die exakte Position des Fahrzeugs bzw. den relevanten Oberleitungsabschnitt zu identifizieren und zu übermitteln. Hierfür müsste das Oberleitungsnetz eventuell zwischen jedem Einspeisepunkt unterbrochen werden, sodass eine eindeutige Zuordnung der vorgelagerten Netzentgelte zu den verursachenden Nutzern erfolgen kann. Die Abrechnungslogik wäre dadurch erheblich komplizierter. Zusätzlich bergen variierende Netzentgelte die Gefahr, dass sich Nutzer taktisch verhalten und die Oberleitung insbesondere dort nutzen, wo die Entgelte geringer sind. Dies wiederum kann – je nach Beschaffungs- und Organisationsmodell – die Rentabilität der betroffenen Strecke für den (privaten) Betreiber gefährden.

Sowohl Betreiber als auch Nutzer der Oberleitung haben ein Interesse daran, dass Missbrauch bzw. Betrug verhindert werden. Aus Sicht der Nutzer muss eine eindeutige Zuordnung der von ihnen genutzten Oberleitung (Zeit/Strecke bzw. elektrische Leistung) und der von ihnen entnommenen Strommengen sichergestellt sein. Hierfür könnte auf das aus dem Bahnbereich bekannte System mit technischen und virtuellen Entnahmestellen zurückgegriffen werden (vgl. DB Energie 2014). Außerdem ist zu erwarten, dass die Abrechnung eichrechtlichen Vorgaben unterliegt. Daher ist zu gewährleisten, dass die Verbrauchsdaten veränderungssicher gespeichert und übertragen werden, sodass die Nachvollziehbarkeit bzw. Transparenz der Abrechnung sichergestellt ist.

Aus Betreibersicht muss hingegen sichergestellt werden, dass die Oberleitung nur von autorisierten Fahrzeugen genutzt wird. Falls es bei einem Nutzer zu Zahlungsausfällen kommt, sollte es möglich sein, die ihm zugeordneten Entnahmestellen zu „sperrern“. Dies könnte bspw. über intelligente, fernsteuerbare Stromzähler realisiert werden. Eine Verhinderung der Stromentnahme durch nicht autorisierte Stromabnehmer (Pantographen) könnten hingegen wahrscheinlich nur über schaltbare Leitungen (ggf. in Kombination mit intelligenten Stromzählern) oder eine aufwändige (Video-)Überwachung realisiert werden.

Da ausländische Lkw immerhin 40 % (2015) der Kilometer auf mautpflichtigen Straßen in Deutschland ausmachen (NOZ 2016), ist die internationale Anschlussfähigkeit des Systems ein entscheidender Erfolgsfaktor. Neben den technischen Anforderungen wie bspw. einer einheitlichen Spannungsebene sind hierfür auch harmonisierte Authentifizierungs- und Abrechnungsmechanismen zu berücksichtigen. Als Beispiel hierfür könnte die Kooperation der mauterhebenden Organisationen in Deutschland (Toll Collect) und Österreich (ASFINAG) dienen: für die Erfassung der Maut wird zwischenzeitlich eine gemeinsame On-Board Unit genutzt, die Abrechnung erfolgt aber weiterhin separat (Toll Collect 2018).

## 7.5. Fazit

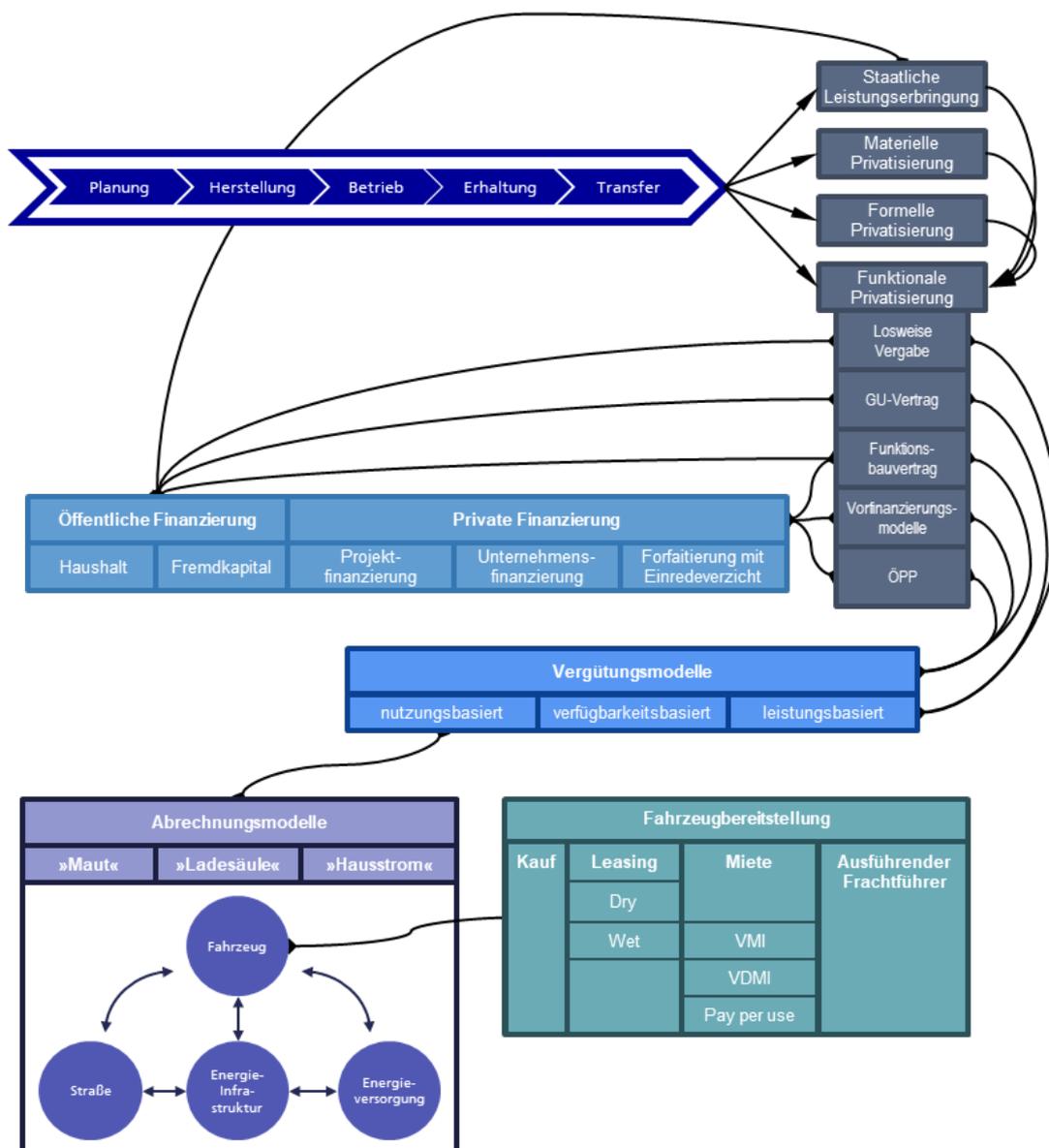
Die oben dargestellten Überlegungen zu Geschäftsmodellen bilden gemeinsam einen Geschäftsmodell-Baukasten. Sie sollen dazu dienen, begleitende Geschäfts- bzw. Finanzierungsmodelle für das System „Oberleitungs-Lkw“ zu kreieren. Bei der Kombination der einzelnen Bausteine sind die gegenseitigen Abhängigkeiten zu beachten, wobei die wichtigsten Abhängigkeiten in Abbildung 7-12 noch einmal zusammengefasst sind.

Ausgehend vom Lebenszyklusmodell lässt sich eine Vielzahl von Möglichkeiten für die (Teil-) Privatisierung von Aufgaben in den verschiedenen Phasen ableiten. Eine funktionale Privatisierung kann dabei oft mit anderen Privatisierungsformen kombiniert werden. Während staatliche Leistungserbringung und formelle Privatisierung i.d.R. öffentlich finanziert werden, ist bei funktionaler oder materieller Privatisierung auch eine private Finanzierung möglich. Immer wenn Private in die Aufgabenerfüllung eingebunden werden, muss auch ein Vergütungsmodell definiert werden. Je nachdem, ob dieses eher nutzungsbasiert oder leistungs-/verfügbarkeitsbasiert gestaltet ist, verbleiben dann

mehr bzw. weniger Risiken beim Staat. Zusätzlich zur Vergütung zwischen Staat und privatem Leistungserbringer, muss festgelegt werden, wie die Abrechnung der Infrastrukturnutzung gegenüber den Nutzern funktionieren soll. Hier ließen sich über geeignete Modelle (bspw. Einschluss in Maut) auch Nicht-Nutzer in die Refinanzierung der Oberleitungsinfrastruktur einbinden. Schlussendlich stellt sich die Frage, ob bekannte Modelle der Fahrzeugbereitstellung (Kauf, Leasing, Miete) im Markt Akzeptanz finden, oder ob in der Phase des Markthochlaufs zunächst auf Carsharing-ähnliche Ansätze zurückgegriffen wird. Von Nutzerseite wird diesbezüglich insbesondere die Planbarkeit der zu erwartenden (Zusatz-)Kosten hervorgehoben.

Neben der Nutzerakzeptanz sollte bei der Auswahl der Geschäftsmodell-Bausteine, falls möglich, auch deren Einfluss auf die Resilienz und internationale Anschlussfähigkeit des Systems mit einbezogen werden. Zudem müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

**Abbildung 7-12: Geschäftsmodell-Baukasten im Überblick**



Quelle: Eigene Darstellung

Die dargestellten Aspekte der Infrastruktur- und Fahrzeugbereitstellung zeigen kritische Pfade für die Einführung und den Ausbau des O-Lkw-Systems aus Betreiber- und Geschäftsmodell­sicht auf. Gleichwohl besteht für die letztliche Umsetzung der Markteinführung politischer Gestaltungsspielraum. Grundsatzentscheidungen, etwa darüber, welche Anreize gesetzt werden, oder wer die Infrastruktur refinanziert, können im Rahmen dieser Abhandlung nicht beantwortet werden. Da diese Entscheidungen aber wesentlichen Einfluss darauf haben, welche Geschäftsmodell-Bausteine zum Tragen kommen, können auch hier keine abschließenden Empfehlungen gegeben werden. Dennoch soll und kann der hier entwickelte Baukasten dazu dienen, das Spektrum der Fragestellungen aufzuzeigen, die sich im Zuge der Markteinführung stellen werden.

## 8. Markthochlaufszenerarien

### 8.1. Einleitung

Im folgenden Kapitel werden mögliche Markthochläufe von O-Lkw in Abhängigkeit relevanter Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren dargestellt und die ökologischen und ökonomischen Effekte quantifiziert. Sensitivitätsbetrachtungen sollen dabei den Einfluss verschiedener Rahmenbedingungen genauer beleuchten.

Ausgangspunkt der Modellierung sind folgende Fragestellungen:

- Welches THG-Minderungspotenzial durch O-Lkw ist möglich?
- Welchen Einfluss hat die Geschwindigkeit des Netzausbaus auf die bereits mittelfristig bis 2030 realisierbaren Minderungspotenziale?
- Wie relevant ist Risikoaversion der Entscheider für den Markthochlauf?
- Wie müssen ökonomische Anreize (z. B. CO<sub>2</sub>-Aufschlag auf der Lkw-Maut) ausgestaltet sein, um einen erfolgreichen Markthochlauf zu ermöglichen?
- Wie stellt sich das O-Lkw-System aus volkswirtschaftlicher Perspektive im Vergleich zu anderen diskutierten Dekarbonisierungsstrategien des schweren Straßengüterverkehrs dar?
- Welche Wechselwirkungen könnten sich mit den EU-Lkw-CO<sub>2</sub>-Standards ergeben?

Für die Modellierung wurde das Modell TEMPS des Öko-Instituts um ein neu entwickeltes Modul erweitert. Wesentliche Grundlage waren dabei die verkehrlichen Analysen (siehe Kapitel 6) und die Analysen zu den Antriebstechnologien aus dem StratON-Technologiebericht (Kühnel et al. 2018). Es wurden jedoch im Rahmen der Modellierung einige Aktualisierungen durchgeführt, unter anderem zu Fahrzeugeffizienzen, Emissionsfaktoren und Batteriekosten.

Zunächst wird die Methodik, das verwendete Modell und die wesentlichen Annahmen beschrieben (8.2). Die Ergebnisse der Szenarien und Sensitivitätsrechnungen sind untergliedert in die Darstellung des Markthochlaufs von O-Lkw (8.3), die ökologischen Wirkungen (8.4) und die ökonomischen Effekte (8.5).

### 8.2. Methodik

#### 8.2.1. Überblick über das Vorgehen

Zur Abbildung des Markthochlaufs von O-Lkw wird eine quantitative Modellierung durchgeführt. Dazu wurde das Modells „TEMPS“ des Öko-Instituts im Rahmen des Projektes weiterentwickelt. Das

Modell TEMPS wurde bereits in Projekten wie Renewability III oder den Projektionsberichten der Bundesregierung (BReg 2017; Zimmer et al. 2016) eingesetzt und ermöglicht eine jahresfeine Berechnung der THG-Emissionen des Verkehrssektors in Abhängigkeit von politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen bis zum Jahr 2050.

### Einflussfaktoren auf den Markthochlauf

Eine schematische Übersicht über wesentliche Einflussfaktoren auf den Markthochlauf von O-Lkw findet sich in der folgenden Abbildung 8-1.

**Abbildung 8-1** Übersicht über Einflussfaktoren auf den Markthochlauf von O-Lkw



Quelle: eigene Darstellung

Wesentliche Einflussfaktoren auf den Markthochlauf von O-Lkw sind zunächst die *Verfügbarkeit der Infrastruktur* (Oberleitungen) sowie die *Verfügbarkeit der Fahrzeuge* – beide stellen Grundvoraussetzungen für einen erfolgreichen Markthochlauf dar. Gleichzeitig muss der Fahrzeugeinsatz für die Nutzer attraktiv sein. Dafür ist die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugeinsatzes zentral. Hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge haben die *regulatorischen Rahmenbedingungen* (wie bspw. Steuern, Lkw-Maut, Lkw-CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards). Diese sind potenziell politisch beeinflussbar, bieten also Steuerungsmöglichkeiten. Aber auch *globale Trends* (die nur schwer beeinflussbar sind), können für die Wirtschaftlichkeit relevant sein – so z. B. die Entwicklung des Rohölpreises oder der Batteriepreise. Ob der Fahrzeugeinsatz tatsächlich attraktiv ist, wird zudem durch die Präferenzen im Logistikmarkt und *Fahrzeugeinsatzprofile* beeinflusst. Bei einer Oberleitungsinfrastruktur, welche sich auf bestimmte Achsen bzw. ein Kernnetz konzentriert, spielt weiterhin die Frage eine Rolle, inwiefern Fahrzeugeinsatzprofile auch ans Netz angepasst und neue Logistikkonzepte entwickelt werden. Gleichzeitig erfordert eine höhere Anfangsinvestition in einen elektrischen Lkw, welche sich erst über die Nutzungsdauer amortisiert, die Akzeptanz des Risikos entsprechend längerer *Amortisationszeiten*. Neben der Marktakzeptanz der Technologie spielt auch die Akzeptanz in der Öffentlichkeit und insbesondere vor Ort eine Rolle.

Für die Modellierung wurde als Grundvoraussetzung angenommen, dass weder die Verfügbarkeit der Fahrzeuge noch die Akzeptanz in der Öffentlichkeit eine Restriktion darstellt (da diese beiden Einflussgrößen nur schwer modellseitig operationalisierbar sind). Ebenfalls werden die Kosten für

die Infrastruktur NICHT auf die Nutzer umgelegt. Die übrigen in Abbildung 8-1 dargestellten Einflussfaktoren wurden dagegen explizit bei der Modellierung berücksichtigt.

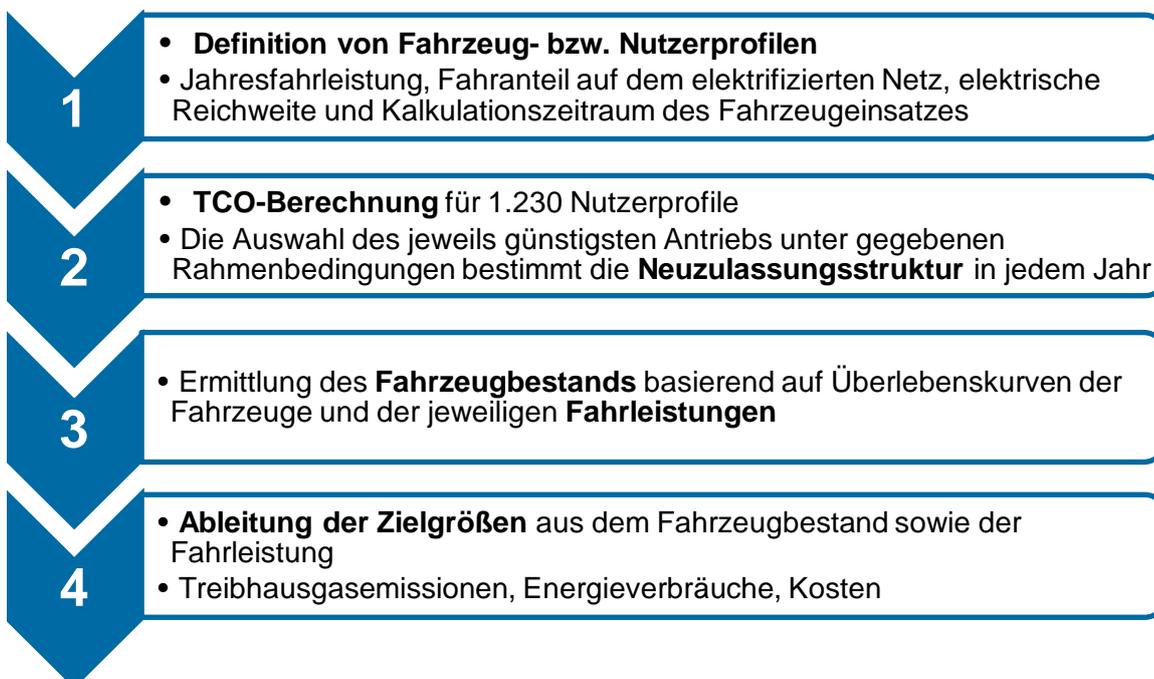
### Übersicht über die Funktionsweise des Lkw-Moduls

Die Methodik des neu entwickelten Lkw-Moduls besteht aus einem agentenbasierten Ansatz in Kombination mit einem TCO-Modell. Wesentliche Leitlinien bei der Entwicklung des Lkw-Moduls waren:

- Die modellendogene Kopplung von Infrastrukturausbau und Fahrzeugnachfrage,
- Die Abbildung von (ausreichend) Heterogenität auf Seiten der Entscheider durch unterschiedliche Fahrzeugprofile,
- Die Berücksichtigung wesentlicher politischer Rahmenbedingungen wie bspw. Lkw-Maut, Energiesteuer, CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards,
- Ein noch vertretbares Ausmaß an Modellkomplexität, so dass die Ergebnisse nachvollziehbar sind.

Das grundsätzliche Vorgehen der Markthochlaufmodellierung im Rahmen von StratON lässt sich in vier Schritte zusammenfassen (Abbildung 8-2). Zunächst wurden Fahrzeug- bzw. Nutzerprofile auf Basis der vorangegangenen verkehrlichen Analysen (siehe Kapitel 6.3) abgeleitet. Im zweiten Schritt wurden Gesamtkostenrechnungen (TCO) für unterschiedliche Antriebsvarianten auf Basis der Nutzerprofile ermittelt und die jeweils kostengünstigste Variante unter Berücksichtigung von Nutzungsrestriktionen bestimmt. Die sich daraus ergebende Neuzulassungsstruktur nach Antriebstyp bildet die Grundlage für die Ermittlung des Fahrzeugbestands und die Ableitung der Zielgrößen zur Bewertung des Gesamtsystems. Die Modellstruktur und die Methodik werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

**Abbildung 8-2: Schritte der Markthochlaufmodellierung**



Quelle: eigene Darstellung

## 8.2.2. Definition von Nutzerprofilen

Die oben skizzierte quantitative Modellierung basiert auf einer Simulation der Kaufentscheidung einer Vielzahl von Agenten. Dies wird ermöglicht durch einen Datensatz an Nutzerprofilen, der durch einen Gewichtungsfaktor die Grundgesamtheit aller Lkw-Nutzer abbildet. Die Attribute des Datensatzes bestehen aus Fahrzeuggrößenklasse, Jahresfahrleistungskategorie und Amortisationszeitraum des Fahrzeugkaufs. O-Lkw verfügen zusätzlich über die Attribute Anteil des elektrischen Fahranteils auf dem Oberleitungsnetz sowie einer Reichweitenanforderung an den (batterieelektrischen) Antriebsmodus. Diese Eigenschaften der O-Lkw-Profile werden aus den vorangegangenen verkehrlichen Analysen (siehe Kapitel 6.3) abgeleitet. Insgesamt ergeben sich 1.230 Lkw-Nutzerprofile (Tabelle 8-1), für die jeweils eine spezifische TCO-Kalkulation durchgeführt wird. Auf Basis der TCO wird für jedes Profil der günstigste Antrieb gewählt, woraus sich per Gewichtung die Neuzulassungsstruktur ableiten lässt.

Die Modellierung erfolgt für Lkw der Größenklassen 3,5 bis 7,5 t, 7,5 bis 12 t, über 12 t sowie Last- und Sattelzüge. Die Oberleitungstechnologie ist im Modell nur für Last- und Sattelzüge verfügbar. Die Anzahl an Fahrleistungskategorien unterscheidet sich für Fahrzeuge mit und ohne Oberleitungsbezug und nach Größenklasse. Für Fahrzeuge mit Oberleitungsbezug ist die Anzahl der Klassen auf fünf begrenzt, da die Anzahl der Datensätze in der Datengrundlage die Anzahl der Gesamtprofile begrenzt. Die Gewichtung der Fahrleistungskategorien wird für alle Größenklassen aus der Fahrleistungserhebung 2014 (BASt 2017) abgeleitet.

**Tabelle 8-1: Anzahl und Struktur der Lkw-Nutzerprofile**

Kategorien	Last- und Sattelzüge mit Oberleitungsbezug	Last- und Sattelzüge ohne Oberleitungsbezug	Andere Lkw-Größenklassen
Fahrleistung	5	6	10
Amortisationszeitraum	5	5	5
Elektrischer Fahranteil	12	0	0
Reichweitenanforderung	4	0	0
Gesamtanzahl Profile	1.200	30	200

Quelle: eigene Darstellung

### Jahresfahrleistung

Da in den verkehrlichen Analysen für die Nutzerprofile nur Fahrten mit mehr als 100 km Länge auf dem elektrifizierten Autobahnnetz berücksichtigt werden (effektiv nur Fahrten länger als 170 km Gesamtstrecke), wird sich bei O-Lkw auf die Verteilung der Jahresfahrleistungen von Sattelzugmaschinen bezogen, die überwiegend auf Strecken über 150 km eingesetzt werden (Entfernungsklasse 3 der Fahrleistungserhebung 2014). Die mittlere Jahresfahrleistung dieser Klasse liegt bei 112.400 km. Die Verteilung der Jahresfahrleistungsklassen, wie sie bei der Modellierung verwendet wird, findet sich in Tabelle 8-2.

**Tabelle 8-2: Kategorisierung der Jahresfahrleistung von Sattelzugmaschinen**

Kategorie Jahresfahrleistung (km)	Anteil Fahrzeuge
40.000	6 %
80.000	11 %
100.000	13 %
120.000	32 %
140.000	18 %
170.000	20 %

Quelle: eigene Darstellung basierend auf Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (2017)

### Amortisationszeitraum

Unternehmen im Logistiksektor sind (nach überwiegender Meinung im Beirat) teilweise risikoavers und erwarten eine sehr schnelle Amortisation von Investitionen in Effizienztechnologien. Sie errechnen die TCO daher mit einem entsprechend kurzen Amortisationszeitraum. Dieser Effekt kann damit zusammenhängen, dass es im Logistiksektor viele Unternehmen mit einer geringen Anzahl an Fahrzeugen mit teilweise nur kurz laufenden Vertragsverhältnissen gibt. Schätzungsweise rund 30 % der Fahrzeuge gehören zu Unternehmen mit weniger als 10 Lkw (Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) 2018).

Es ist keine repräsentative Erhebung zur typischen Verteilung der Amortisationszeiträume bei Lkw-Fahrzeugkäufern bekannt. Häufig werden in Szenarien Amortisationszeiträume von beispielsweise 5 Jahren angenommen, wie auch im StratON Technologiebericht. In der Studie IFEU (2018) wird davon ausgegangen, dass bis zu einer Amortisationszeit von 2 Jahren Technologien selbständig in den Markt gelangen, darüber hinaus nur, wenn es eine Allianz aus Flottenbetreibern, Logistikunternehmen und finanzstarken Verladern als Technologie-Paten gibt.

Um die Heterogenität im Logistikmarkt und die Risikoaversion einiger Akteure im Modell abzubilden, wird der maximale Amortisationszeitraum für alternative Antriebstechnologien in fünf Klassen variiert (1 bis 5 Jahren), um ein unterschiedliches Vorgehen bei der Betriebskostenrechnung bei verschiedenen Marktakteuren abzubilden. In der Standardvariante wird eine Gleichverteilung des Amortisationszeitraums über 1 bis 5 Jahre angenommen (d. h. je 20 % der Käufer pro Amortisationszeitraumklasse).

### Anteil elektrischer Fahranteil auf dem Oberleitungsnetz und Reichweitenanforderung

Der **elektrische Fahranteil** auf dem Oberleitungsnetz sowie die Reichweitenanforderung müssen nur für die Nutzer mit Oberleitungsbezug ermittelt werden. Grundlage für die Herleitung der Einsatzprofile der O-Lkw sind die verkehrlichen Analysen (siehe 6.3). Diese stellen als Ergebnis für jeden Netzausbauzustand einen Datensatz mit Fahrten von Last- und Sattelzügen zur Verfügung, die einen Teil ihrer Fahrt auf einer elektrifizierten Strecke zurücklegen. Jede dieser Fahrten ist definiert durch ihre Gesamtlänge, die Länge des Fahrtabschnitts auf dem Oberleitungsnetz und der Länge des Vor- und Nachlaufs. Aus diesen Attributen lassen sich bei einem definierten Lückenanteil des Oberleitungsnetzes der elektrische Fahranteil und die Reichweitenanforderung jeder Fahrt ermitteln.

In einem zweiten Schritt werden die einzelnen Fahrten den Nutzerprofilen zugeordnet (siehe unten). Schließlich wird zwischen den Netzausbauzuständen interpoliert, um eine jahresfeine Modellierung zu ermöglichen. Die Ermittlung des elektrischen Fahranteils einer Fahrt  $x$  auf dem Oberleitungsnetz im Ausbauzustand  $y$  errechnet sich aus der folgenden Formel:

$$\text{Elektrischer Fahranteil}_{x,y} = \frac{\text{Fahrtlänge auf dem Oberleitungsnetz}_x}{\text{Gesamtlänge der Fahrt}_x} \cdot \text{Elektrifizierungsgrad}_y$$

Daraus lässt sich für einen spezifischen Netzzustand die Verteilung der Fahrten mit bestimmtem elektrischem Fahranteil angeben.

Die **Anforderung an die elektrische Reichweite** im alternativen Antriebsmodus abseits der Oberleitung für die Variante O-BEV leitet sich aus der Länge des Vor- und Nachlaufs ab. Fahrten sind für einen O-BEV mit einer spezifischen Batteriekapazität möglich, wenn die batterieelektrische Reichweite größer oder mindestens gleich der Länge von Vor- und Nachlauf ist, so dass das Fahrzeug genug Energie an Bord hat, um das Ziel zu erreichen und auch wieder den Rückweg zur Oberleitung zu absolvieren. Befindet sich am Start-/Zielort eine Möglichkeit zur Nachladung der Batterie, so verdoppelt sich die Reichweite.

Für die Modellierung werden die O-BEV-Varianten O-BEV 100 und O-BEV 200 definiert, mit jeweils 100 oder 200 km batterieelektrischer Reichweite ohne Nachladung.

**Tabelle 8-3: Reichweite der untersuchten O-BEV je nach Einsatzart**

	Batterieelektrische Reichweite (km)	Vor-/Nachlauf ohne Nachladung am Start-/Zielort (km)	Vor-/Nachlauf mit Nachladung am Start-/Zielort (km)
O-BEV 100	100	50	100
O-BEV 200	200	100	200

Quelle: eigene Darstellung

Den genannten Reichweiten liegt die Annahme zugrunde, dass die Batterie an der Oberleitung in jedem Fall vollständig aufgeladen werden kann - auch wenn der Lkw die Oberleitung mit einer nahezu vollständig entladenen Batterie erreicht. Die Batterieladung hängt von den Faktoren Infrastruktur, Schnellladefähigkeit und Ladeleistung ab.

Die begrenzte Schnellladefähigkeit der Batterien kann eine Restriktion darstellen. Bei der Batteriekonzeption für die eingesetzten O-BEV wird eine C-Rate<sup>14</sup> von 1 angenommen, was bedeutet, dass die Batterie (egal welcher Kapazität) innerhalb einer Stunde voll aufgeladen ist. Bei einer gefahrenen Distanz von mindestens 100 km auf dem Hauptlauf (trifft laut Herleitung auf alle Fahrten zu) und einer Geschwindigkeit von 80 km/h entspricht dies bei einem vollausgebauten Netz einer Ladezeit von 1:15 Stunden. Bei einem reduzierten Elektrifizierungsgrad kann in Einzelfällen die volle Aufladung beschränkt sein, ab einem Elektrifizierungsgrad von etwa 80 % ist die Einschränkung vernachlässigbar. Es wird also in der Modellierung nicht davon ausgegangen, dass die Ladefähigkeit der Batterien eine Restriktion darstellt.

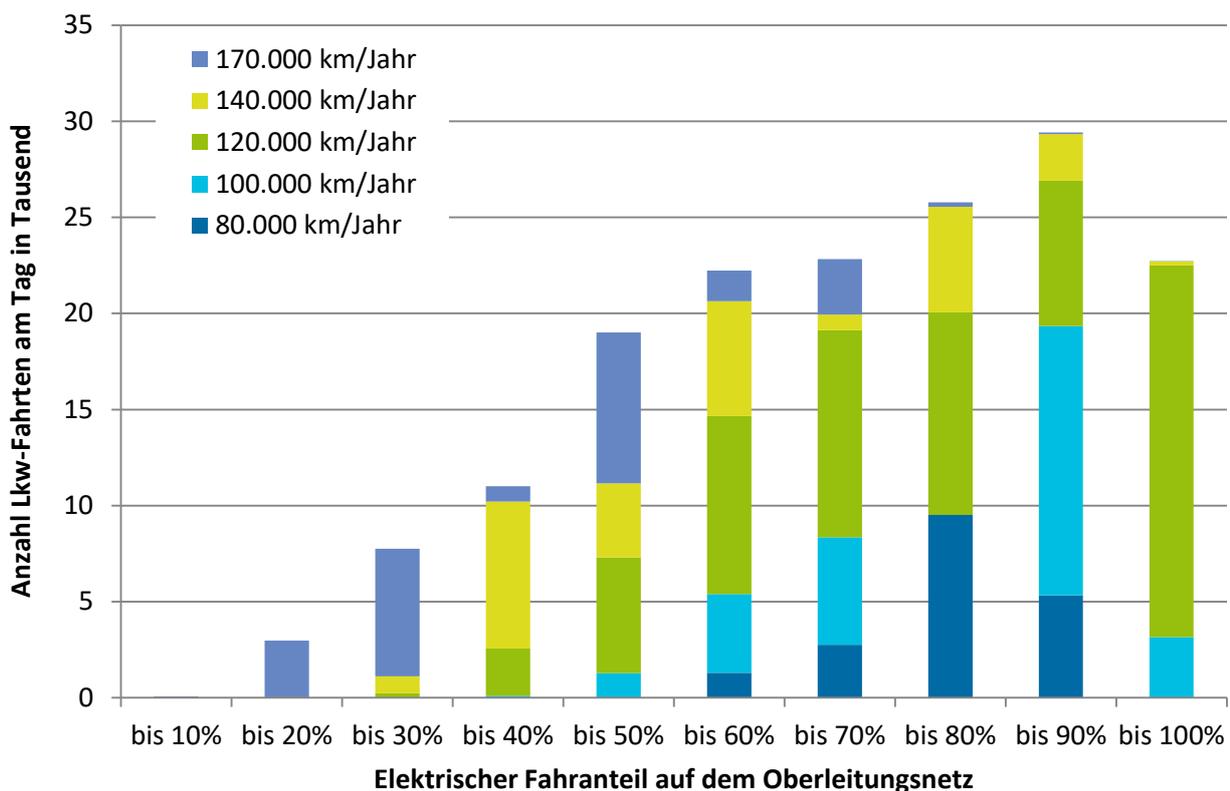
<sup>14</sup> Ladeleistung in Bezug auf die Batteriekapazität (capacity)

## Zuordnung der Fahrten zu Nutzerprofilen

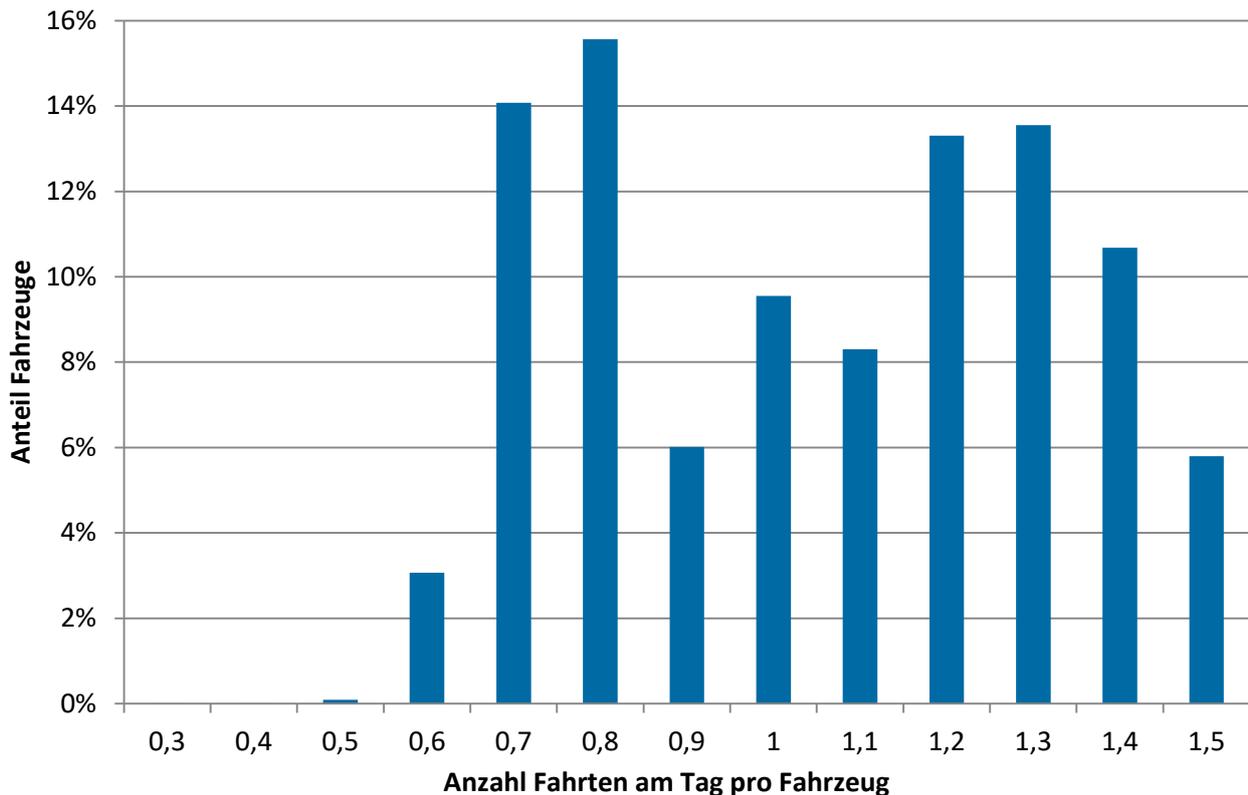
Um die Daten der verkehrlichen Analysen (Fahrten) für die Modellierung nutzen zu können (Nutzerprofile), müssen die Einzelfahrten des Datensatzes den Nutzerprofilen zugeordnet werden, was weitere Annahmen notwendig macht. Da die verkehrlichen Analysen eine Bandbreite von kurzen bis langen Fahrten enthalten, wurde eine Zuordnung der Fahrten zu Nutzern getroffen, die annimmt, dass kürzere Fahrten von Nutzern mit niedrigeren Jahresfahrleistungen geleistet werden und längere Fahrten von Nutzern mit höheren Jahresfahrleistungen. Dabei wurden zum Teil mehrere Fahrten einem Nutzer zugeordnet, damit die jeweilige Jahresfahrleistung des Nutzers erreicht wird. Bei der Zuordnung wurden Standzeiten durch Be- und Entladen sowie die gültigen Tageslenkzeiten beachtet. Es wird dabei vereinfacht davon ausgegangen, dass sich die zugeordneten Fahrten über das Jahr hinweg nicht ändern. Das stellt vermutlich eine „best case“-Annahme dar, denn es wird also implizit angenommen, dass die O-Lkw auch optimiert auf dem Oberleitungs-Netz und nicht auf alternativen Routen ohne Oberleitung eingesetzt werden. Es wird zudem davon ausgegangen, dass sich die typischen Jahresfahrleistungen der Fahrzeuge im Zeitverlauf nicht verändern. Aus der Zuordnung ergeben sich durchschnittliche Tagesfahrleistungen und eine Verteilung der Anzahl Fahrten pro Fahrzeug.

In Abbildung 8-3 ist die Verteilung der Fahrten beispielhaft für das O-Kernnetz (4.242 km) aufgezeigt.

**Abbildung 8-3: Verteilung der Fahrten über den elektrischen Fahranteil je Jahresfahrleistungskategorie für das Kernnetz der Oberleitungsinfrastruktur**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 8-4: Verteilung der Anzahl Fahrten am Tag pro Fahrzeug/Nutzer im O-Kernetz**

Quelle: eigene Darstellung

Für einen spezifischen Netzausbauzustand und eine spezifische Jahresfahrleistungskategorie kann die Verteilung von elektrischem Fahranteil und Reichweitenanforderung über die Einsatzprofile mit Oberleitungsbezug als eine Matrix dargestellt werden (Tabelle 8-4). Dabei wird ersichtlich, dass die Profile mit geringer elektrischer Fahrleistung eine hohe Anforderung an die Reichweite im Vor- und Nachlauf aufweisen, während für die Profile mit hohem elektrischem Fahranteil das Gegenteil gilt.

**Tabelle 8-4: Verteilung der Nutzerprofile auf den elektrischen Fahranteil und die Anforderung an die elektrische Reichweite (für das Kernnetz und die Jahresfahrleistungskategorie 120.000 km)**

Elektrischer Fahranteil	Reichweitenanforderung (Vor-/Nachlauf)				gesamt
	100 km	200 km	400 km	>400 km	
bis 10 %	0 %	0 %	0 %	0,04 %	0,04 %
bis 20 %	0 %	0 %	0 %	1,82 %	1,82 %
bis 30 %	0 %	0 %	0,14 %	4,60 %	4,74 %
bis 40 %	0 %	0,06 %	1,50 %	5,16 %	6,72 %
bis 50 %	0 %	1,96 %	4,85 %	4,80 %	11,61 %
bis 60 %	0,62 %	5,60 %	6,21 %	1,15 %	13,57 %
bis 70 %	6,25 %	5,91 %	1,77 %	0 %	13,94 %

Elektrischer Fahranteil	Reichweitenanforderung (Vor-/Nachlauf)				gesamt
	100 km	200 km	400 km	>400 km	
bis 80 %	12,24 %	3,35 %	0,14 %	0 %	15,74 %
bis 85 %	8,45 %	0,45 %	0 %	0 %	8,90 %
bis 90 %	9,04 %	0,01 %	0 %	0 %	9,06 %
bis 95 %	9,23 %	0 %	0 %	0 %	9,23 %
bis 100 %	4,63 %	0 %	0 %	0 %	4,63 %
<b>gesamt</b>	<b>50,47 %</b>	<b>17,34 %</b>	<b>14,61 %</b>	<b>17,58 %</b>	<b>100 %</b>

Quelle: eigene Darstellung

Dieses Vorgehen wird für die verfügbaren Netzzustände durchgeführt. Insgesamt ergibt sich für jeden Netzzustand eine Matrix, die beschreibt, welcher Anteil der Fahrzeugkäufer mit der jeweiligen Jahresfahrleistung in ihrer TCO-Berechnung von welcher Mindestreichweite (für die Variante O-BEV) sowie von welchem Fahrleistungsanteil auf dem O-Netz ausgeht.

Die in Tabelle 8-4 dargestellte Verteilung der Nutzerprofile bezieht sich auf Lkw-Einsatzprofile mit Kontakt zum Oberleitungsnetz. Diese machen rund 50 % aller Einsatzprofile von Last- und Sattelzügen aus.

### Entwicklung des O-Netzes und Interpolation zwischen Netzzuständen

Um jahresgenaue Aussagen abzuleiten, wird zwischen den Netzzuständen (siehe 6.3) interpoliert. Hierzu werden die Netzzustände Jahren zugeordnet, sodass sich je Jahr eine spezifische und auf den Netzhochlauf angepasste Verteilung der Nutzerprofile und ihrer Attribute ergibt. Hieraus leitet sich die Zubaurate an elektrifizierten Kilometern ab (Tabelle 8-5). Die Interpolation erfolgt anhand der Streckenlänge des Netzes. Als Zwischenausbauzustand wurde die Variante „Teilnetz“ ausgewählt, da sie im Vergleich zur Variante „Achse“ bei gleicher Streckenlänge ein größeres Fahrtenpotenzial aufweist.

Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen werden in Ergänzung die Wirkung eines gegenüber dieses „Basisfalls“ um 5 Jahre beschleunigten sowie eines langsameren Netzausbaus untersucht (siehe Abschnitt 8.3.7).

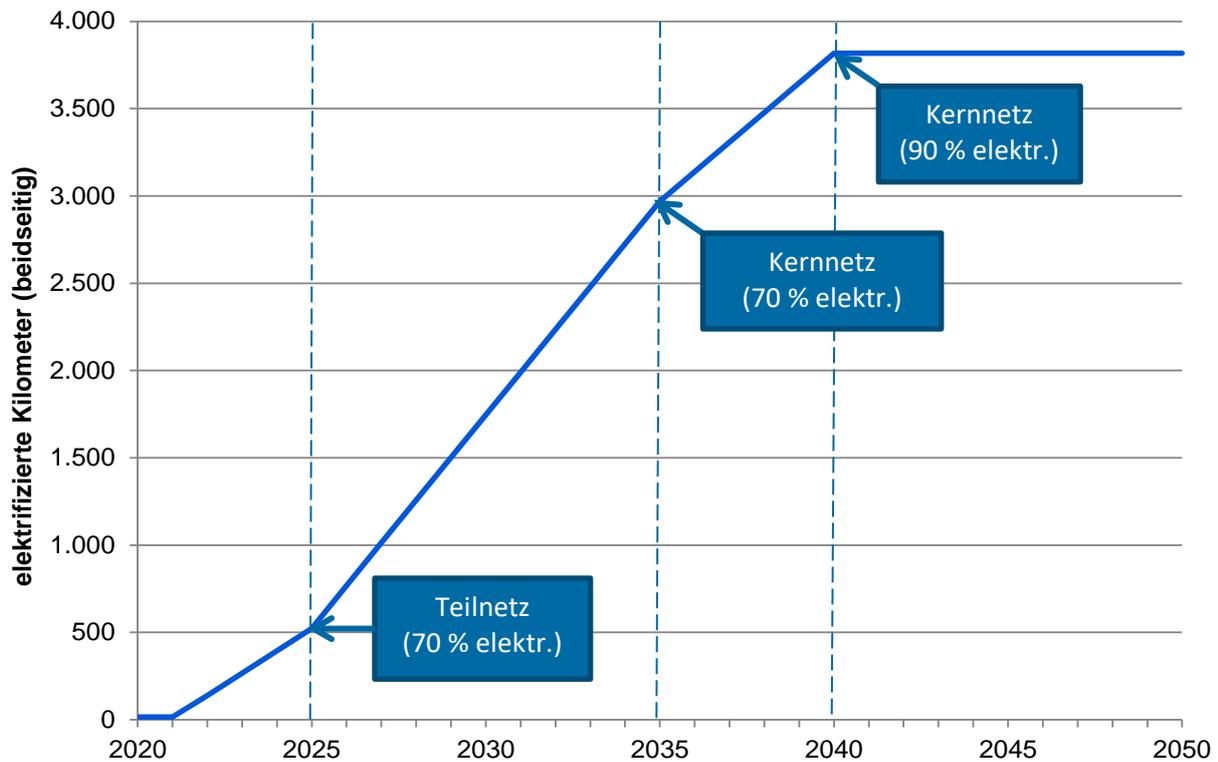
**Tabelle 8-5 : Zeitliche Zuordnung der Netzausbaustufen**

	Pilotstrecken	Teilnetz	Kernnetz (70 % elektrifiziert)	Kernnetz (90 % elektrifiziert)
Streckenlänge	18 km	747 km	4.242 km	4.242 km
Jahr	2020	2025	2035	2040
Elektrifizierungsgrad	100 %	70 %	70 %	90 %
elektrifizierte km (beidseitig)	18	523	2969	3818
Zubau (km/Jahr)		128	245	170

Quelle: eigene Darstellung

Die Fahrzeugkäufer treffen ihre Kaufentscheidung im Modell anhand des in diesem Jahr zur Verfügung stehenden Netzzustandes und beziehen keine Erwartungen über den zukünftigen Netzausbau in ihre Kaufentscheidung mit ein. In Abbildung 8-5 ist der Hochlauf der elektrifizierten Kilometer im Ausgangsszenario dargestellt. In Sensitivitätsanalysen wird zudem der Einfluss eines ambitionierteren sowie langsameren Netzausbaus auf den Markthochlauf der O-Lkw untersucht.

**Abbildung 8-5 : Hochlauf der elektrifizierten Kilometer im Ausgangsszenario**



Quelle: eigene Darstellung

Ist das Oberleitungsnetz zum Kernnetz ausgebaut, verlaufen rund die Hälfte aller Fahrten von Sattelzugmaschinen in Deutschland zumindest teilweise unter der Oberleitung. Die andere Hälfte der Fahrten berührt das O-Netz hingegen nicht. Für diese Fahrten kommen bei der Markthochlaufmodellierung grundsätzlich nur Diesel-Lkw zum Einsatz.

### TCO Berechnung und Ermittlung der Neuzulassungsstruktur

Die Berechnung der antriebsspezifischen Total-Cost-of-Ownership ist die Grundlage für die Modellierung der Neuzulassungsstruktur. Für jedes Nutzerprofil wird für jedes Jahr eine spezifische TCO-Amortisation durchgeführt, welche Diskontierung, Abschreibung nach AfA sowie Unternehmenssteuereffekte berücksichtigt. Die Amortisation berücksichtigt folgende Kostenkomponenten:

- Anschaffungskosten (inkl. Restwert)
- Kfz-Steuer
- Wartungskosten
- Energiekosten
- Maut.

Nicht berücksichtigt werden antriebsunabhängige Fixkosten und Personalkosten, da sie auf den Kostenvergleich verschiedener Antriebstechnologien keinen Einfluss haben. Die Kostenkalkulation folgt für jede Kostenkomponente  $x$  und den Amortisationszeitraum  $j$  folgender Formel:

$$TCO_x = \sum_{i=1}^j \frac{\text{jährliche Kosten}_x}{(1 + \text{Zinssatz})^i}$$

Dabei wird ein Zinssatz von 5 % zu Grunde gelegt. Jeder Fahrzeughalter wählt im folgenden Schritt das Fahrzeug mit dem Antrieb aus, welches über die Haltedauer die geringsten Kosten erzeugt. Über den profilspezifischen Gewichtungsfaktor wird dann die Neuzulassungsstruktur abgeleitet.

## Fahrzeugpreise

Für Last- und Sattelzüge basieren die Fahrzeugpreise für Dieselfahrzeuge auf den Kostenkurven aus dem Impact Assessment zum Gesetzentwurf der EU-Kommission zu CO<sub>2</sub>-Grenzwerten von schweren Nutzfahrzeugen (European Commission 2018). Die Fahrzeugpreise sind abhängig vom Jahr der Anschaffung und der Effizienz des Fahrzeugs. Sie setzen sich zusammen aus einem Basispreis (Referenzfahrzeug) sowie den Mehrkosten für die entsprechenden Effizienztechnologien. Für die alternativen elektrischen Antriebe der Last- und Sattelzüge orientieren sich die Kosten an den Annahmen im StratON-Technologiebericht (Kühnel et al. 2018). Sie werden als Zusatzkosten auf Basis eines jeweils aktuellen Dieselfahrzeugs implementiert. Dabei werden Effizienztechnologien, welche nicht auf den Antrieb wirken (z. B. Reduktion Luft- oder Rollwiderstand) auch bei den Fahrzeugen mit alternativen Antrieben eingesetzt. Bis zum Jahr 2030 wird angenommen, dass die Technologiemehrkosten für die alternativen Antriebe aufgrund von technischem Fortschritt und Skaleneffekten abnehmen. Ab 2030 wurde zunächst keine weitere Kostendegression (jenseits der Batteriekosten, die bis 2050 weiter sinken) angenommen.

Die Batteriekosten der O-BEV werden separat über die im Modell hinterlegten Batteriekosten auf Basis der Annahmen des Projektionsberichts 2019 (BMU 2019) errechnet (Tabelle 8-7). Daher entstehen leichte Abweichungen gegenüber dem StratON-Technologiebericht, welche vor allem die Fahrzeuge mit großen Batterien betreffen. Die Fahrzeugpreise in den Szenarien sind abhängig von der Effizienzentwicklung. In Tabelle 8-6 sind die Fahrzeugpreise für "typische" Fahrzeugkonfigurationen und Anschaffungsjahre dargestellt.

**Tabelle 8-6: Fahrzeugpreise (ohne MwSt.) und Energieverbrauch im Vergleich**

	2025		2030	
	Energieverbrauch (MJ/km)	Fahrzeugpreis (€ <sub>010</sub> )	Energieverbrauch (MJ/km)	Fahrzeugpreis (€ <sub>010</sub> )
Diesel	9,5	101.322	7,9	110.020
O-HEV	8,3	145.665	6,7	143.853
O-BEV 100	5,5	125.115	5,1	116.200
O-BEV 200	5,5	150.039	5,1	137.876

Quelle: eigene Darstellung

**Tabelle 8-7: Entwicklung des Batteriepreises**

Batteriepreis (€ <sub>2010</sub> /kWh)	
2020	159
2030	100
2040	90
2050	78

Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Annahmen des Projektionsberichts 2019 (BMU 2019)

### Anschaffungskosten

Die Anschaffungskosten errechnen sich wie folgt:

$$\text{Anschaffungskosten} = \text{Fahrzeugpreis} - \text{Restwert} + \text{Steuerersparnis durch Abschreibung}$$

Da die Restwertentwicklung für die alternativen Antriebe unsicher abzuschätzen ist, wird angenommen, dass der relative Restwert für alle Fahrzeuge 15,2 % beträgt (Zimmer et al. 2016). Der zugrunde gelegte Unternehmenssteuersatz beträgt 30 %.

### Wartungskosten

Die Wartungskosten basieren auf Wietschel et al. (2017). Sie beinhalten Reparaturkosten, Reifenkosten sowie weitere variable Kosten wie Adblue. Die Abschreibung von Ersatzbatterien ist in den Wartungskosten enthalten. Gegenüber dem StratON-Technologiebericht ergeben sich daher Unterschiede bei den elektrischen Antrieben. Die Wartungskosten der O-Lkw liegen unter denen des Dieselmotors, denn die Wartungskosten für das Stromabnehmersystem fallen niedriger aus als die Einsparungen durch den fehlenden Dieselmotor (O-BEV) oder die reduzierte Laufleistung des Dieselmotors (O-HEV).

**Tabelle 8-8: Wartungskosten**

Wartungskosten € <sub>2010</sub> /km	
Diesel	0,141
O-HEV	0,130
O-BEV	0,122

Quelle: eigene Darstellung basierend auf Wietschel et al. (2017)

### Energiepreise

Eine Prognose der **Stromkosten** für O-Lkw ist mit Unsicherheiten behaftet. Einfluss hat zum Beispiel die Frage, wer das Netz betreiben wird, wie groß das Netz ist und wie groß die Nachfrage nach Oberleitungsstrom tatsächlich sein wird. Als Abschätzung wurde die Annahme getroffen, dass O-Lkw-Nutzer für den Strombezug via Oberleitung 60 % des Haushaltsstrompreises zahlen. Dem liegen typische Preise für einen angenommenen Jahresverbrauch von etwa 160.000 bis 20 Mio. kWh bei einer mittelspannungsseitigen Versorgung zugrunde (Abnahme 100 kW/1.600 h bis 4.000 kW/5.000 h). Ferner wird angenommen, dass die Stromsteuer von derzeit 2,05 ct/kWh auf das europäische Mindestniveau von 0,1 ct/kWh gesenkt wird. Der Strompreis liegt auf Basis dieser

Annahmen im Jahr 2030 bei 13,0 ct/kWh und damit 1,65 ct/kWh über der Strompreisannahme des StratON-Technologieberichts, welche nach Diskussion im Beirat als vergleichsweise niedrig eingestuft wurde. Da die Prognose eines Strompreises für das Überleitungsnetz mit Unsicherheiten behaftet ist, wird zusätzlich ein weiter erhöhter Strompreis von 80 % des Haushaltsstrompreises als Sensitivität betrachtet.

Die Entwicklung des **Dieselpreises** basiert auf dem Rohölpreis, welcher aus der Verkehrsverflechtungsprognose übernommen wird und folglich auf 120 \$ je Barrel in 2030 steigt. Dies entspricht einem Anstieg um 52 % zwischen 2018 und 2030. Es wird eine nominal konstante Dieselsteuer hinterlegt bei einer Inflationsrate von 1 %. Auch der Rohölpreis wird als Sensitivität variiert. Eine Übersicht über die Strompreise verschiedener Abnehmer sowie dem Dieselpreis findet sich in Tabelle 8-9.

**Tabelle 8-9: Diesel- und Strompreise in ct<sub>2010</sub>/kWh (ohne Mehrwertsteuer)**

	Diesel	Strom an der Oberleitung	Zum Vergleich: Bahnstrom	Zum Vergleich: Haushaltsstrom
2015	8,5	n.a.	12,1	22,2
2020	9,7	13,4	12,6	22,4
2025	10,4	13,6	13,1	22,6
2030	11,1	13,0	13,7	21,7
2040	11,4	13,0	13,6	21,7
2050	11,8	13,0	13,5	21,7

Quelle: eigene Darstellung basierend auf Schubert et al. (2014) und dem StratON Technologiebericht

## Lkw-Maut

In den Szenariorechnungen wurde ab 2019 der gesetzlich gültige Mautsatz von 18,7 ct/km für Fahrzeuge der Schadstoffklasse Euro VI als Basis verwendet (entspricht in realen Preisen von 2010 16,7 ct<sub>2010</sub>/km). Mögliche weitere Erhöhungen der Mautgebühr wurden nicht angenommen. Wirkungen einer veränderten Lkw-Maut werden bei den Szenarioanalysen in verschiedenen Ausgestaltungen untersucht - wie zum Beispiel in Kombination mit einer CO<sub>2</sub>-Komponente oder einer Mautbefreiung für Fahrzeuge im elektrischen Antriebsmodus.

### 8.2.3. Ermittlung von Fahrzeugbestand, Endenergiebedarf und THG-Emissionen

#### Verkehrsnachfrage

Bis 2030 wird die Gesamtfahrleistung der Verkehrsverflechtungsprognose (Schubert et al. 2014) als Grundlage genutzt, danach wird ein leichter Anstieg fortgeschrieben (Tabelle 8-10). Bei einer Reduktion der Transportkosten durch zunehmende Elektrifizierung kann es zu einer Zunahme der Fahrleistungen kommen (Rebound); dies gilt ebenso andersherum bei höheren Transportkosten zu verbesserter Auslastung und Routenplanung. Zu der Wirkung dieses Effekts werden Abschätzungen vorgenommen unter Verwendung einer Transportkostenelastizität von -0,6 (siehe auch 8.4.5).

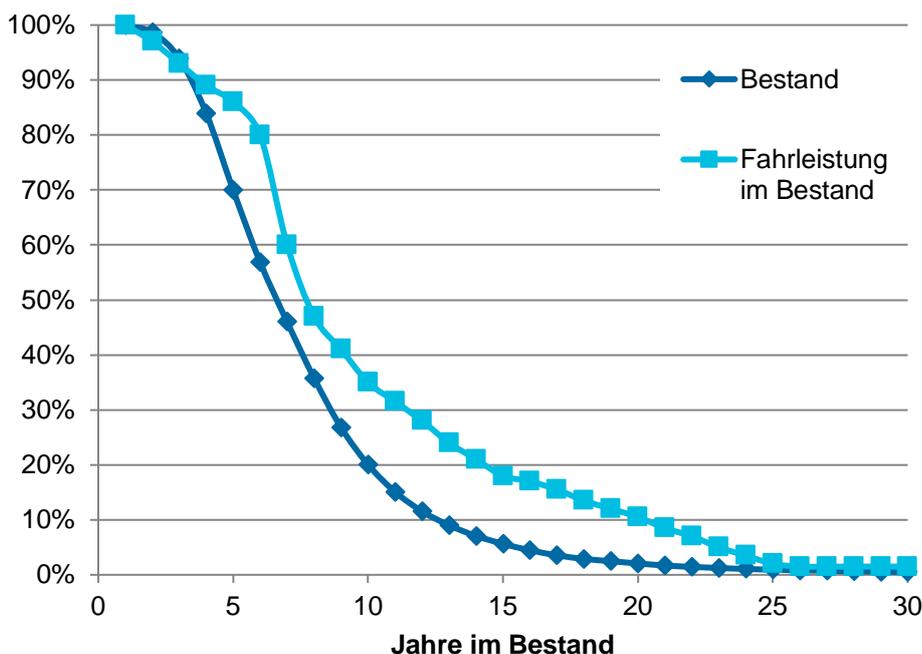
**Tabelle 8-10: Fahrleistung und Transportleistung von Last- und Sattelzugmaschinen**

	2015	2020	2030	2040	2050
Fahrleistung (Mrd. km)	38,6	42,2	48,1	51,9	55,3
Transportleistung (Mrd. tkm)	421,2	471,6	523,0	564,1	600,6

Quelle: eigene Darstellung basierend auf Schubert et al. (2014), Fortschreibung ab 2030

### Fahrzeugbestand

Auf Basis der jährlichen Neuzulassungsstruktur wird über altersabhängige Überlebenskurven der Fahrzeuge der Fahrzeugbestand abgeleitet. Der Anteil der ausscheidenden Lkw wird entsprechend der Neuzulassungsstruktur im jeweiligen Jahr ersetzt, der Fahrzeugbestand wird an steigende Fahrleistungen angepasst. Die Überlebenskurven von Sattelzugmaschinen werden aus dem Modell TREMOD übernommen (siehe Abbildung 8-6).

**Abbildung 8-6: Abnahme der Fahrleistung (Fahrzeuge im Bestand) und Abnahme des Bestands**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis TREMOD

### Endenergiebedarf und THG-Emissionen

Der Gesamtenergiebedarf errechnet sich aus dem spezifischen Energieverbrauch der Fahrzeuge multipliziert mit der jeweiligen Fahrleistung. Dabei wird der Energieverbrauch differenziert nach Fahrmodus erhoben. Die dabei entstehenden THG-Emissionen errechnen sich durch Multiplikation mit den entsprechenden Emissionsfaktoren, differenziert nach well-to-wheel (WTW) und tank-to-wheel (TTW). Die direkten THG-Minderungen (TTW) entsprechen der Inventarlogik und der Abgrenzung im Klimaschutzplan. Sie ergeben sich aus dem CO<sub>2</sub>-Gehalt des Kraftstoffs und Strom wird mit Nullemissionen bilanziert. Für die WTW-Emissionen wird die Vorkette der Stromerzeugung und der

Kraftstoffherstellung berücksichtigt. Für die Stromerzeugung wird ein Kohleausstieg bis 2038 gemäß der Empfehlung der „Kohlekommission“ angenommen und der deutsche Strommix hinterlegt (eigene Berechnung; Wert für 2050 aus „eMobil 2050“).

**Tabelle 8-11: WTW-Emissionsfaktoren für Strom und Diesel in gCO<sub>2</sub>/kWh**

	2020	2030	2040	2050
Strom (basierend auf Kohleausstieg bis 2038)	428	275	174	73
Diesel	248	243	243	243

Quelle: Eigene Berechnung; Wert für 2050 aus eMobil 2050 (Referenzlauf)

#### 8.2.4. Einordnung der für die Modellierung getroffenen Prämissen und Annahmen

Jedes Modell stellt eine Abstraktion der Realität dar. Auch bei der Modellierung des Markthochlaufs in StratON ergeben sich einige grundsätzliche Prämissen, welche eine Vereinfachung der Realität darstellen oder sich aus der Verfügbarkeit von Daten bzw. dem Projektaufbau ergeben. Wesentliche Prämissen und Annahmen für die Modellierung sind:

- Die Struktur der Nutzerprofile bleibt über die Zeit unverändert. Es wird keine Verlagerung auf elektrifizierte Strecken (z. B.: von der Schiene auf die Straße oder durch andere Routenwahl) abgebildet.
- Die Fahrtenanalyse der Oberleitungsverkehre (siehe Kapitel 6.3) gilt nur für Fahrten ab 100 km Hauptlauf (definiert als Strecke auf dem Oberleitungsnetz) und berücksichtigt daher keine kurzen Fahrten bzw. Regionalverkehre. Das Potenzial für O-Lkw wird dadurch tendenziell unterschätzt.
- Die modellierte Nachfrage nach Fahrzeugen hat keinen Einfluss auf die Angebotspreise der Fahrzeuge. Es wird für alternative Antriebe jedoch eine Kostendegression im Zeitverlauf angenommen.
- Die Fahrzeugrestwerte als Komponente der TCO-Berechnung werden für alle Antriebsoptionen mit der gleichen prozentualen Wertminderung über die Zeit abgebildet. Es handelt sich um eine Setzung, da bisher keine ausreichenden empirischen Belege für die tatsächliche Wertentwicklung von Lkw mit alternativen Antrieben vorliegen bzw. diese voraussichtlich maßgeblich von der Entwicklung des Umfelds abhängig sein werden und kaum prognostiziert werden können.
- Es wird davon ausgegangen, dass sich die typischen durchschnittlichen Jahresfahrleistungen der Fahrzeuge im Zeitverlauf nicht verändern. Dies könnte bei autonomen Fahrzeugen jedoch perspektivisch der Fall sein, wenn die Ruhezeiten der Fahrer ihre Bedeutung verlieren.
- Die Ableitung der Neuzulassungsstruktur anhand der günstigsten TCO basiert auf der Annahme von ökonomisch rationalen Entscheidern und bildet keine subjektiven Entscheidungsmomente ab, wie Markentreue, Informationsungleichgewichte etc.
- Es wird kein ökonomisch relevanter Nutzlastverlust bei O-Lkw unterstellt. Es wird die Annahme getroffen, dass entweder technische Lösungen oder regulatorische Maßnahmen ermöglichen, dass es zu keinem Nutzlastverlust kommt.
- Es wird keine Mehrpreisbereitschaft für CO<sub>2</sub>-freie Transporte unterstellt.

- Zukünftige Erwartungen an den Netzausbau sind kein Bestandteil der Kaufentscheidung der Lkw-Nutzer.
- Die Bilanzgrenze der Analysen ist Deutschland (Fahrzeugbestand Inländer, Fahrleistungen Inland). Fahrten, die außerhalb Deutschlands beginnen oder/und enden, sind jedoch in Bezug auf den inländischen Anteil berücksichtigt.
- Die Auslastung und Leistungsfähigkeit der Oberleitung kann das Aufladen beschränken, vor allem, wenn viele O-Lkw im Netz gleichzeitig unterwegs sind. Dies beschränkt den Lade-strom, sodass ein Lkw möglicherweise während einer kurzen Fahrt unter der Oberleitung seine Batterie nicht komplett aufladen kann.

Wesentliche Prämissen wurden mit dem Projektbeirat diskutiert. So sprach sich der Beirat beispielsweise dafür aus, weder einen (langfristigen) Nutzlastverlust, noch eine Mehrpreisbereitschaft für CO<sub>2</sub>-freie Transporte anzunehmen.

### 8.3. Szenarien und Sensitivitäten zum Markthochlauf von O-Lkw

#### 8.3.1. Ziel und Vorgehensweise

Ziel der Markthochlaufmodellierung ist es, die möglichen Markthochläufe von O-Lkw unter verschiedenen Rahmenbedingungen abzubilden und Aussagen zum Einfluss von Rahmenbedingungen auf den Markthochlauf abzuleiten.

Dafür wurde zunächst ein „Ausgangsszenario“ definiert. Das Ausgangsszenario (M0) soll einen Vergleichsrahmen bieten und orientiert sich an heutigen Rahmenbedingungen und mittleren Preisprognosen. In diesem Szenario wird aber bereits der Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur hinterlegt. Ausgehend von dem Szenario M0 werden verschiedene Rahmenbedingungen und Annahmen variiert. Zur Einordnung dient zusätzlich ein „Dieselszenario“, in welchem kein Oberleitungsnetz zur Verfügung steht, welches aber ansonsten M0 gleicht.

Ausgehend von dem Ausgangsszenario M0 wird in den folgenden Unterkapiteln der Einfluss folgender Rahmenbedingungen und Annahmen auf TCO, Neuzulassungen, und elektrische Fahrleistungen untersucht:

- Amortisationszeiten
- Lkw-Maut und CO<sub>2</sub>-Preise
- Attraktivität von O-BEV (Anschaffungspreise, Nachlademöglichkeiten)
- Energiepreise
- Geschwindigkeit des Netzausbaus
- Wechselwirkung mit den EU-Standards.

Eine Übersicht über alle Szenarien findet sich am Ende des Kapitels in Abschnitt 8.4.1. Die Wirkungen auf Energiebedarf und THG-Emissionen folgen im Anschluss in Kapitel 8.4.

### 8.3.2. Ausgangsszenario mit Aufbau eines Oberleitungsnetzes (M0)

#### Einleitung und Annahmen

Das Ausgangsszenario M0 soll einen Vergleichsrahmen bieten und orientiert sich an heutigen Rahmenbedingungen und mittleren Preisprognosen. In diesem Szenario wird bereits der Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur hinterlegt.

Die folgende Tabelle 8-12 gibt einen Überblick über die im Ausgangsszenario M0 getroffenen Annahmen; eine detailliertere Darstellung dazu findet sich in Kapitel 8.2. Für die Effizienzsteigerung von Diesel-Fahrzeugen wird eine Reduktion um 27 % zwischen 2019 und 2030 auf Basis der EU-CO<sub>2</sub>-Standards für Lkw angenommen (diese sehen eine 30 %ige Reduktion vor, allerdings können beispielsweise auch E-Busse auf die Ziele angerechnet werden). Mögliche zusätzliche Potenziale durch den Regionalverkehr und andere Fernverkehre mit weniger als 100 km auf der Auswahlstrecke wurden hingegen nicht betrachtet, könnten aber ein zusätzliches Potenzial für die Elektrifizierung darstellen (siehe Abschnitt 8.4.2).

**Tabelle 8-12: Szenario M0**

Parameter	Ausgestaltung
Strompreis	60 % des Haushaltsstrompreises
Dieselpreis	1,10 € <sub>2010</sub> /Liter in 2030 und 1,17 € <sub>2010</sub> /Liter in 2050
Mautbefreiung O-Lkw	Keine: O-Lkw zahlen heutigen Kostensatz von 18,7 ct/km (Euro VI)
Effizienz Diesel-Lkw	Minderung des Kraftstoffverbrauchs um 27 % bei den Neuzulassungen zwischen 2019 und 2030
Netzausbau (elektrifizierte km)	2025: 523 km (Teilnetz); 2035: 2.969 km; 2040: 3.818 km (Kernnetz)
Amortisationszeitraum	1-5 Jahre (je 20 % der Fahrzeuge)
Fahrzeugpreise Lkw (2025)	Diesel 101.000 € <sub>2010</sub> ; O-HEV 146.000 € <sub>2010</sub> ; O-BEV 100 125.000 € <sub>2010</sub> ; O-BEV 200 150.000 € <sub>2010</sub>
Nachlademöglichkeit O-BEV an Start-/Zielort	Keine

Quelle: eigene Darstellung

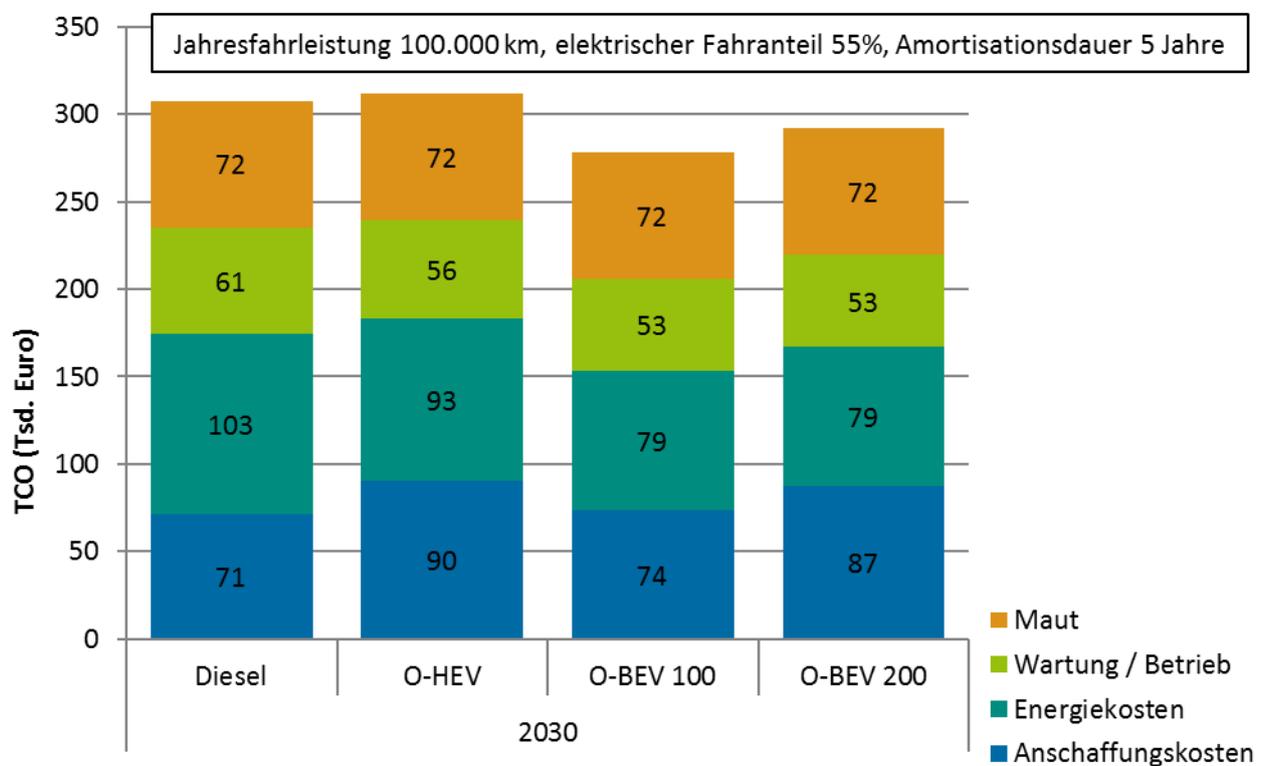
#### TCO-Vergleich

Wie in Kapitel 8.2.1 erläutert, sind die TCO-Kosten der Antriebsoptionen die Grundlage für die Neuzulassungswahl. Zur Illustration sind in Abbildung 8-7 die Kosten der modellierten Antriebe für ein beispielhaftes Nutzerprofil im Jahr 2030 dargestellt, welches folgendermaßen charakterisiert ist:

- Fahrleistung 100.000 km
- Elektrischer Fahranteil 55 %
- Amortisationszeitraum 5 Jahre.

Im Szenario M0 fällt der heutige Mautsatz für alle Antriebe gleichermaßen an. Die erhöhten Anschaffungskosten können beim O-HEV nicht durch die eingesparten Energie-, Wartungs- und Betriebskosten ausgeglichen werden und es ergeben sich insgesamt leicht höhere TCO als bei einem Dieselfahrzeug. Die TCO von O-BEV fallen jedoch für das betrachtete Nutzerprofil bereits im Jahr 2030 deutlich geringer aus. Zum einen liegen die Anschaffungskosten durch den eingesparten zweiten (Diesel-)Antriebsstrang geringer als beim O-HEV und zudem kann durch den batterieelektrischen Fahrmodus abseits der Oberleitung eine höhere elektrische Fahrleistung erreicht werden, was sich in niedrigeren Energiekosten niederschlägt. Zu beachten ist, dass die Kosten für die stationäre Ladeinfrastruktur (bei O-BEV) sowie die Kosten für die Oberleitungsinfrastruktur in den TCO-Kosten nicht enthalten sind.

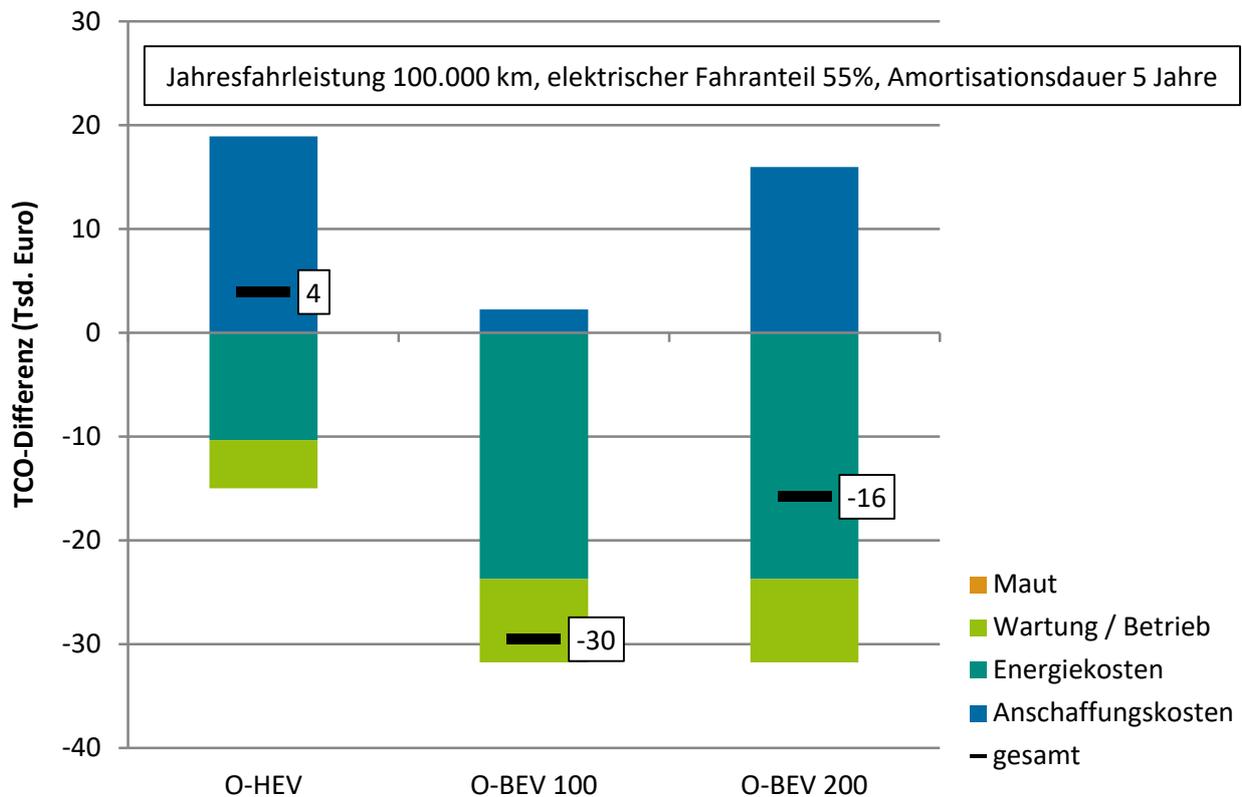
**Abbildung 8-7: Vergleich der TCO für ein beispielhaftes Nutzerprofil (siehe Abbildung) im Jahr 2030 (Szenario M0)**



Quelle: eigene Darstellung

Betrachtet man die Differenz der TCO (Abbildung 8-8), ergeben sich beim O-HEV um rund 4.000 € höhere Kosten gegenüber dem Dieselfahrzeug über den Nutzungszeitraum. Beim O-BEV 100 beträgt die Einsparung rund 30.000 €, beim O-BEV 200 16.000 €. Die Einsparung des O-BEV 200 fällt geringer aus, da die höhere Batteriekapazität sich in höheren Anschaffungskosten bemerkbar macht.

**Abbildung 8-8: Beispielhafte TCO-Differenz im Jahr 2030, 5 Jahre Amortisationsdauer (Szenario M0)**



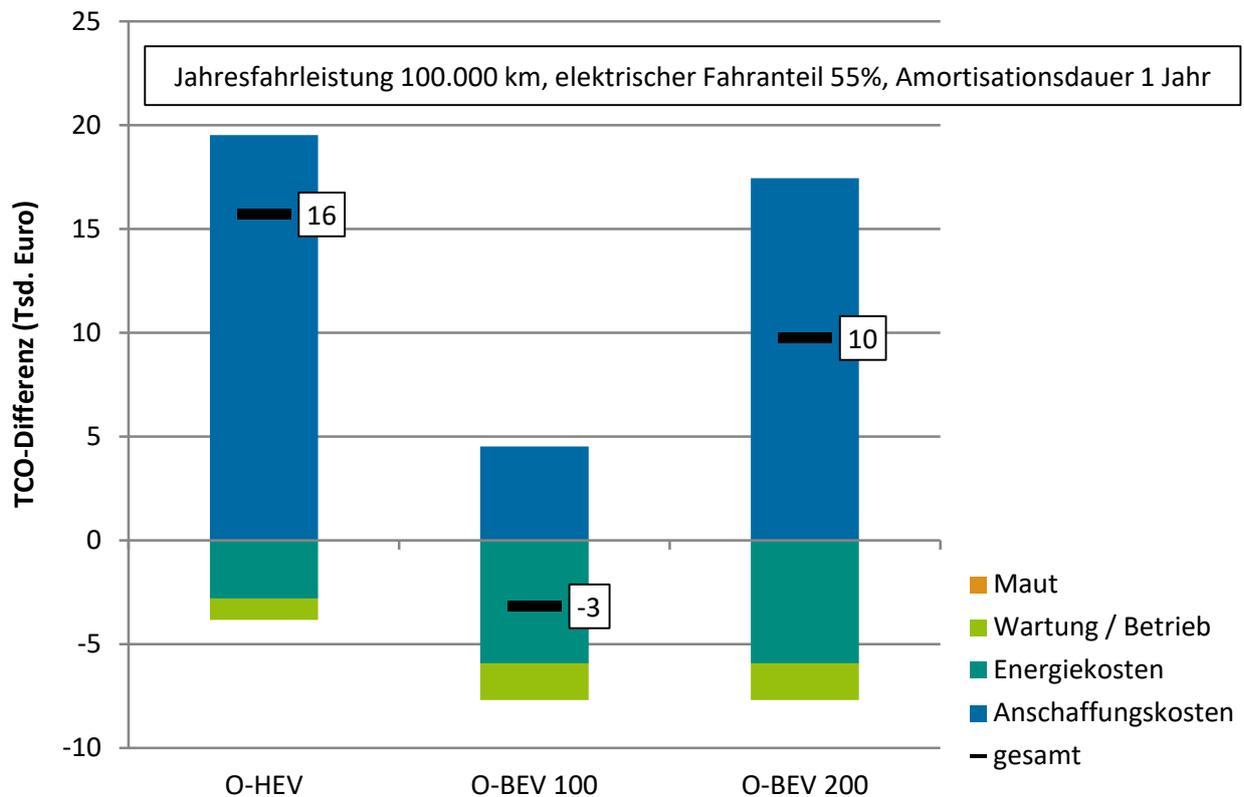
Quelle: eigene Darstellung

Betrachtet man das gleiche Nutzerprofil mit einem Amortisationszeitraum von nur einem Jahr (Abbildung 8-9), so zeigt sich ein verändertes Bild. Da die Fahrleistung in diesem Zeitraum geringer ausfällt, verschieben sich die Proportionen der Kostenblöcke. Die Anschaffungskosten dominieren und die Energie-, Wartungs- Betriebs- und Mautkosten fallen weniger ins Gewicht. Der Effizienzvorteil der O-Lkw kann so weniger stark die höheren Anschaffungskosten ausgleichen.

Dies führt dazu, dass der O-HEV nun höhere Differenzkosten von rund 16.000 € gegenüber dem Dieselfahrzeug aufweist. Der Kostenvorteil des O-BEV 100 sinkt auf lediglich rund 3.000 € und der O-BEV 200 erzeugt nun anstelle einer Einsparung höhere TCO im Rahmen von 10.000 €.

Hieraus wird ersichtlich, dass die Anforderung an die Amortisationszeit der Mehrinvestition für O-Lkw einen entscheidenden Einfluss auf die Attraktivität der Fahrzeuge hat. Da es keine gesicherten Daten über die in der Praxis tatsächlich angewandten Amortisationsmethoden der Lkw-Halter gibt, wird vereinfachend eine Gleichverteilung der Amortisationszeiträume zu je 20 % auf 1 bis 5 Jahre angenommen. Welche Auswirkungen diese Annahme auf die Ergebnisse hat, wird mittels einer Sensitivitätsanalyse im Abschnitt 8.3.3 dargestellt.

**Abbildung 8-9: Beispielhafte TCO-Differenz im Jahr 2030, 1 Jahre Amortisationsdauer (Szenario M0)**

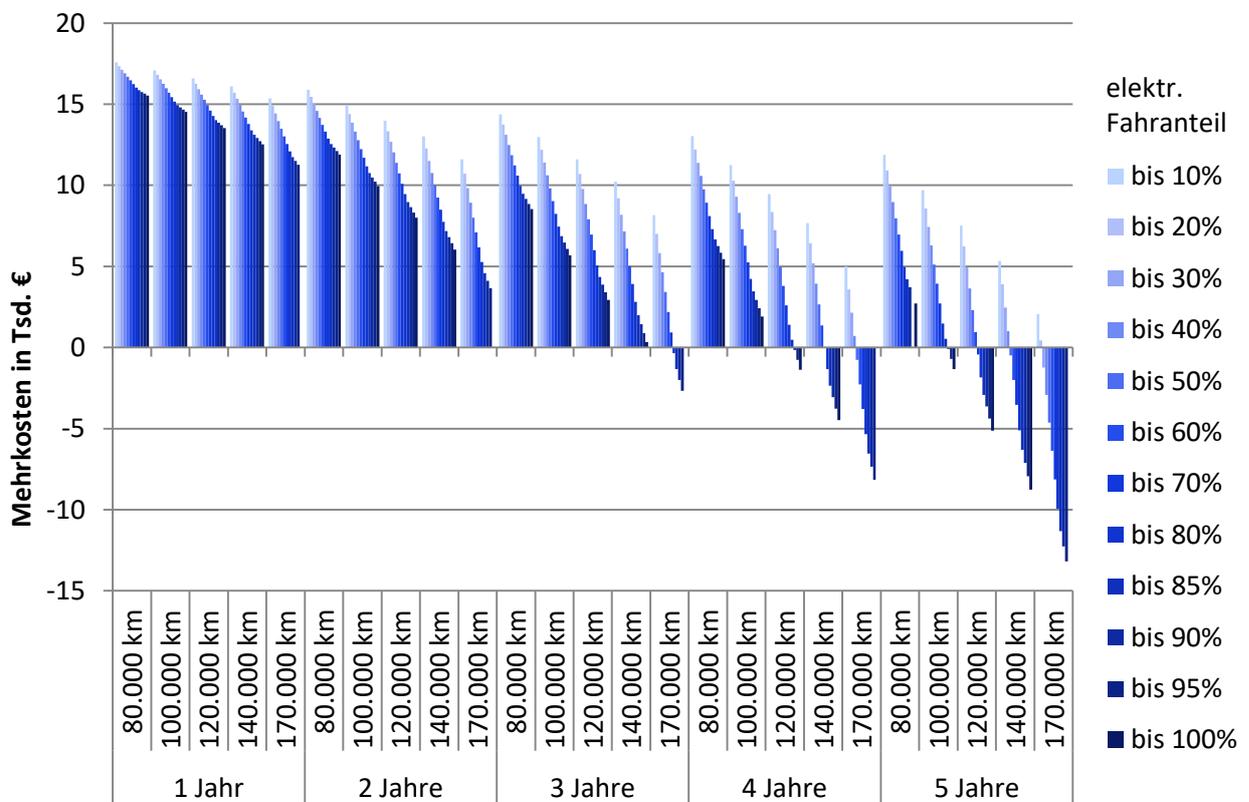


Quelle: eigene Darstellung

Die obigen Darstellungen sind als Beispiele zu verstehen; im Modell wird ein ganzes Spektrum unterschiedlicher Einsatzprofile abgebildet. Abbildung 8-10 zeigt die kumulierten TCO-Mehrkosten eines O-HEV gegenüber einem Diesel-Lkw für das gesamte (ungewichtete) Spektrum der untersuchten Nutzerprofile im Jahr 2030 des Szenarios M0. Negative Werte entsprechen einer Einsparung, d. h. der O-HEV besitzt für diese Profile einen TCO-Vorteil. Dabei wird der Einfluss der drei Parameter Jahresfahrleistung, Amortisationsdauer und elektrischer Fahranteil deutlich.

Die Mehrkosten eines O-HEV gegenüber einem Diesel-Lkw steigen mit sinkender Jahresfahrleistung, sinkender Amortisationszeit und sinkendem elektrischem Fahranteil. Die höchsten Einsparungen ergeben sich daher für Nutzer mit hoher Jahresfahrleistung von 170.000 km, einer Amortisationszeit von 5 Jahren und sehr hohem Fahranteil auf dem O-Netz; sie belaufen sich auf bis zu 13.000 Euro. Bei den Rahmenbedingungen des Szenarios M0 lohnen sich im Jahr 2030 für Nutzer mit einer Anforderung an die Amortisationszeit unter 3 Jahren noch keine O-HEV.

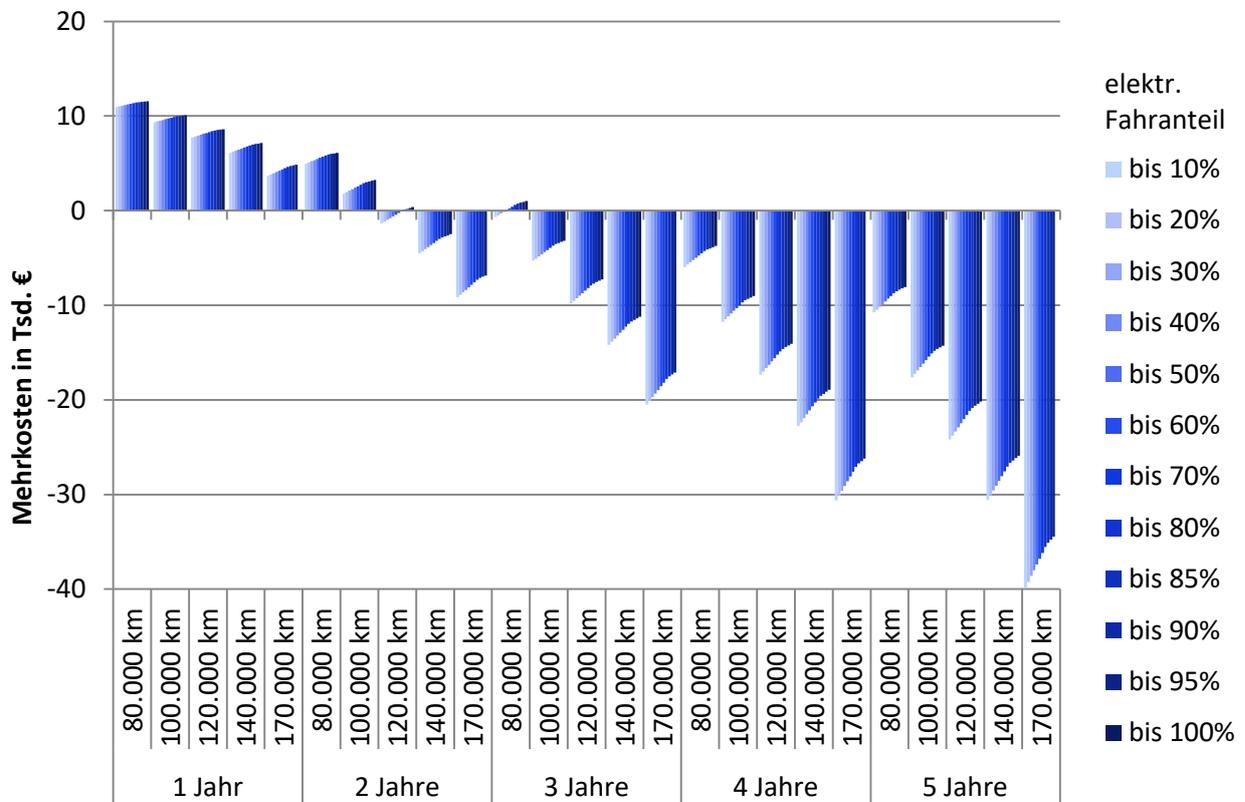
**Abbildung 8-10: TCO-Mehrkosten eines O-HEV gegenüber einem Dieselfahrzeug je nach Jahresfahrleistung, Amortisationszeit und elektrischem Fahranteil im Jahr 2030 (Szenario M0)**



Quelle: eigene Darstellung

Betrachtet man hingegen die TCO-Mehrkosten eines O-BEV 200 gegenüber einem Dieselfahrzeug, so zeigt sich ein anderes Bild (Abbildung 8-11). Der TCO-Vorteil ist deutlich ausgeprägter – es lohnt sich für nahezu alle Nutzerprofile ab 3 Jahren Amortisationszeit bereits die Anschaffung eines entsprechenden Fahrzeugs. Der Einfluss des elektrischen Fahranteils ist gegensätzlich zur Betrachtung des O-HEVs und fällt generell geringer aus. Grund ist der niedrigere Energieverbrauch im elektrischen Betrieb abseits der Oberleitung aufgrund des geringeren Luftwiderstands des Pantographen im eingeklappten Zustand.

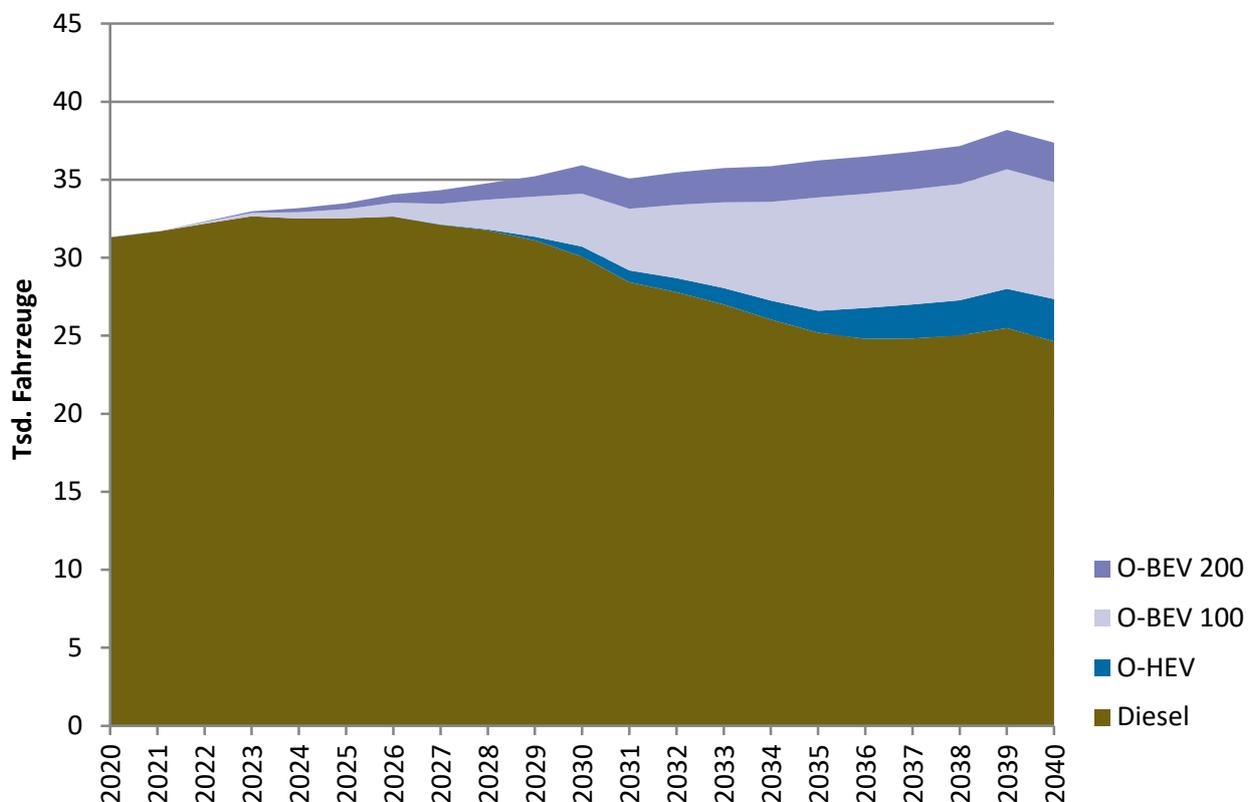
**Abbildung 8-11: TCO-Mehrkosten eines O-BEV 200 gegenüber einem Dieselfahrzeug je nach Jahresfahrleistung, Amortisationszeit und elektrischem Fahranteil im Jahr 2030 (Szenario M0)**



Quelle: eigene Darstellung

## Neuzulassungen

Für die Neuzulassungen der Last- und Sattelzugmaschinen ergibt sich folgender Verlauf der Neuzulassungen im Szenario M0 (Abbildung 8-12).

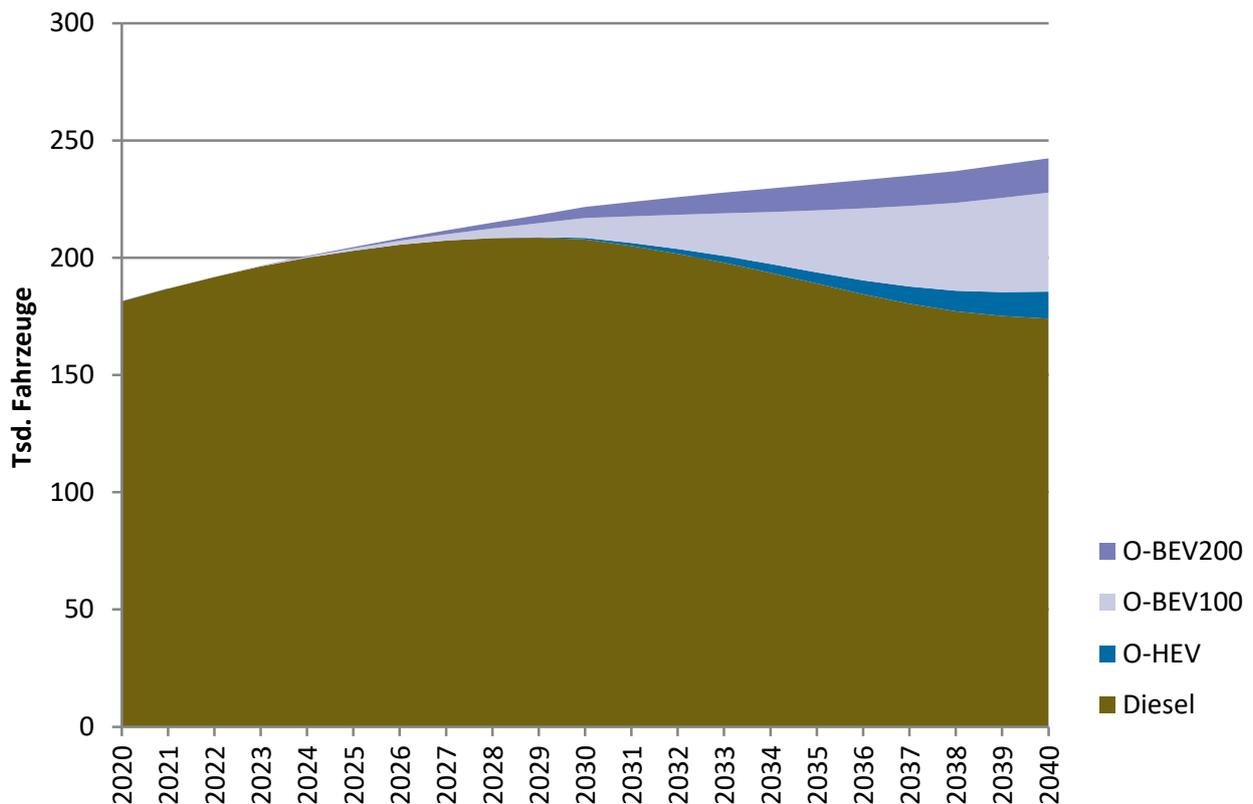
**Abbildung 8-12: Verlauf der Neuzulassungen von Last- und Sattelzügen (Szenario M0)**

Quelle: eigene Darstellung

Mit zunehmendem Netzausbau steigt im Szenario M0 die Anzahl der neu zugelassenen O-Lkw. O-Lkw erreichen im Jahr 2030 einen Anteil von rund 30 % an den gesamten Neuzulassungen von Last- und Sattelzügen. Danach steigt der Anteil weiter an auf rund 35 %. Dabei fällt auf, dass zunächst nur O-BEV zugelassen werden und O-HEV erst ab etwa 2028 und zu einem kleineren Anteil in den Markt gelangen. Grund hierfür ist der höhere Anschaffungspreis der O-HEV, der bei fehlenden regulatorischen Anreizen eine weitere Verbreitung verhindert. Dagegen erreichen O-BEV unter den getroffenen Annahmen schneller einen Kostenvorteil gegenüber Dieselfahrzeugen. Da die O-BEV auch gegenüber den O-HEV immer einen Kostenvorteil haben, werden sie entsprechend der getroffenen Annahmen für alle Profile, wo sie aufgrund der Reichweitenrestriktionen eingesetzt werden können, auch genutzt; sie „verdrängen“ die O-HEV. Der Einfluss der dadurch angenommenen hohen Attraktivität von O-BEV wird im Abschnitt 8.3.5 näher betrachtet.

### Fahrzeugbestand

Die Entwicklung des Fahrzeugbestands schwerer Lkw ist in Abbildung 8-13 dargestellt. Der Verlauf des Fahrzeugbestands hängt über die hinterlegten Überlebenskurven der Fahrzeuge mit dem Verlauf der Neuzulassungen zusammen. Annahmegemäß steigt der Fahrzeugbestand ebenso wie die Fahrleistung weiter an. Der Bestand an O-Lkw steigt in gleichem Ausmaß auf 14 Tsd. Fahrzeuge (6,3 %) in 2030 und 68 Tsd. Fahrzeuge (28,2 %) in 2040. Ab 2030 geht der Bestand an Diesel-Lkw zurück.

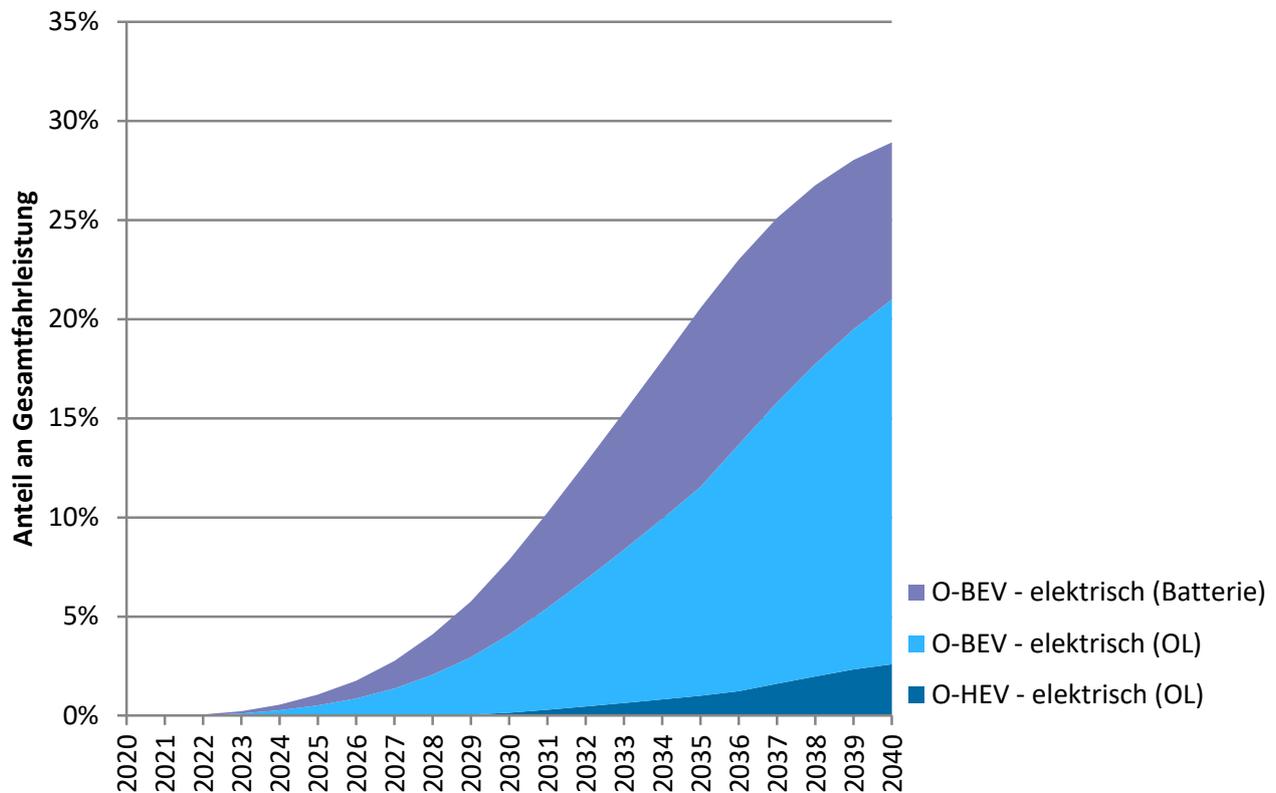
**Abbildung 8-13: Fahrzeugbestand an Last- und Sattelzügen (Szenario M0)**

Quelle: eigene Darstellung

### Elektrische Fahrleistungen

Durch den zunehmenden Netzausbau steigen die realisierten elektrischen Fahrleistungen stärker an als der Fahrzeugbestand (Abbildung 8-14). In 2030 werden 7,7 % der Gesamtfahrleistung elektrisch zurückgelegt (davon gut 50 % unter der Oberleitung). O-HEV leisten erst in den Jahren danach einen relevanten Beitrag zur elektrischen Fahrleistung. Im Jahr 2040 werden insgesamt 29 % der Gesamtfahrleistung elektrisch zurückgelegt (davon knapp 75 % unter der Oberleitung).

**Abbildung 8-14: Anteil elektrischer Fahrleistung von Last- und Sattelzügen nach Elektrifizierungsart (Szenario M0)**



Quelle: eigene Darstellung

### Zwischenfazit

Das Szenario M0 zeigt, dass unter den getroffenen Annahmen bei Aufbau eines Oberleitungsnetzes insbesondere die O-BEV, teilweise auch die O-HEV eine ökonomisch vorteilhafte Option gegenüber dem Diesel-Lkw darstellen können. Bis zum Jahr 2030 steigt ihr Anteil an den Neuzulassungen auf 16 % und danach mit zunehmendem Netzausbau weiter bis auf rund 35 %.

Allerdings sind einige der zu Grunde gelegten Annahmen als optimistisch zu werten, so z. B. die recht niedrigen Anschaffungspreise der O-BEV, die günstigen Strompreise, und möglicherweise auch die Amortisationszeiten. Auch die Kosten der Infrastruktur werden in dem Szenario nicht auf die Nutzer umgelegt. Im Folgenden wird untersucht, wie robust die Ergebnisse unter Variation der genannten Annahmen sind. Zudem wird untersucht, wie der Markthochlauf durch eine CO<sub>2</sub>-abhängige Umgestaltung der Lkw-Maut gefördert werden kann.

Mögliche zusätzliche Potenziale durch den Regionalverkehr und andere Fernverkehre mit weniger als 100 km auf der Auswahlstrecke wurden hingegen nicht betrachtet, könnten aber ein zusätzliches Potenzial für die Elektrifizierung darstellen (siehe Abschnitt 8.4.2).

### 8.3.3. Einfluss der Amortisationszeiten auf den Markthochlauf

#### Einleitung

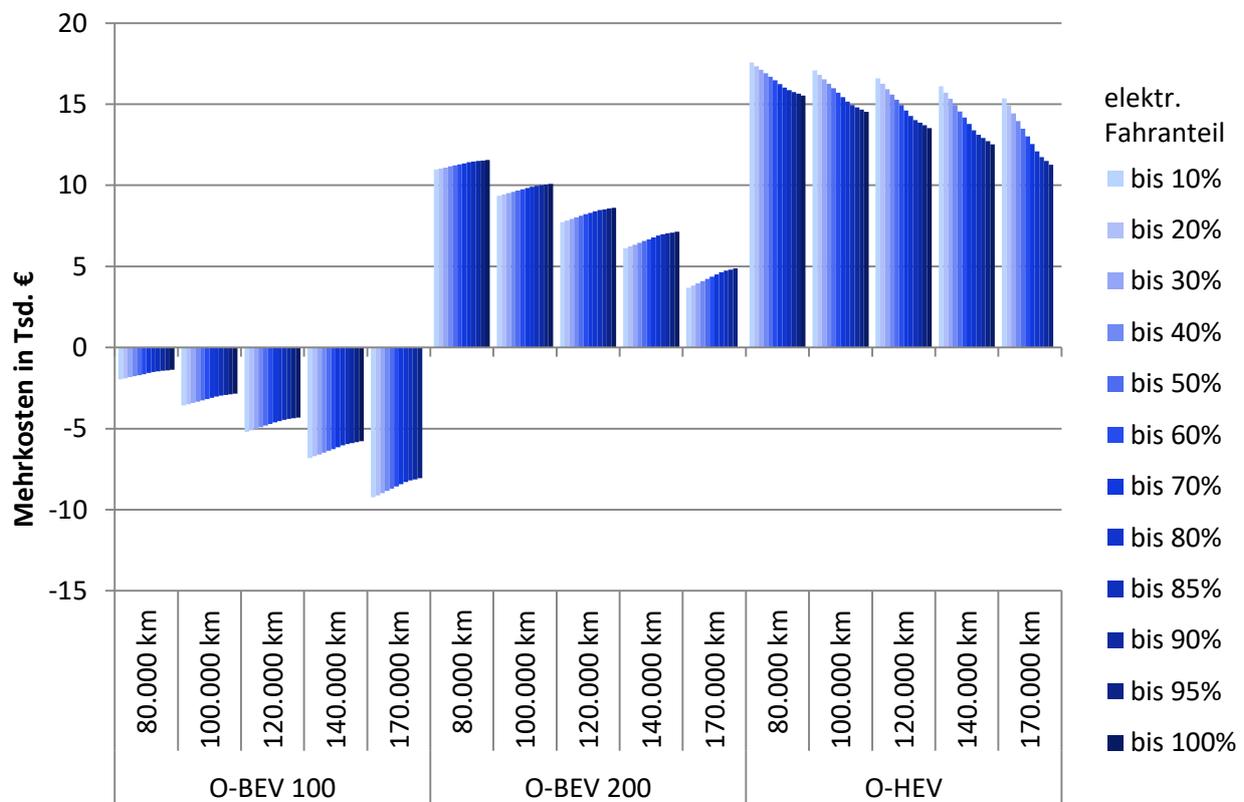
Wie oben dargestellt, gibt es keine verlässlichen Quellen zu den Anforderungen an die Amortisationszeiten der Fahrzeuge. Im Projektbeirat wurde mehrfach auf die möglicherweise hohe Risikoaversion der Entscheider hingewiesen – u. a. vor dem Hintergrund, dass typische Vertragslaufzeiten in der Logistik oft maximal 2 Jahre betragen.

Eine Herausforderung ergibt sich daraus, dass die Anschaffungsinvestition in ein elektrisches Fahrzeug zunächst um 25 bis 50 % höher liegt als die Investition in ein vergleichbares Dieselfahrzeug. Die Bereitschaft der Marktteilnehmer, auch längere Amortisationszeiten und damit ein höheres Risiko in Kauf zu nehmen, dürfte also einen wichtigen Faktor für den Markterfolg von O-Lkw darstellen. Auch der Fahrzeugrestwert kann eine Unsicherheit darstellen. Vor diesem Hintergrund wurden Sensitivitäten mit einer Variation der zu Grunde gelegten Amortisationszeiten betrachtet, und zwar ein pessimistischer Fall (1 Jahr Amortisationszeit für alle Profile) und ein optimistischer Fall (5 Jahre für alle Profile).

#### TCO-Vergleich

Der pessimistische Fall, in dem alle Nutzer mit einer Amortisationsdauer von 1 Jahr kalkulieren, führt zu wesentlich höheren TCO-Mehrkosten bzw. geringeren TCO-Vorteilen bei O-Lkw (Abbildung 8-15). Bei einer kurzen Amortisationszeit fallen die Anschaffungskosten stärker und die Einsparungen im laufenden Betrieb weniger stark ins Gewicht. O-BEV 200 und O-HEV weisen dann - unabhängig vom Nutzerprofil - im Jahr 2030 einen TCO-Nachteil gegenüber einem Dieselfahrzeug auf. Einzig der O-BEV 100 kann einen TCO-Vorteil generieren. Dies liegt an seinen geringen Anschaffungskosten durch die vergleichsweise kleine Batterie.

**Abbildung 8-15: TCO-Mehrkosten gegenüber einem Dieselfahrzeug nach Jahresfahrleistung und elektrischem Fahranteil im Jahr 2030 bei Amortisationszeit von 1 Jahr (Szenario M0)**

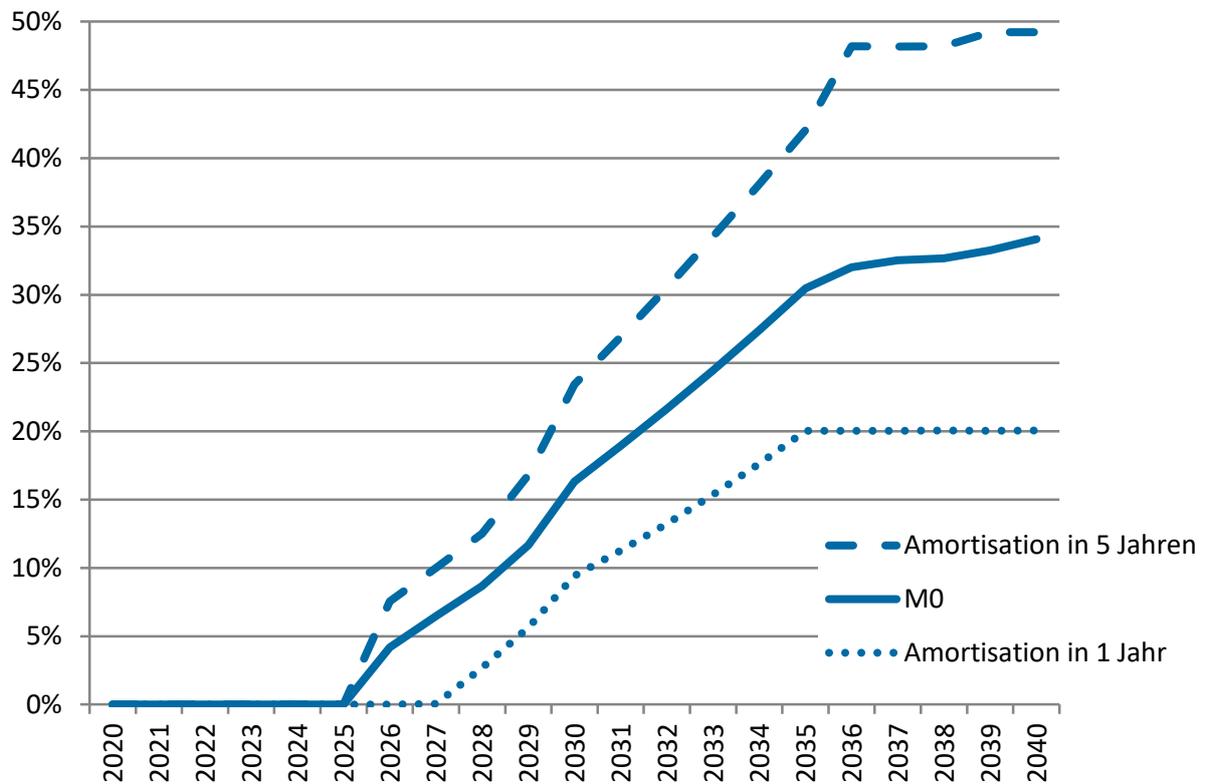


Quelle: eigene Darstellung

## Neuzulassungen

In Abbildung 8-16 ist die Entwicklung der Neuzulassungen im Ausgangsszenario M0 sowie bei Variation der Amortisationsdauer dargestellt. Wie schon aus Abbildung 8-15 ersichtlich, können O-Lkw im Fall einer Kalkulation mit 1 Jahr teils nicht mit Diesel-Lkw konkurrieren. Der Anteil der Neuzulassungen fällt folglich kleiner aus. Kalkulieren alle Nutzer mit 5 Jahren, liegt der Anteil der Neuzulassungen von O-Lkw deutlich höher bei fast 50 %.

**Abbildung 8-16: Entwicklung der Neuzulassungen (O-HEV + O-BEV) in Abhängigkeit des Amortisationszeitraums**

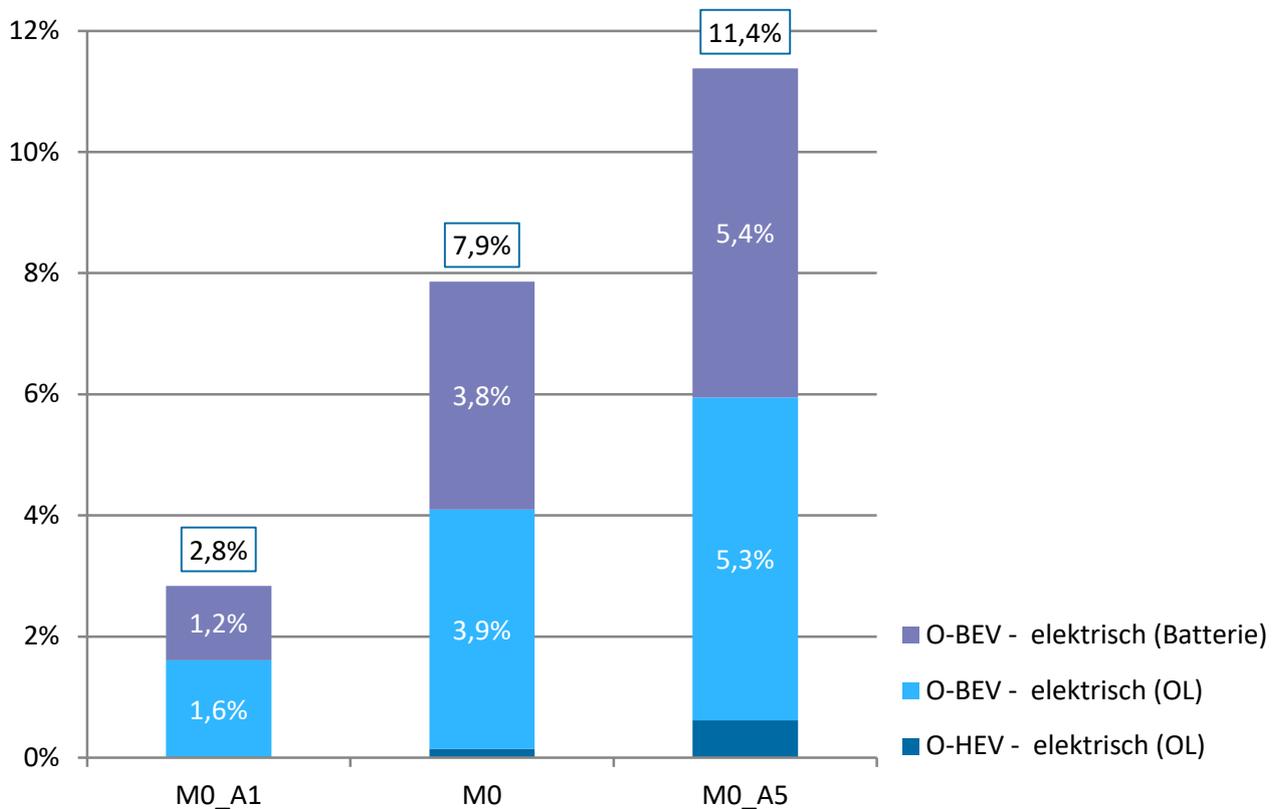


Quelle: eigene Darstellung

### Elektrische Fahrleistungen

Abbildung 8-17 veranschaulicht nochmals, dass sich bei einem Amortisationszeitraum von einem Jahr O-HEV bis 2030 für keines der Profile lohnen. Auch bei einem Amortisationszeitraum von 5 Jahren fallen die elektrischen Fahranteile von O-HEV mit unter 1 % nicht ins Gewicht. O-BEV erreichen hingegen schon bei einem Amortisationszeitraum von einem Jahr knapp 3 % elektrischen Fahranteil. Bei einem Amortisationszeitraum von 5 Jahren liegt der Anteil bei rund 11 %.

**Abbildung 8-17: Elektrische Fahrleistung im Jahr 2030 in Abhängigkeit des Amortisationszeitraums**



Quelle: eigene Darstellung

### Zwischenfazit

Die Anforderung der Nutzer an den Amortisationszeitraum hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Markthochlaufberechnung. Bei einer Amortisationszeit von 5 Jahren lohnt sich mittelfristig für fast alle Nutzer, die mindestens teilweise auf dem O-Netz unterwegs sind (im Modell etwa 50 %), der Kauf eines O-Lkw. Bei einer Amortisationszeit von einem Jahr lohnt sich ohne weitere Anreize der Kauf nur für 20 % der Nutzer.

### 8.3.4. Szenarien zur Lkw-Maut und der Wirkung von CO<sub>2</sub>-Preisen

#### Einleitung

Die Einführung einer CO<sub>2</sub>-abhängigen Lkw-Maut wird derzeit auf EU-Ebene diskutiert. Seit dem ersten Mobilitätspaket der EU-Kommission liegt ein Revisionsvorschlag zur Eurovignetten-Richtlinie vor. Nach einer ersten kurzen Befassung im Jahr 2017 wurden die Verhandlungen ausgesetzt und im Februar 2019 wieder aufgenommen.

Der Gesetzesvorschlag sieht vor, die Mautgebühr für Lkw umzugestalten, sodass eine Lenkungswirkung hin zu weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen im Güterverkehr erzeugt wird. Für die CO<sub>2</sub>-Differenzierung sind zwei Varianten in der Diskussion: Eine Staffelung der Maut nach CO<sub>2</sub>-Emissionsklassen und die Anlastung eines CO<sub>2</sub>-Aufschlages. Der Anreiz für Energieeffizienz ist dabei umso größer, je stärker der Mautsatz in Abhängigkeit von der Energieeffizienz variiert. Untersucht wurden

Ausgestaltungsoptionen unter anderem in Straßburg et al. (2018) und Heidt et al. (2018). Eine reduzierte Mautgebühr oder die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Preises können einen entscheidenden Hebel zur Attraktivitätssteigerung für energieeffiziente O-Lkw darstellen.

Zu unterscheiden ist, ob eine reduzierte Mautgebühr auf Fahrzeugebene gewährt wird (so wie dies derzeit typischerweise der Fall ist). In diesem Fall wären O-HEV auch dann mautbefreit, wenn sie mit dem Dieselantrieb unterwegs sind. Eine weitergehende Möglichkeit mit höherer Lenkungs- bzw. Anreizwirkung wäre, die Mautbefreiung für O-HEV auf den elektrischen Fahranteil zu beschränken (wenngleich sich die operative Umsetzung bzw. Überprüfung hierbei als herausfordernder darstellen dürfte).

Für die Weiterentwicklung der Lkw-Maut zur Förderung von elektrischen Lkw wurden in StratON verschiedene Ausgestaltungsvarianten untersucht und quantifiziert, welche sich aus folgenden Komponenten zusammensetzen:

- komplette Mautbefreiung für O-Lkw (MB) bzw. Mautreduktion von 50 % (MB50)
- Mautreduktion von 50 % im elektrischen Fahrmodus (ME50)
- Einführung eines CO<sub>2</sub>-Preises von 80 €<sub>2010</sub>/t bzw. 200 €<sub>2010</sub>/t (M80 bzw. M200). Dies bedeutet, dass zusätzlich zum heute gültigen Mautsatz von 18,7 ct/km (Euroklasse VI) ab 2023 ein CO<sub>2</sub>-Aufschlag auf die Maut eingeführt wird. Dieser bezieht sich dabei nur auf die direkten Emissionen (TTW).

**Tabelle 8-13: Übersicht über die Szenarien zu Lkw-Maut**

M0	Ausgangsszenario mit Oberleitungsnetz, ohne Mautbefreiung
MB	komplette Mautbefreiung für O-Lkw ab 2020
ME50	50 % Mautbefreiung für O-Lkw im elektrischen Fahrmodus ab 2023
M80	CO <sub>2</sub> -Preis 80 €/t ab 2023
M80+ME50	M80 und 50 % Mautbefreiung für O-Lkw im elektrischen Modus ab 2023
M80+MB50	M80 und 50 % Mautbefreiung für O-Lkw ab 2020
M200	CO <sub>2</sub> -Preis steigt von 80 €/t in 2023 auf 200 €/t ab 2026

Quelle: eigene Darstellung

Die untersuchten Varianten entsprechen bis auf das Szenario MB den folgenden Vorgaben des gegenwärtigen Richtlinien-Vorschlags:

- Der höchste Mautsatz liegt nicht höher als 100 % über dem niedrigsten Mautsatz nicht emissionsfreier Fahrzeuge
- Der Mautsatz emissionsfreier Fahrzeuge liegt nicht niedriger als 75 % unter dem höchsten Mautsatz.

Aufkommensneutralität wird durch die dargestellten Mautszenarien nicht sichergestellt, da bei sich änderndem Flottenmix auch der Mautsatz mit der Zeit angepasst werden muss. (Aufkommensneutralität bei gleichbleibender Lenkungswirkung der Szenarien könnte aber sichergestellt werden,

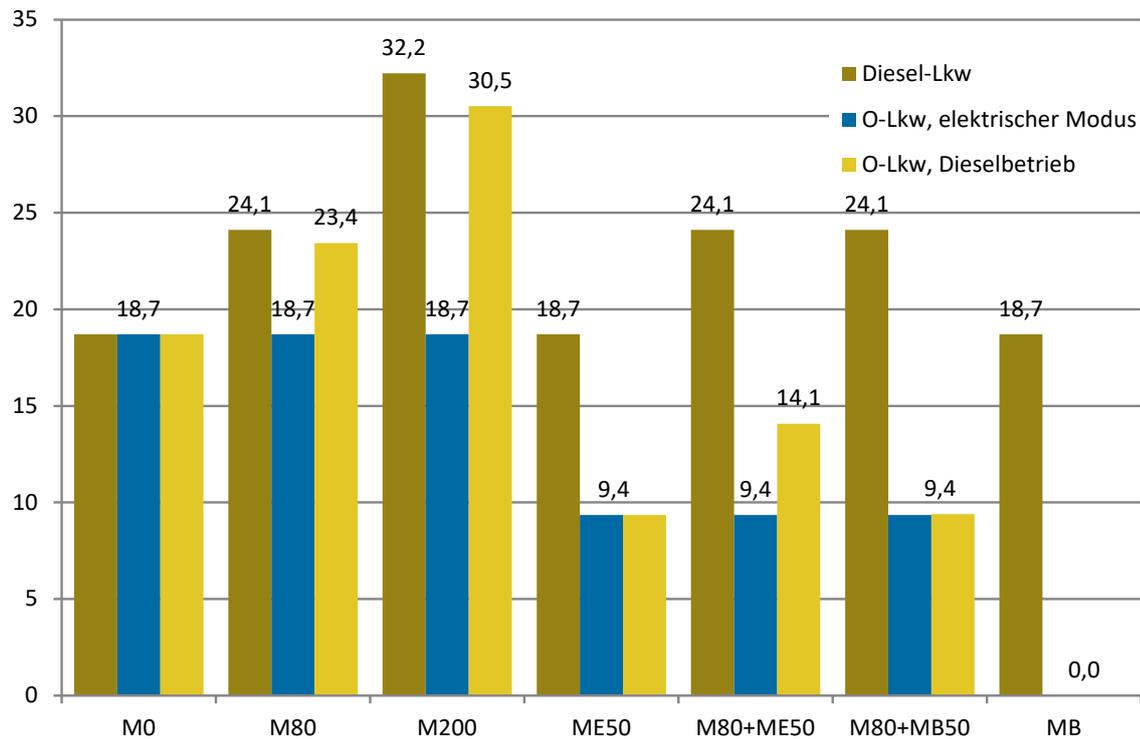
indem jeweils der nicht vom Antrieb bzw. den CO<sub>2</sub>-Emissionen abhängige Anteil des Mautsatzes entsprechend justiert wird.

Tabelle 8-14 stellt die mittleren Mautsätze im Jahr 2025 in den Szenarien in ct/km dar.

**Tabelle 8-14: Mittlere Mautsätze im Jahr 2025 in ct<sub>2010</sub>/km**

	<b>M0</b>	<b>M80</b>	<b>M200</b>	<b>ME50</b>	<b>M80 +ME50</b>	<b>M80 +MB50</b>	<b>MB</b>
Diesel-Lkw	18,7	24,1	32,2	18,7	24,1	24,1	18,7
<i>Davon Infrastrukturkomponente</i>	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7
<i>Davon CO<sub>2</sub>-Komponente</i>	0,0	5,4	13,5	0,0	5,4	5,4	0,0
O-Lkw, elektrischer Modus	18,7	18,7	18,7	9,4	9,4	9,4	0,0
O-Lkw, Dieselbetrieb	18,7	23,4	30,5	9,4	14,1	9,4	0,0
<i>Davon Infrastrukturkomponente</i>	18,7	18,7	18,7	9,4	9,4	4,7	0,0
<i>Davon CO<sub>2</sub>-Komponente</i>	0,0	4,7	11,8	0,0	4,7	4,7	0,0

Quelle: eigene Darstellung

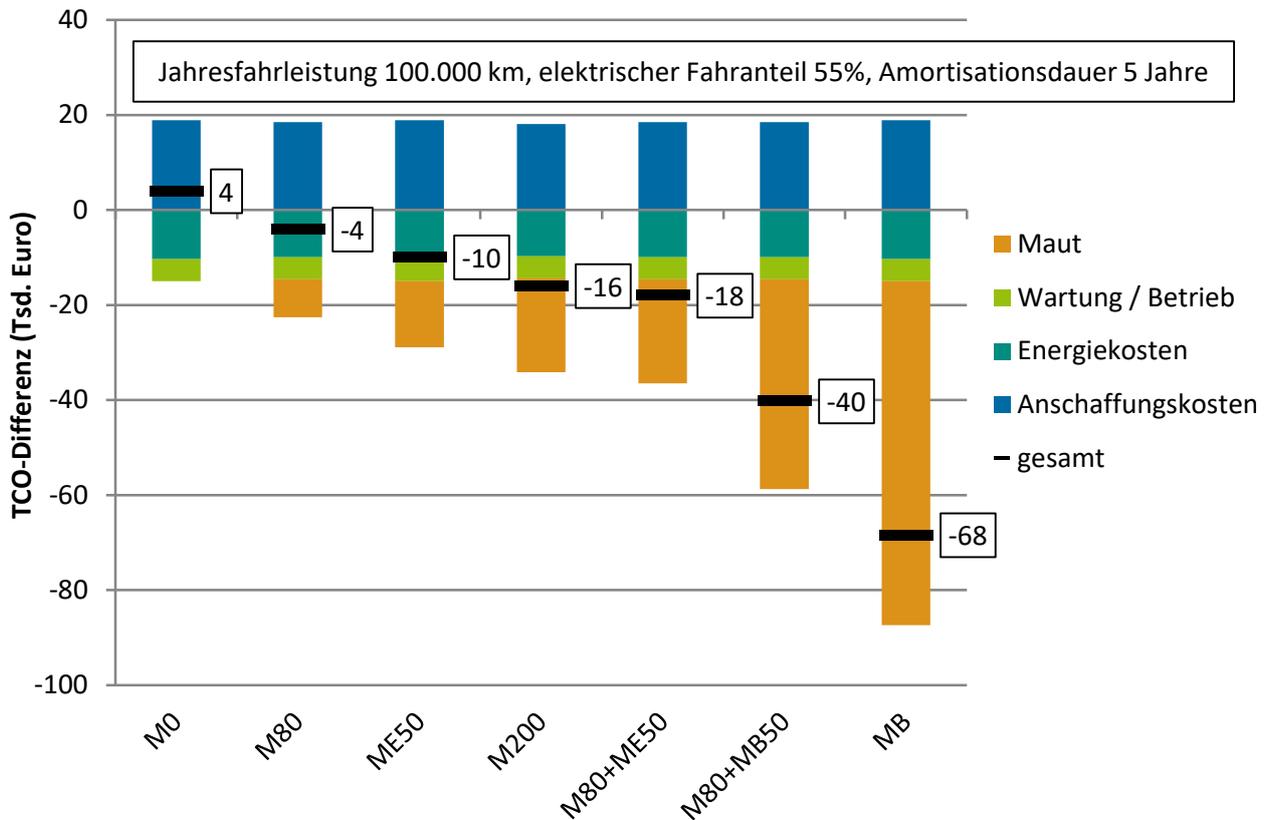
**Abbildung 8-18: Mittlere Mautsätze im Jahr 2025 in ct<sub>2010</sub>/km**

Quelle: eigene Darstellung

### TCO-Vergleich

In Abbildung 8-19 sind TCO-Differenzkosten für O-HEV in verschiedenen Mautszenarien gegenüber einem Dieselfahrzeug dargestellt. Das zugrunde gelegte Nutzerprofil ist identisch mit dem zuvor verwendeten Profil der Darstellung der TCO im Szenario M0 (100.000 km, 5 Jahre, 55 % elektrischer Fahranteil) und stellt somit ein beispielhaftes Profil dar. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die verschiedenen Mautszenarien im Gegensatz zum Szenario M0 bereits im Jahr 2030 durchweg einen TCO-Vorteil für den O-HEV unter den gegebenen Rahmenbedingungen des Nutzerprofils erzeugen. Am höchsten fällt dieser Vorteil bei einer kompletten Mautbefreiung – auch im Dieselfahrmodus – aus (MB). Eine vollständige Mautbefreiung wie im Szenario MB führt jedoch zu einer nicht zielgenauen Anreizwirkung, wie weiter unten näher erläutert wird. Ein CO<sub>2</sub>-Preis von 80 €/t (M80) hat den niedrigsten Effekt auf die TCO, gefolgt von einer Mautbefreiung von 50 % im elektrischen Fahrmodus und dem Mautszenario M200 mit einem CO<sub>2</sub>-Preis von 200 €/t. Die beiden weiteren Varianten aus der Kombination von einem CO<sub>2</sub>-Preis von 80 €/t und einer 50 %igen Mautbefreiung (M80+ME50 und M80+MB50) erzeugen einen noch höheren TCO-Vorteil und liegen zwischen M200 und MB.

**Abbildung 8-19: Beispielhafte TCO-Differenz des O-HEV gegenüber einem Diesel-Lkw im Jahr 2030 (Nutzerprofil: siehe Kasten)**

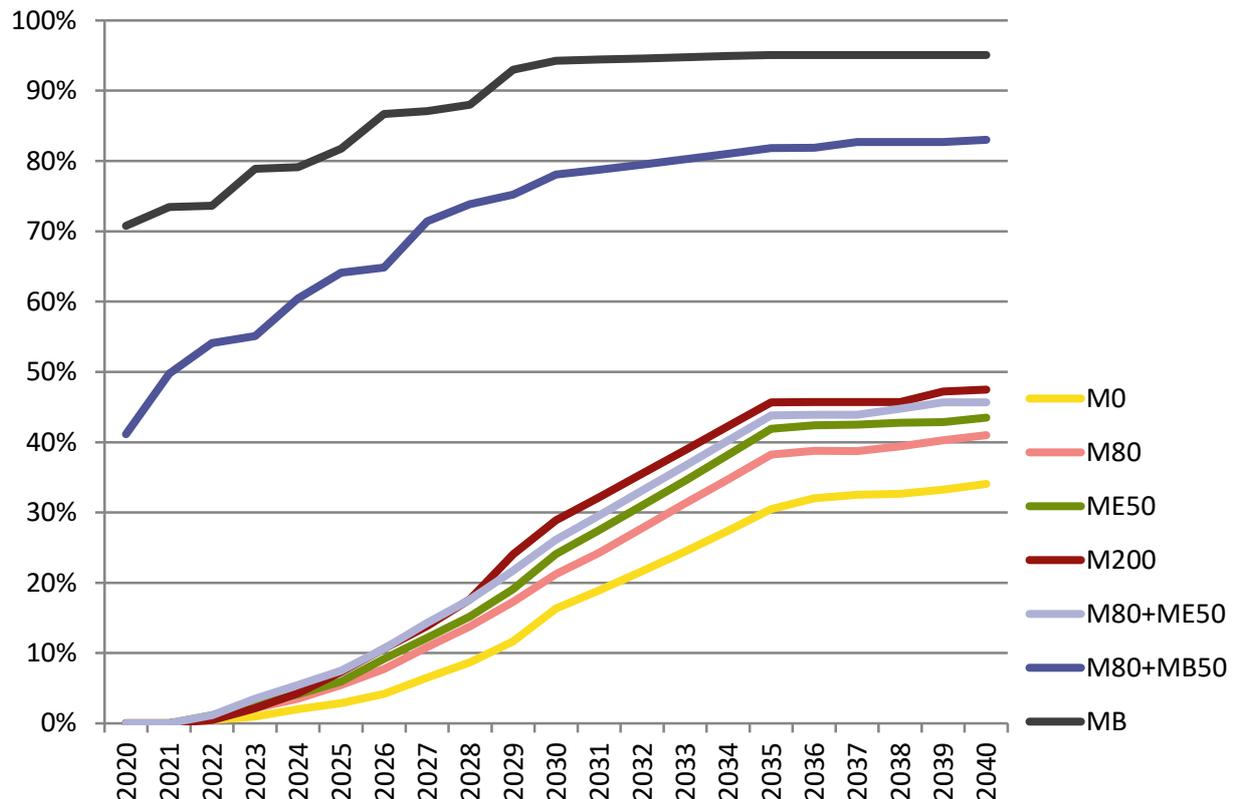


Quelle: eigene Darstellung

## Neuzulassungen

Aus Abbildung 8-20 wird der Effekt der Mautszenarien auf die Entwicklung der Neuzulassungen ersichtlich. Dargestellt sind die Anteile von O-Lkw (d. h. O-HEV und O-BEV) an den gesamten Neuzulassungen von Last- und Sattelzügen.

Bei allen betrachteten Mautszenarien mit einem Aufschlag auf der Lkw-Maut und/oder einer Befreiung von elektrischen Lkw hat der O-BEV (und auch der O-HEV) für viele Nutzerprofile einen TCO-Vorteil gegenüber dem Diesel-Lkw. Somit kann in diesen Szenarien langfristig ein Großteil der Fahrzeuge, welche unter der Oberleitung verkehren (rund 50 % der Fahrzeuge, siehe 8.2.2) elektrifiziert werden. Die erreichten Neuzulassungsanteile liegen zwischen 40 % und knapp 50 %.

**Abbildung 8-20: Entwicklung des Neuzulassungsanteils von O-Lkw (O-BEV und O-HEV)**

Quelle: eigene Darstellung

Im Szenario mit einer kompletten Mautbefreiung der O-Lkw (MB) lohnt sich die Anschaffung eines O-HEV auch dann, wenn er nur im Dieselbetrieb fährt. Die Netzverfügbarkeit stellt daher kein Kriterium mehr für den TCO-Vorteil dar. Eine komplette Mautbefreiung ist daher kein zielgenauer Anreiz. Dies gilt in abgeschwächter Form ebenso für das Szenario M80+MB50. Auch eine 50 %ige Mautbefreiung von O-HEV unabhängig vom Antriebsmodus kann zur Förderung von Fahrzeugen führen, die das Oberleitungsnetz gar nicht nutzen und nur im Dieselbetrieb operieren. Die Mautbefreiung führt dann zu keinem zusätzlichen Klimaschutzbeitrag.

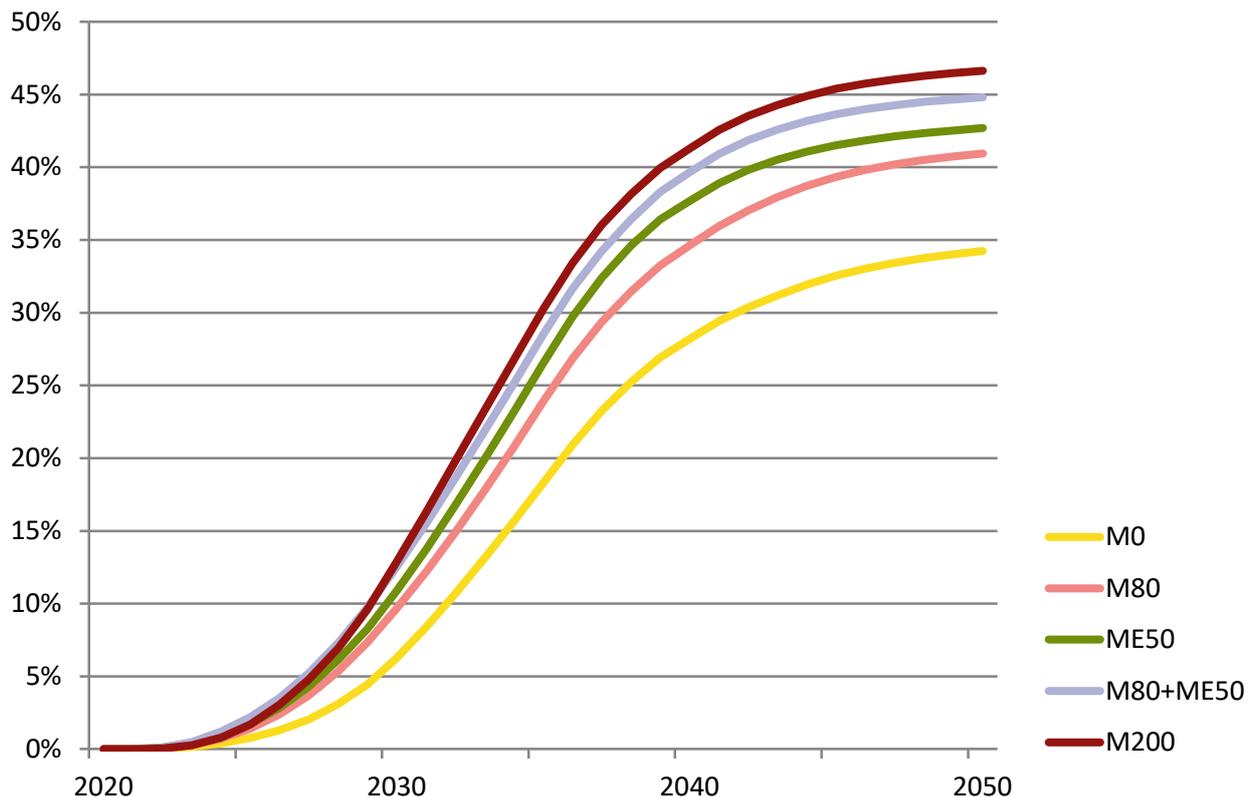
Dieser Effekt tritt nicht auf, wenn die Mautbefreiung nur im elektrischen Fahrmodus greift (ME50 und M80+ME50). Prinzipiell lassen sich durch eine 50 %ige Mautbefreiung im elektrischen Modus (ME50) ähnliche bis leicht höhere Neuzulassungsanteile generieren als bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von 80 €/t (M80). Durch eine Mautspreizung, d. h. eine Kombination von CO<sub>2</sub>-Preis und Begünstigung E-Lkw (M80+ME50) lassen sich die Neuzulassungsanteile weiter steigern und fallen fast so hoch aus wie bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von 200 €/t (M200). Die niedrigsten Neuzulassungen erreicht das Szenario M80. Insbesondere Nutzer mit schneller Amortisationsanforderung und niedrigem Fahranteil auf dem O-Netz entscheiden sich hier teils gegen den Einsatz eines O-Lkw.

### Fahrzeugbestand

Ein Blick auf die Entwicklung des Fahrzeugbestands an Last- und Sattelzügen zeigt – mit der entsprechenden Verzögerung zwischen Neuzulassungen und Umwälzung des Bestandes - ein ähnliches Bild (Abbildung 8-21). Zwecks Übersichtlichkeit sind die Szenarien MB und M80+MB50 hier nicht dargestellt. Auffällig ist, dass in allen Szenarien der Anteil von O-Lkw im Bestand am stärksten

im Zeitraum zwischen 2030 und 2035, in Folge des starken Netzausbaus, ansteigt. Die Sättigung tritt etwa ab dem Jahr 2045 ein, was damit zusammenhängt, dass es annahmegemäß ab dem Jahr 2035 in den Szenarien das O-Netz nicht weiter ausgebaut wird. Um bis zum Jahr 2030 bereits einen höheren Fahrzeugbestand zu erzielen, müsste der Netzausbau früher erfolgen (siehe hierzu Abschnitt 8.3.7). Bei weiterem, auch internationalem, Netzausbau ließen sich zudem langfristig höhere Anteile realisieren.

**Abbildung 8-21: Entwicklung des Fahrzeugbestands von O-Lkw (O-BEV und O-HEV)**



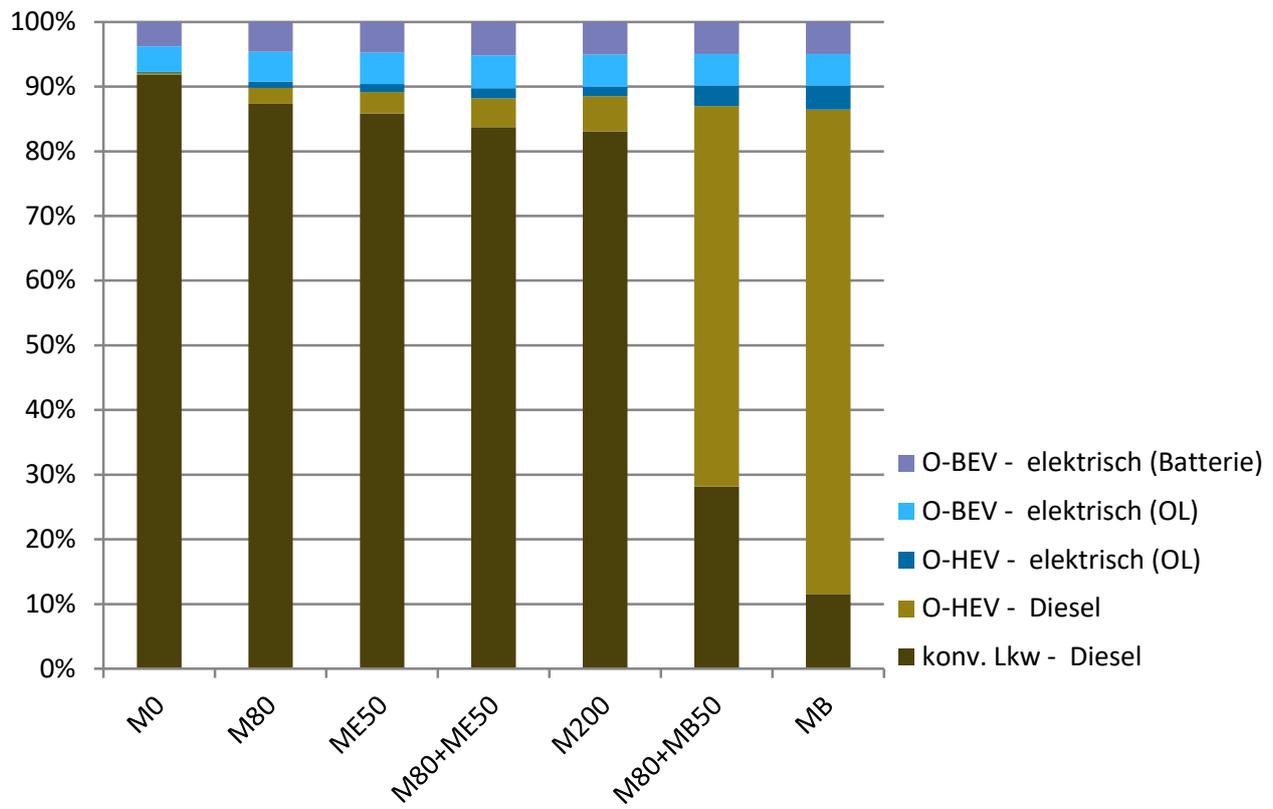
Quelle: eigene Darstellung

## Elektrische Fahrleistungen

Neben der Anzahl an Fahrzeugen im Betrieb ist der tatsächlich geleistete elektrische Fahranteil interessant, denn der tatsächlich realisierte elektrische Fahranteil ist der Hauptindikator für die erreichbare THG-Einsparung. Das wird am Fall des Szenarios MB (komplette Mautbefreiung) besonders deutlich: Trotz hoher Zulassungszahlen bis 95 % aller Last- und Sattelzüge bewegt sich der elektrische Fahranteil im Jahr 2030 nur bei 13 % (Abbildung 8-22). Auch im Szenario M80+MB50 wird ein Großteil der O-Lkw-Fahrleistung im Dieselbetrieb absolviert.

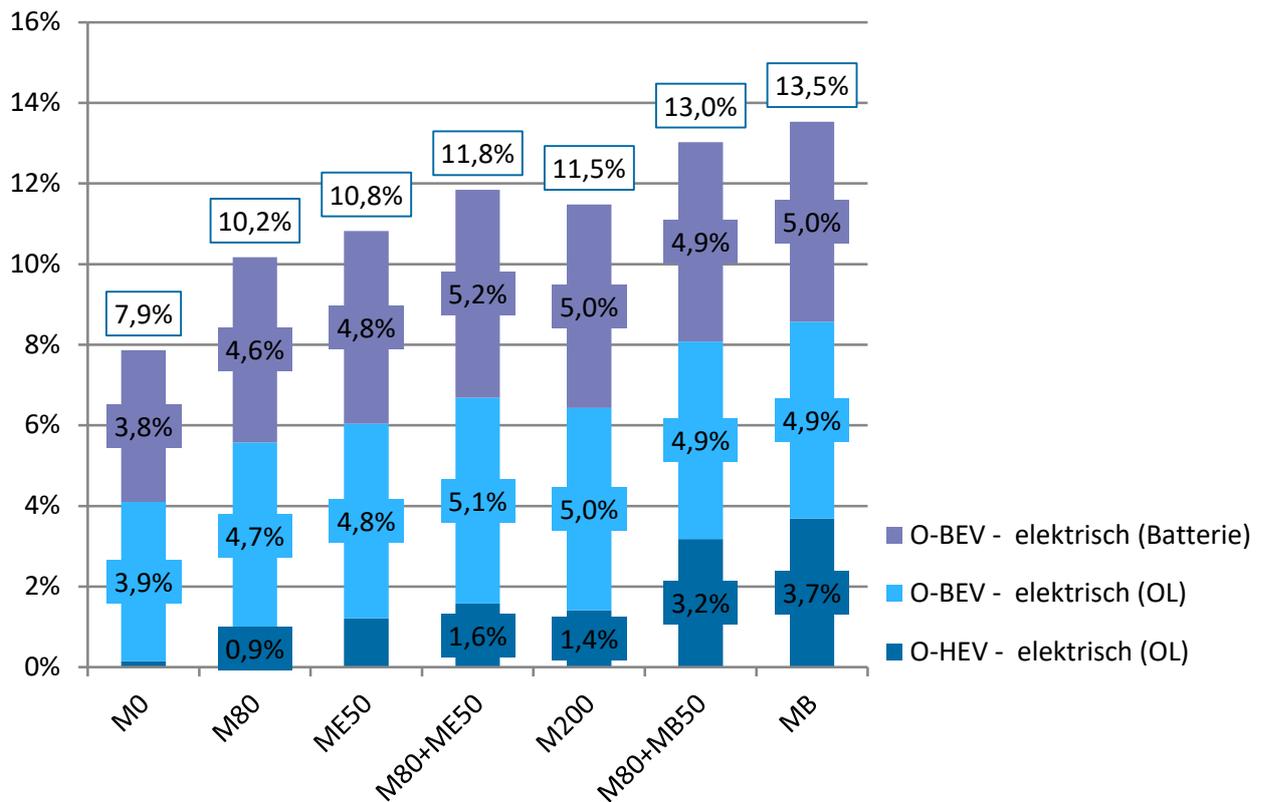
Eine erhöhte elektrische Fahrleistung könnte möglicherweise durch den Regionalverkehr und andere Fernverkehre mit weniger als 100 km auf der Auswahlstrecke realisiert werden (siehe Abschnitt 8.4.2).

**Abbildung 8-22: Anteil der Antriebsarten an der Fahrleistung im Jahr 2030 bei Variation der Lkw-Maut**



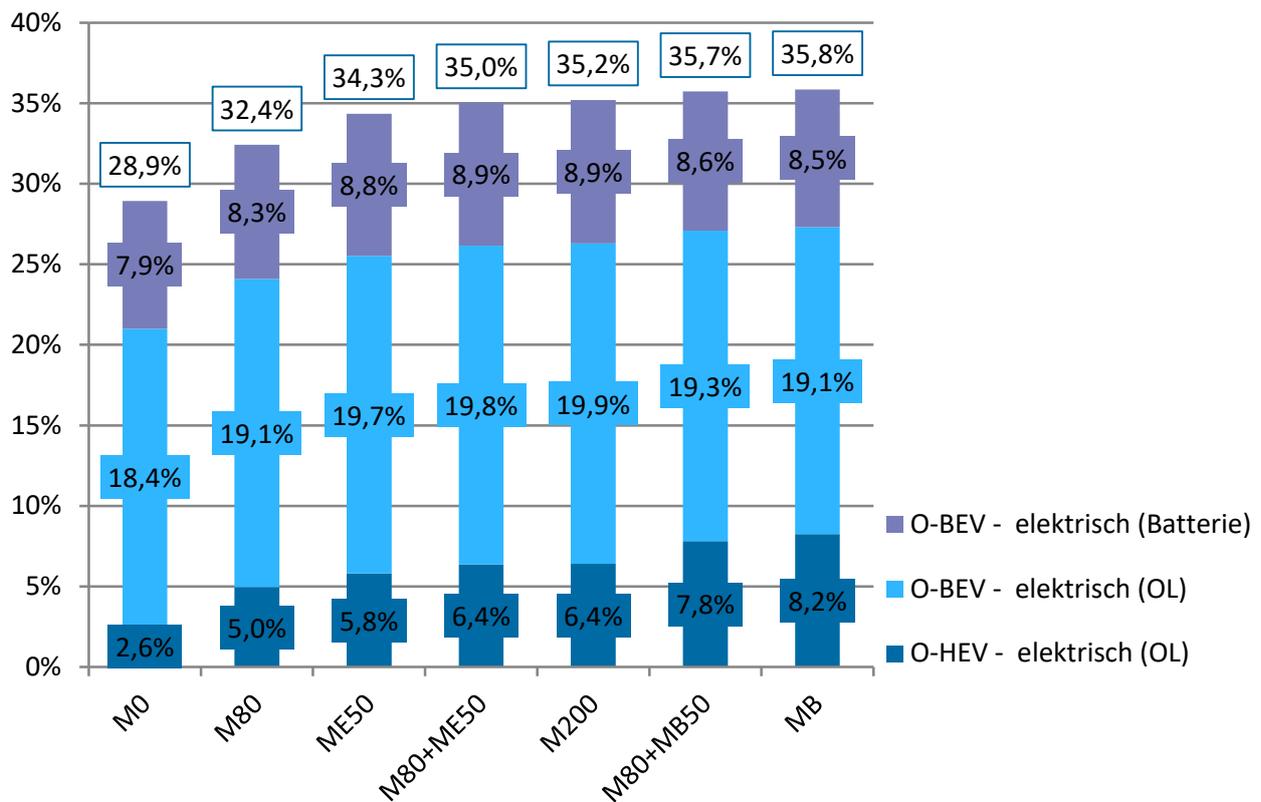
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 8-23 stellt den Dieselanteil nicht mit dar und zeigt damit die Unterschiede der Mautszenarien in Bezug auf den elektrischen Fahranteil deutlicher. Die Mautszenarien erreichen im Jahr 2030 elektrische Fahranteile zwischen 10 % und 13 %, d. h. die Unterschiede zwischen den Szenarien sind relativ gering. MB und M80+MB50 erreichen im Vergleich zu den anderen Szenarien zwar leicht höhere Fahranteile um 13 %, führen jedoch auch zur Förderung von O-Lkw im Dieselbetrieb.

**Abbildung 8-23: Elektrische Fahrleistungen im Jahr 2030 bei Variation der Lkw-Maut**

Quelle: eigene Darstellung

Im Jahr 2040 liegen die elektrischen Fahranteile mit rund 32 % bis 36 % weitaus höher (Abbildung 8-24). Dies liegt an der weiteren Kostendegression sowie am zunehmenden Netzausbau. Der Unterschied zu M80+MB50 und MB schrumpft auf unter einen Prozentpunkt.

**Abbildung 8-24: Elektrische Fahrleistungen im Jahr 2040 bei Variation der Lkw-Maut**

Quelle: eigene Darstellung

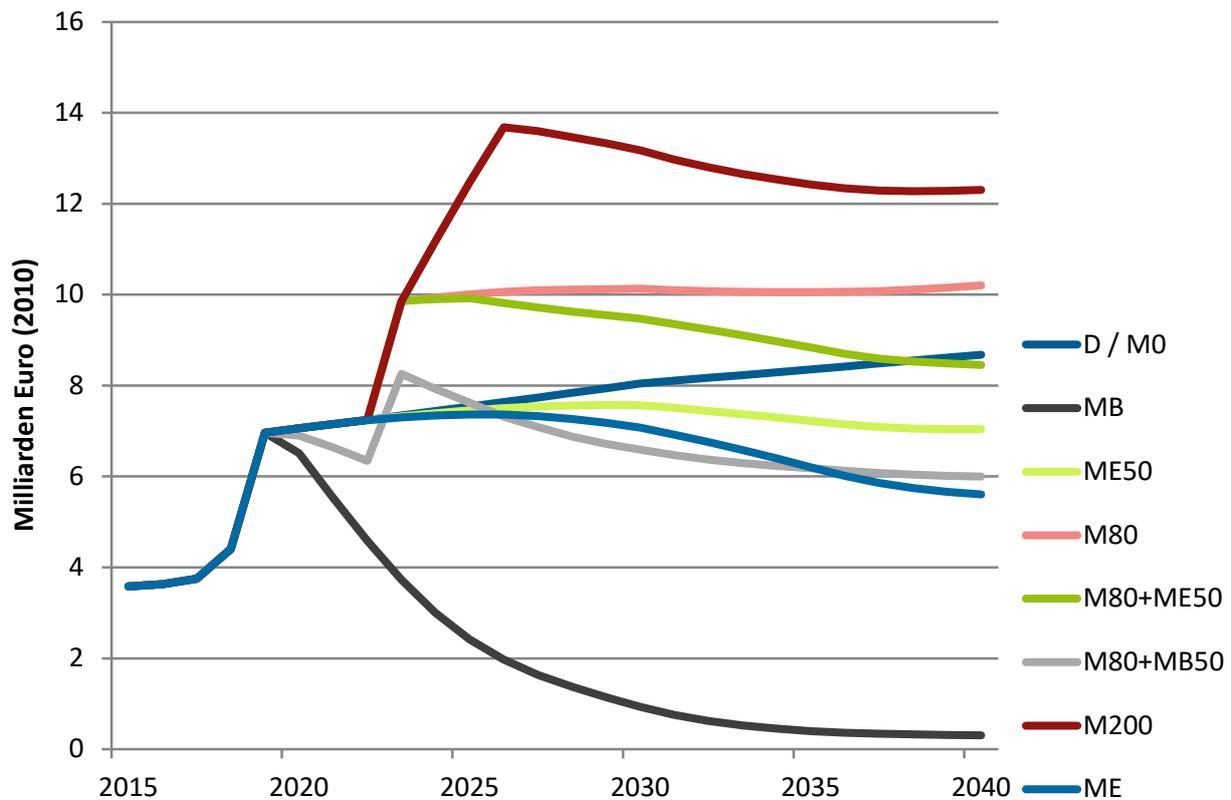
## Mauteinnahmen

In Abbildung 8-25 ist die Entwicklung der Mauteinnahmen bei den untersuchten Mautszenarien abgebildet. Dargestellt sind die Mauteinnahmen von Last- und Sattelzügen. Der Anstieg im Jahr 2019 ist zurückzuführen auf die bereits beschlossene Ausweitung der Lkw-Maut auf Bundesstraßen sowie die Erhöhung der Mautsätze (auf 18,7 ct/km für Last- und Sattelzüge der Schadstoffklasse Euro VI).

In einem Szenario ohne Begünstigung von O-Lkw in der Maut (Szenario M0) entsprechen die Mauteinnahmen einem Szenario, bei dem es nur Diesel-Lkw gibt (Szenario D). So steigen die Mauteinnahmen durch zunehmende Fahrleistung bis zum Jahr 2030 auf 8 Mrd. Euro an, bis 2040 auf knapp 9 Mrd. Euro.

Bei einer vollständigen Befreiung von der Maut lohnen sich O-Lkw auch dann, wenn sie nur oder fast nur im Dieselbetrieb eingesetzt werden. Im Extremfall kommt es dabei zu einer deutlichen Reduktion der Mauteinnahmen (Szenario MB: rund 8 Mrd. Euro).

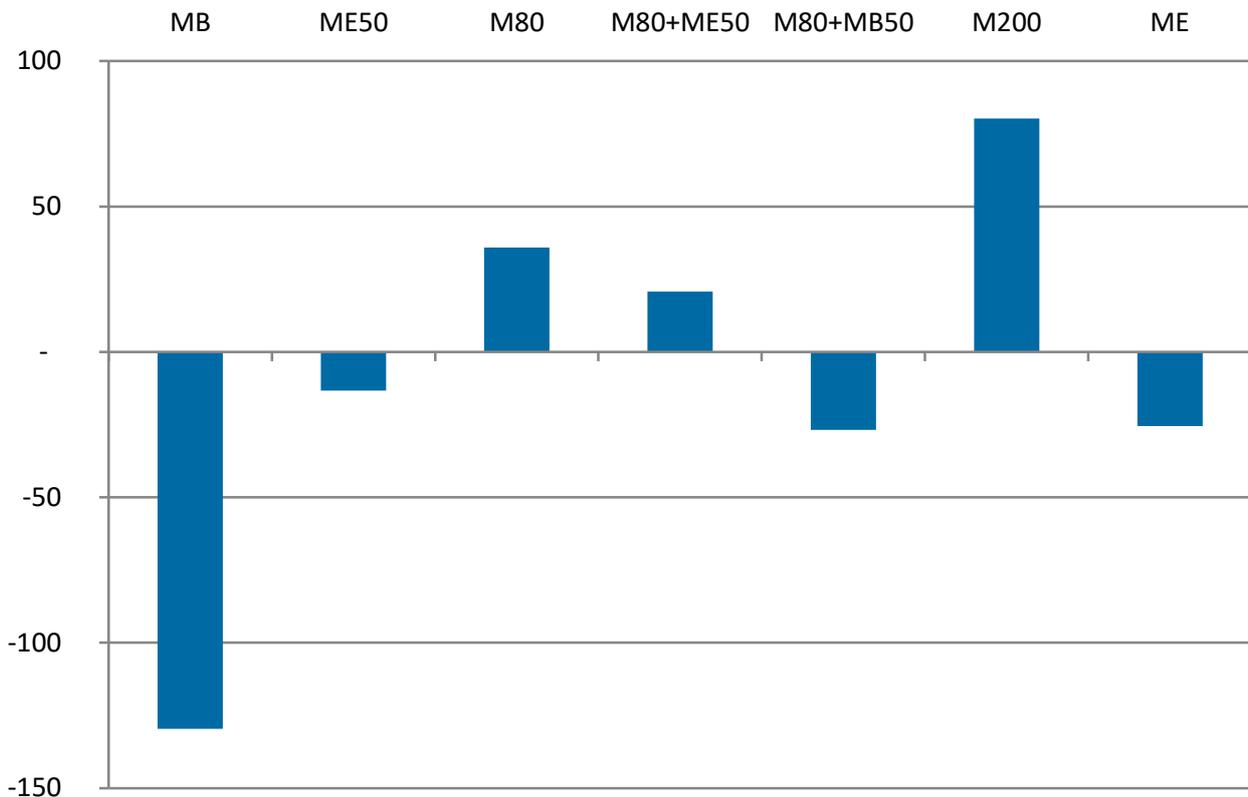
**Abbildung 8-25: Entwicklung der Mauteinnahmen von Last- und Sattelzügen in den Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung

In den Szenarien mit Einführung einer CO<sub>2</sub>-Komponente bei der Lkw-Maut im Jahr 2023 steigen die Mauteinnahmen zunächst spürbar an und sinken dann wiederum leicht je nach CO<sub>2</sub>-freiem Fahranteil in den Szenarien.

Hohe elektrische Fahranteile (35 % in 2040) lassen sich bei einer zusätzlichen Mautkomponente auf Basis eines CO<sub>2</sub>-Preises in Höhe von 200 €/t realisieren – bei zusätzlichen Mauteinnahmen in Höhe von rund 4 Mrd. € im Jahr 2040. Bei einer Mautbefreiung um 50 % im elektrischen Fahrmodus ergeben sich ähnliche elektrische Fahranteile. Die Mauteinnahmen liegen im Szenario ME50 in 2040 jedoch deutlich niedriger als im Szenario M0.

**Abbildung 8-26: Kumulierte Veränderung der Mauteinnahmen bis 2040 in Milliarden €**

Quelle: eigene Darstellung

### Zwischenfazit

Ein CO<sub>2</sub>-Aufschlag von 200 €/t als ergänzende Komponente der Lkw-Maut würde bei einem typischen Lkw-Fahrprofil im Straßengüterfernverkehr<sup>15</sup> über 5 Jahre Mehrkosten von über 80 Tsd. € verursachen. Damit ließen sich die höheren Anschaffungskosten eines Oberleitungs-Lkw gegenüber einem Dieselfahrzeug (in 2025 rund 30-50 Tsd. Euro) also bereits deutlich überkompensieren.

Ein solcher Aufschlag wäre im Gegensatz z. B. zur unsicheren Ölpreisentwicklung als fixer Kostenbestandteil kalkulierbar und würde so die Planungssicherheit beim Fahrzeugkauf erhöhen.

Optimalerweise sollte ein solcher CO<sub>2</sub>-Aufschlag auf die Lkw-Maut in Abhängigkeit der tatsächlich im verbrennungsmotorischen Betrieb gefahrenen Kilometer erhoben werden. Elektrische Fahrzeuge mit Diesel-Range-Extender (wie O-HEV) würden also für die verbrennungsmotorischen Fahranteile ebenfalls den CO<sub>2</sub>-Aufschlag zahlen. Dadurch gäbe es einen Anreiz, mit O-HEV hohe elektrische Fahranteile zu realisieren.

Die zweitbeste Lösung wäre, die Mautspreizung nur fahrzeugbezogen vorzunehmen, ohne auf die tatsächlich (nicht) elektrisch gefahrenen Kilometer Bezug zu nehmen. Bei einer fahrzeugbezogenen Begünstigung von teilelektrischen Lkw (gegenüber den konventionellen Lkw) besteht dann jedoch die Gefahr, dass beispielsweise O-Lkw mit Dieselhybrid vorwiegend im Dieselmotus genutzt werden. Damit wäre die umweltpolitisch erwünschte Lenkungswirkung deutlich reduziert, während gleichzeitig Einbußen bei den Mauteinnahmen in Kauf zu nehmen wären. Zur Sicherstellung des

<sup>15</sup> 120.000 km Fahrleistung, 5 Jahre Nutzungsdauer, 700 g CO<sub>2</sub>/km

Umweltnutzens und hoher elektrischer Fahranteile ist es also wichtig, die Begünstigung von O-Lkw an der elektrischen Fahrleistung auszurichten und nicht am Fahrzeug.

Eine vollständige Mautbefreiung von CO<sub>2</sub>-freien Lkw stellt dagegen keine langfristig tragfähige Lösung dar, da auch CO<sub>2</sub>-freie Lkw hohe Infrastrukturkosten verursachen und die Finanzierung der Straßeninfrastruktur sichergestellt werden sollte. Zudem würde eine Mautbefreiung mittelfristig zu sinkenden Transportkosten im Straßengüterverkehr führen, was wiederum zu Rebound führen kann und dem Ziel entgegensteht, Verkehr von der Straße auf die Schiene zu verlagern. Daher sollte die Mautbefreiung für elektrische Lkw sukzessive auslaufen und in einen CO<sub>2</sub>-Aufschlag überführt werden.

Die modellierten Szenarien zeigen, dass sich durch die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Aufschlags von 80 €/t die Anzahl der O-HEV und die elektrischen Fahrleistungen im Jahr 2030 unter den getroffenen Annahmen nahezu verdoppeln lassen. O-BEV werden in den Szenarien auch ohne Mautbefreiung schnell wirtschaftlich; für O-HEV gilt das nicht in gleichem Ausmaß.

In welchem Umfang die Lkw-Maut nach CO<sub>2</sub> gespreizt werden muss, um die (ökonomische) Attraktivität von O-Lkw zu gewährleisten, hängt stark von der Entwicklung weiterer Rahmenbedingungen ab – bspw. von den zu zahlenden Strompreisen an der Oberleitung, den Fahrzeugpreisen, sowie möglicher Risikoaversion von Entscheidern (bei den Amortisationszeiten). Unter den getroffenen Annahmen könnte dafür ein CO<sub>2</sub>-Preis von 80 €/t als Basis für die zusätzliche Mautkomponente bereits ausreichen. TCO-Vergleiche sowie Sensitivitätsbetrachtungen zum Strompreis zeigen jedoch, dass eine weitergehende Mautspreizung für die Sicherung eines stabilen und planbaren TCO-Vorteils wichtig sein dürfte.

### 8.3.5. Variation der Attraktivität von O-BEV

#### Einleitung

Im folgenden Abschnitt wird die Attraktivität von O-BEV variiert, und zwar in Bezug auf die Anschaffungspreise, die Nachlademöglichkeiten am Start-/Zielort und die generelle Verfügbarkeit (Tabelle 8-13).

Die Anschaffungspreise von O-BEV sind vergleichsweise niedrig im Vergleich zu den Annahmen anderer Studien. Daher wurden Sensitivitätsanalysen mit höheren Anschaffungspreisen (+10.000 / +20.000 Euro) durchgeführt.

Einen weiteren Einfluss hat die Annahme, ob am Start- und/oder Zielort eine Nachlademöglichkeit vorhanden ist. Im Standardfall wird davon ausgegangen, dass der O-BEV die Oberleitung mit vollgeladener Batterie verlässt und keine Nachlademöglichkeit am Ziel/Start seiner Fahrt vorhanden ist. Er kann sich somit bis zur Hälfte seiner batterieelektrischen Reichweite von der Oberleitung entfernen. Als Sensitivität wird der Fall betrachtet, dass sowohl am Start- und Zielort eine Nachlademöglichkeit vorhanden ist (M80\_L). Die mögliche Distanz des O-BEV zur Oberleitung erhöht sich auf die gesamte elektrische Reichweite und erhöht dementsprechend die elektrische Fahrleistung.

Weiterhin wäre es denkbar, dass sich O-BEV generell nicht oder nur in geringem Maße am Markt durchsetzen, da sie eine niedrigere Einsatzflexibilität gegenüber O-HEV und Diesel-Lkw aufweisen. Daher wurden zwei Szenarien ohne O-BEV-Verfügbarkeit berechnet (M0\_ohne\_OBEV und M80\_ohne\_OBEV).

**Tabelle 8-15: Übersicht über die Szenarien zu O-BEV**

M0	Ausgangsszenario mit Oberleitungsnetz, ohne Mautbefreiung
M0_ohne_OBEV	komplette Mautbefreiung für O-Lkw ab 2020
M0_investcost+	M0 mit erhöhtem Anschaffungspreis O-BEV (+10.000 € <sub>2010</sub> )
M0_investcost++	M0 mit erhöhtem Anschaffungspreis O-BEV (+20.000 € <sub>2010</sub> )
M80	CO <sub>2</sub> -Preis (80 €/t) ab 2023
M80_ohne_obeV	M80 ohne O-BEV-Verfügbarkeit
M80_investcost+	M80 mit erhöhtem Anschaffungspreis O-BEV (+10.000 € <sub>2010</sub> )
M80_L	M80 mit Nachlademöglichkeit für O-BEV an Start- und Zielort

Quelle: eigene Darstellung

### Variation der Anschaffungspreise

In den bisher betrachteten Szenarien wurde davon ausgegangen, dass die Mehrinvestition in einen O-BEV vergleichsweise niedrig liegt; eine genaue Herleitung der verwendeten Anschaffungspreise findet sich im StratON Technologiebericht. Die folgende Tabelle 8-16 stellt die Mehrkosten eines O-Lkw in StratON gegenüber einem Dieselfahrzeug im Vergleich zur Studie Wietschel et al. (2017) dar. In Wietschel et al. (2017) liegen die Mehrkosten des O-BEV 100 deutlich höher. Zu beachten ist, dass die Kosten für die stationäre Ladeinfrastruktur bei O-BEV in den TCO-Kosten nicht enthalten sind; auch das könnte also ein Grund für höhere Kosten der O-BEV darstellen.

**Tabelle 8-16: Mehrkosten eines O-Lkw ggü. Dieselfahrzeug im Jahr 2030 in €<sub>010</sub>**

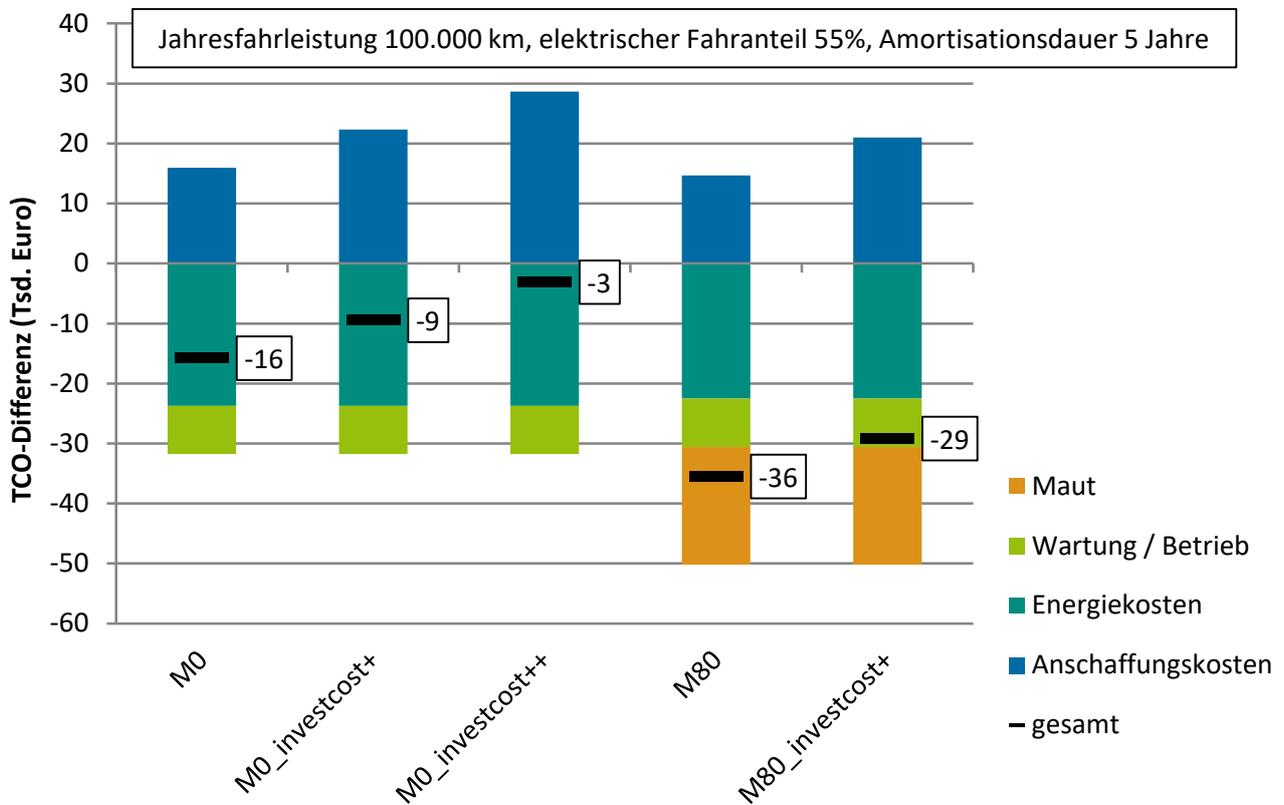
	O-HEV	O-BEV 100	O-BEV 200
StratON	32.745	7.570	29.246
Wietschel et al. 2017	21.461	55.685*	n.a.

\*beinhaltet mit 200kWh eine um 25 kWh größere Batterie (bereinigt auf gleiche Batteriegröße und StratON Batteriekosten: 37.183€)

Quelle: eigene Darstellung

In Abbildung 8-27 ist der Einfluss der Anschaffungskosten des O-BEV 200 auf die TCO eines beispielhaften Nutzerprofils im Jahr 2030 dargestellt. Gegenüber M0 wird der Fahrzeugpreis in den Szenarien „M0\_investcost+“ und „M80\_investcost+“ um je 10.000 € erhöht. Durch die Abschreibungsrechnung macht sich dies in den TCO lediglich als Kostenunterschied von je rund 6.300 € bemerkbar. Für das gegebene Nutzerprofil reduziert sich der TCO-Vorteil gegenüber einem Dieselfahrzeug von knapp 16.000 € auf lediglich 9.500 €. Bei einem um 20.000 € höheren Anschaffungspreis (Szenario „M0\_investcost+“ beläuft sich der TCO-Vorteil nur noch auf rund 3.000 €. Der TCO-Vorteil von O-BEV lässt sich auch bei höheren Anschaffungspreisen wieder stabilisieren, wenn ein CO<sub>2</sub>-Preis auf die Lkw-Maut in Höhe von 80 €/t eingeführt wird (Szenarien M80 und M80\_investcost+). Der Mautvorteil des Nutzerprofils über 5 Jahre liegt in diesem Fall bei 19.500 €, gleicht also die angenommenen höheren Anschaffungskosten wieder aus.

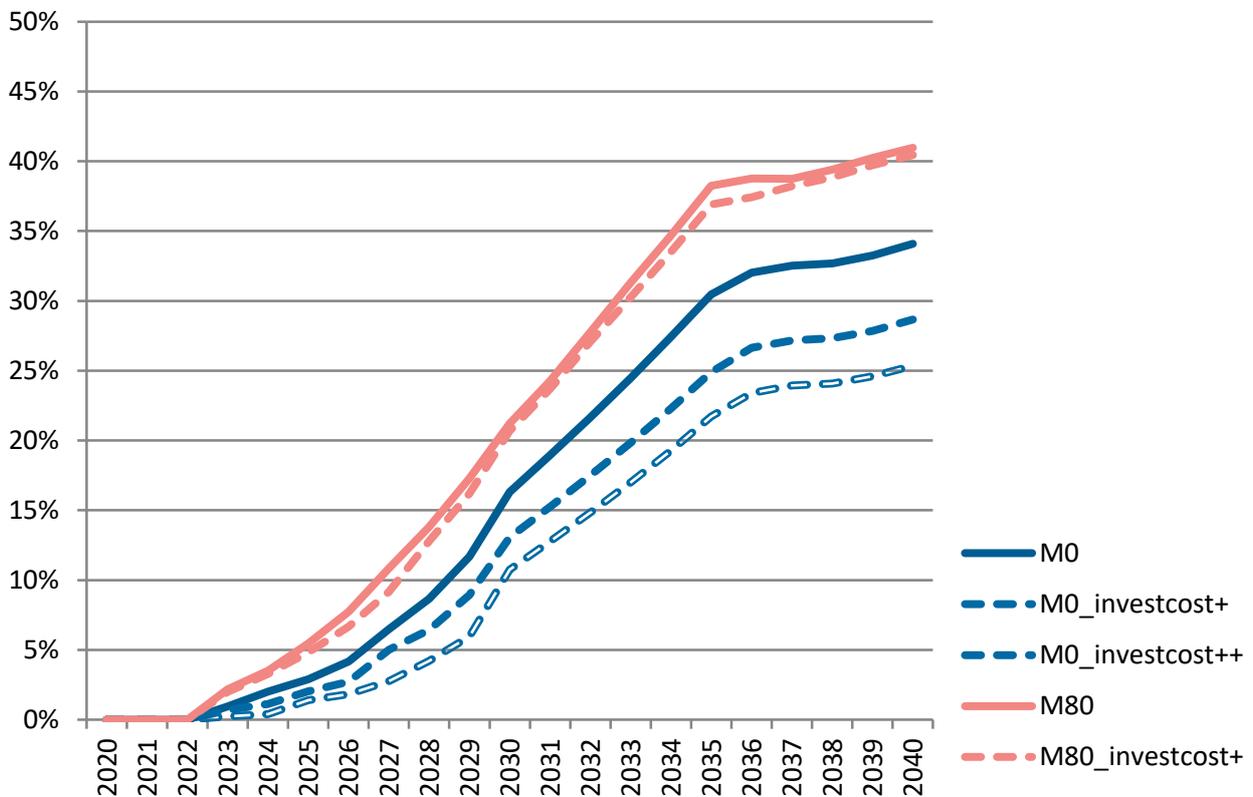
**Abbildung 8-27 TCO-Differenz des O-BEV 200 gegenüber dem Diesel-Lkw im Jahr 2030 bei Variation des Fahrzeugpreises (Nutzerprofil: siehe Abbildung)**



Quelle: eigene Darstellung

Betrachtet man die Auswirkung auf die Neuzulassungsanteile, so zeigt sich für das Szenario M0 ein deutlicher Einfluss des Anschaffungspreises (Abbildung 8-28). Werden im Szenario M0 knapp 40 % O-Lkw-Neuzulassungen im Jahr 2040 erreicht, reduziert sich der Anteil bei 20.000 € höheren Anschaffungskosten auf rund 25 %. Im Szenario M80 hat der erhöhte Anschaffungspreis einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Neuzulassungsanteile. Dies liegt daran, dass durch den CO<sub>2</sub>-Preis ein so deutlicher TCO-Vorteil vorhanden ist, dass eine Erhöhung des Anschaffungspreises um 10.000 € keinen starken Einfluss hat und in beiden Fällen rund 40 % erreicht werden.

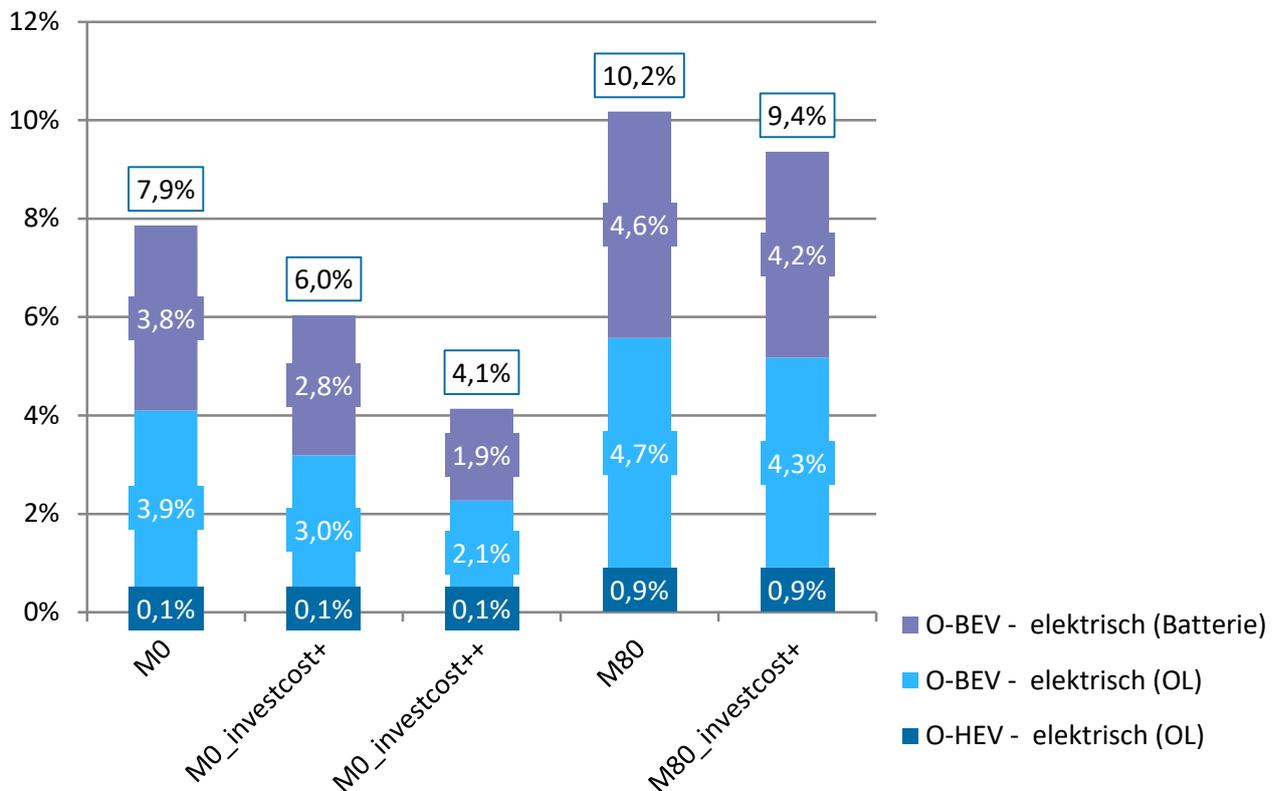
**Abbildung 8-28: Entwicklung des Neuzulassungsanteils bei Variation der O-BEV-Anschaffungspreise im Szenario M0 und M80 (O-BEV und O-HEV)**



Quelle: eigene Darstellung

Der Einfluss des Anschaffungspreises auf die elektrische Fahrleistung ist in Abbildung 8-29 dargestellt. Der elektrische Fahranteil von O-Lkw im Jahr 2030 halbiert sich im Szenario M0 bei einer Erhöhung des O-BEV-Preises um 20.000 € von rund 8 % auf 4 %. Einer Erhöhung um 10.000 € führt zu einem Rückgang auf 6 %. Im Szenario M80 ist der Einfluss des Anschaffungspreises auf den elektrischen Fahranteil analog zum Neuzulassungsanteil geringer.

**Abbildung 8-29: Elektrische Fahranteile bei Variation des Anschaffungspreis von O-BEV im Jahr 2030**

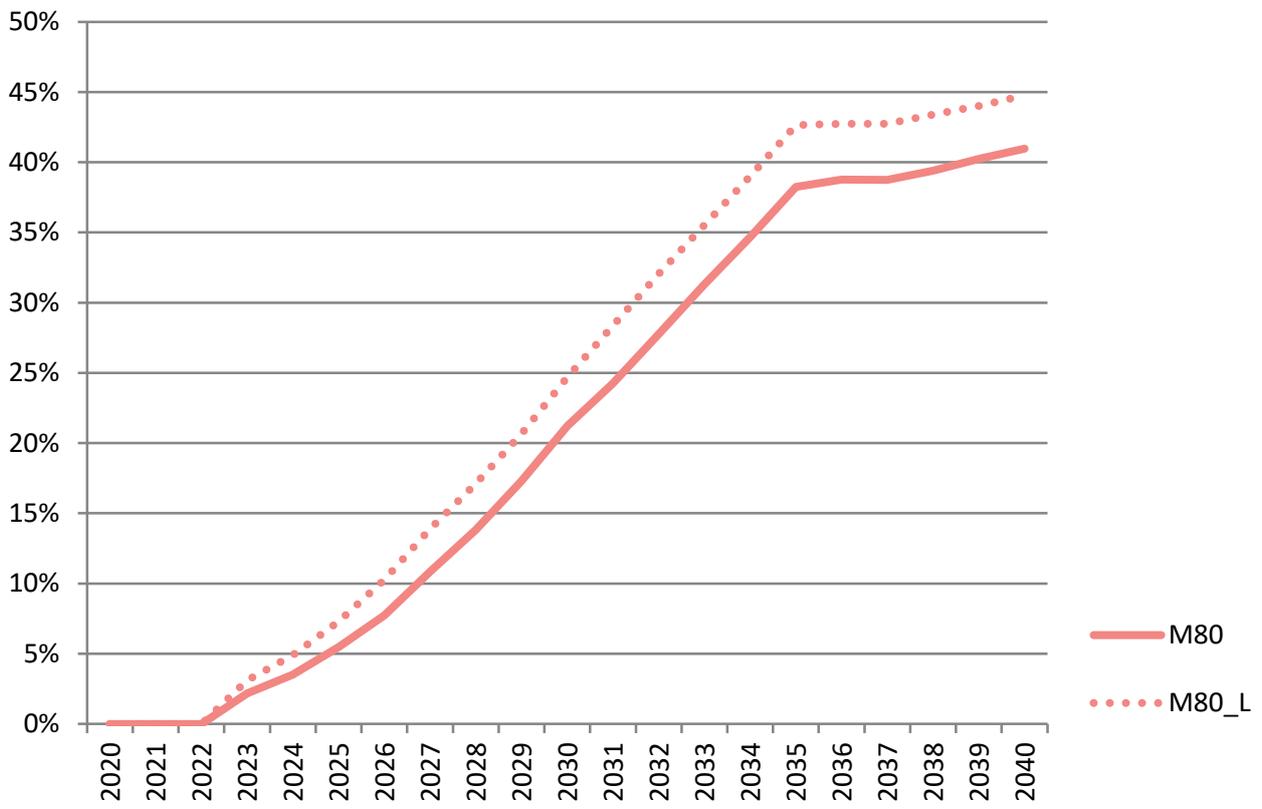


Quelle: eigene Darstellung

### Variation der Nachlademöglichkeit

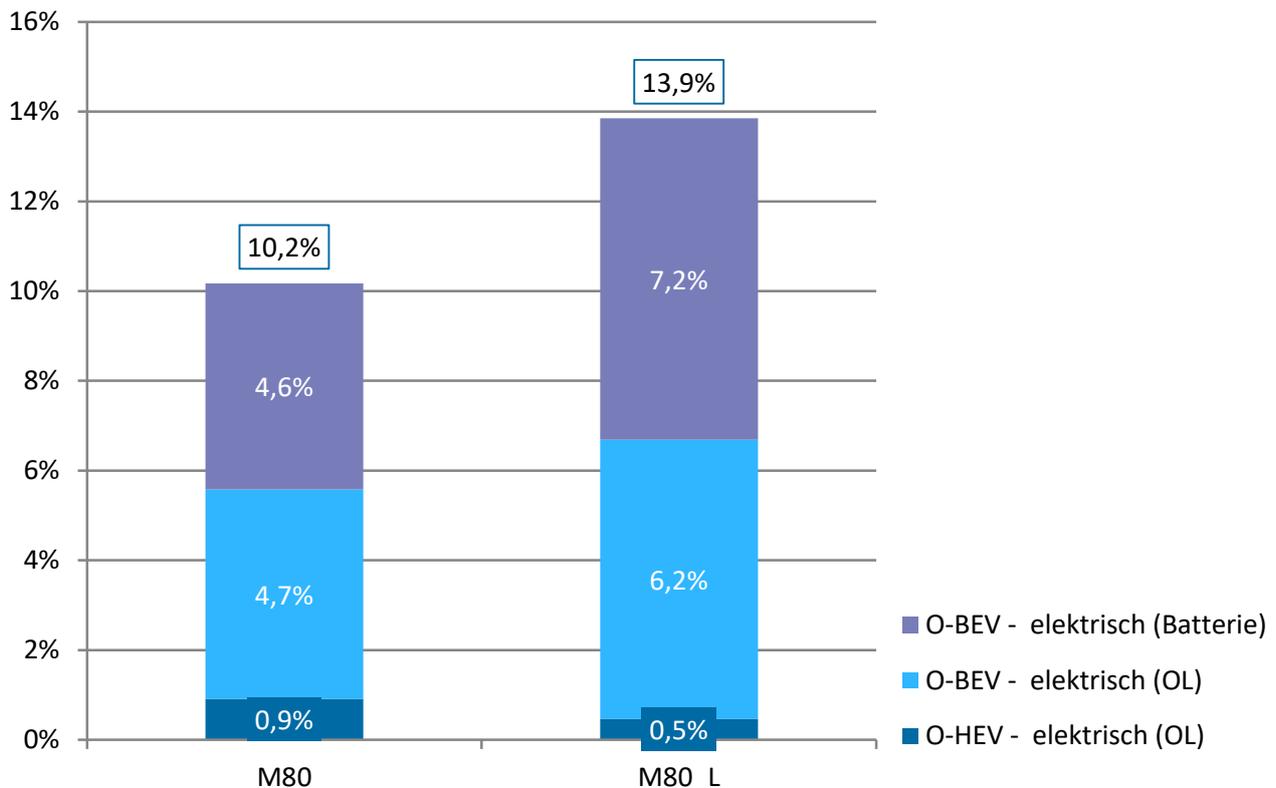
Durch eine Nachladeoption an Start- und Zielort verdoppelt sich die elektrische Reichweite abseits der Oberleitung für O-BEV. Somit erhöht sich der TCO-Vorteil durch eine erhöhte elektrische Fahrleistung, was zu einem Anstieg des Neuzulassungsanteils im Szenario M80 von etwa 40 % auf rund 45 % führt (Abbildung 8-30). O-BEV lohnen sich für eine größere Anzahl von Nutzen und Nutzern, die ansonsten auch einen O-BEV gekauft hätten, und können einen höheren elektrischen Fahranteil erreichen. Daher erhöht sich bei einer zusätzlichen Nachladeoption sowohl der elektrische Fahranteil unter der Oberleitung als auch abseits der Oberleitung im Jahr 2030 von insgesamt 10 % auf rund 14 % (Abbildung 8-31).

**Abbildung 8-30: Entwicklung des Neuzulassungsanteils bei Variation der Nachlademöglichkeit im Szenario M80 (O-BEV und O-HEV)**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 8-31: Elektrische Fahranteile bei Variation der Nachlademöglichkeit von O-BEV im Jahr 2030**



Quelle: eigene Darstellung

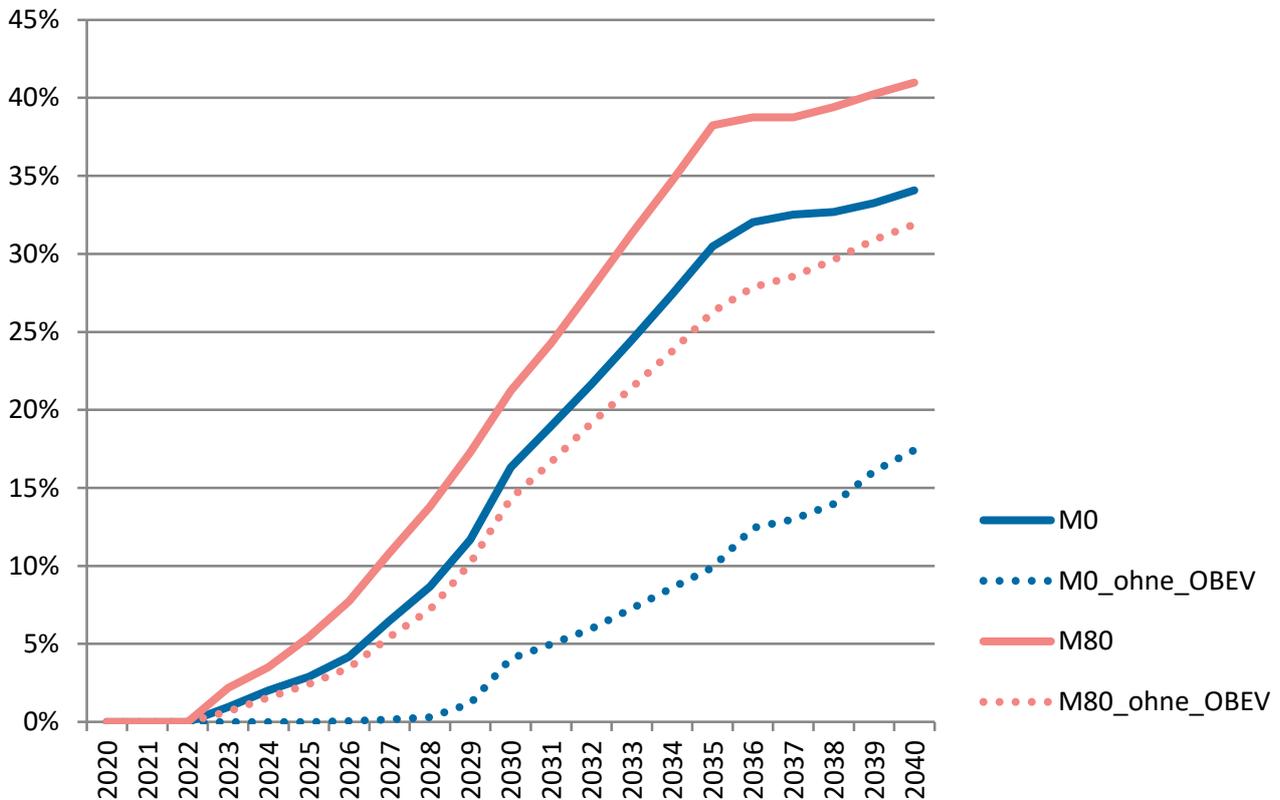
### Variation der O-BEV-Verfügbarkeit

In den Szenarien nehmen O-BEV aufgrund ihrer hohen Wirtschaftlichkeit und ausreichenden Flexibilität bereits in der frühen Marktphase eine hohe Bedeutung ein. Ausgehend von heutigen Diesel-Lkw stellen jedoch O-BEV einen deutlich größeren Technologiesprung als O-HEV dar. Zudem wurden O-HEV in den vergangenen Jahren bereits in Forschungsprojekten erprobt und es liegen umfangreiche Praxiserfahrungen vor. Der Einsatz von vollelektrischen Lkw ist hingegen noch in einer frühen Entwicklungsphase und es verbleiben Restunsicherheiten in Hinblick auf die Technologie- und Kostenentwicklung von Batteriesystemen für die Anwendung bei schweren Nutzfahrzeugen.

In einer ergänzenden Analyse wird diese verbleibende Unsicherheit über die tatsächliche Marktverfügbarkeit von O-BEV auf den generellen Markthochlauf von O-Lkw untersucht und dabei der (Extrem)-Fall abgebildet, dass diese Variante am Markt auch längerfristig nicht verfügbar ist.

Im Szenario M80 werden auch ohne Verfügbarkeit von O-BEV (M80\_ohne\_OBEV) dennoch langfristig 32 % an Neuzulassungen von O-Lkw erreicht, da bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von 80 €/t auch O-HEV einen deutlichen Vorteil vor Dieselfahrzeugen erreichen können (Abbildung 8-32). Im Szenario M0 ist der Einfluss der Sensitivität ohne O-BEV deutlich größer, da der Kostenvorteil des O-HEV geringer ausfällt. Es werden nach diesem Szenario auch langfristig dann nur rund 18 % der Neuzulassungen O-Lkw sein.

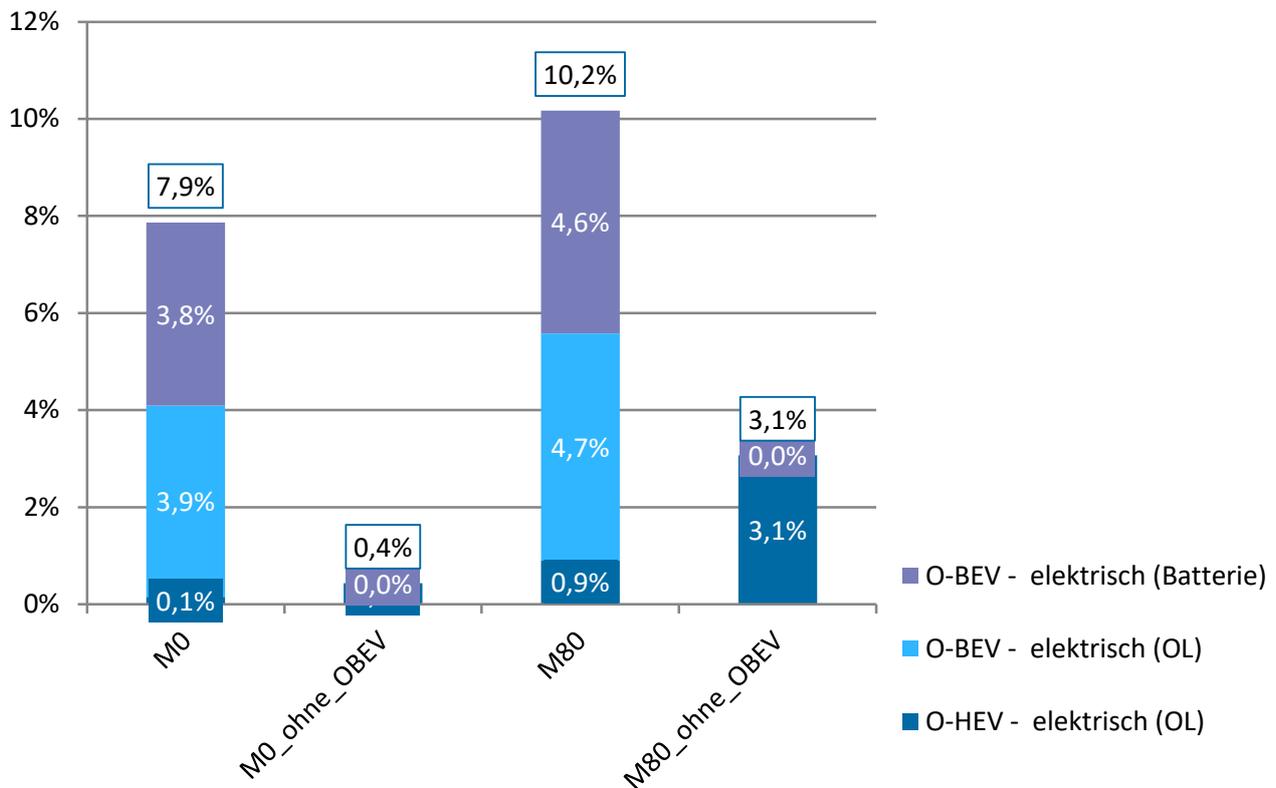
**Abbildung 8-32: Entwicklung des Neuzulassungsanteils bei Variation der Verfügbarkeit von O-BEV im Szenario M0 und M80**



Quelle: eigene Darstellung

Der Einfluss auf die elektrischen Fahranteile im Jahr 2030 ist in Abbildung 8-33 dargestellt. Der Einfluss der O-BEV-Verfügbarkeit ist in dieser vergleichsweise frühen Phase groß. Die elektrischen Fahranteile sinken in beiden Szenarien stark, wobei der Einfluss auf M0 am stärksten ist – der elektrische Fahranteil sinkt von rund 8 % auf nahezu 0 %. Im Szenario M80 sinkt er von rund 10 % auf 3,1 %.

**Abbildung 8-33: Elektrische Fahranteile bei Variation der O-BEV-Verfügbarkeit im Szenario M0 und M80 im Jahr 2030**



Quelle: eigene Darstellung

### Zwischenfazit

Bei höheren Fahrzeugpreisen reduzieren sich die Anzahl der O-BEV an den Neuzulassungen sowie der elektrische Fahranteil. Der Einfluss ist beim Szenario M0 deutlich größer als beim Szenario M80, da der Preisvorteil gegenüber einem Dieselfahrzeug ohne Anreize geringer ausfällt. O-HEV werden weiterhin nur für solche Einsatzprofile genutzt, bei denen ein Einsatz von O-BEV aufgrund der Restriktionen der Batteriekapazitäten nicht möglich ist. Eine Nachladeoption an Start- und Zielort kann hingegen die erzielten elektrischen Fahranteile deutlich erhöhen. Sind O-BEV gar nicht als Technologie verfügbar, so sinken die elektrischen Fahrleistungen drastisch. Im Szenario M0 werden im Jahr 2030 dann so gut wie keine relevanten elektrischen Fahrten durchgeführt.

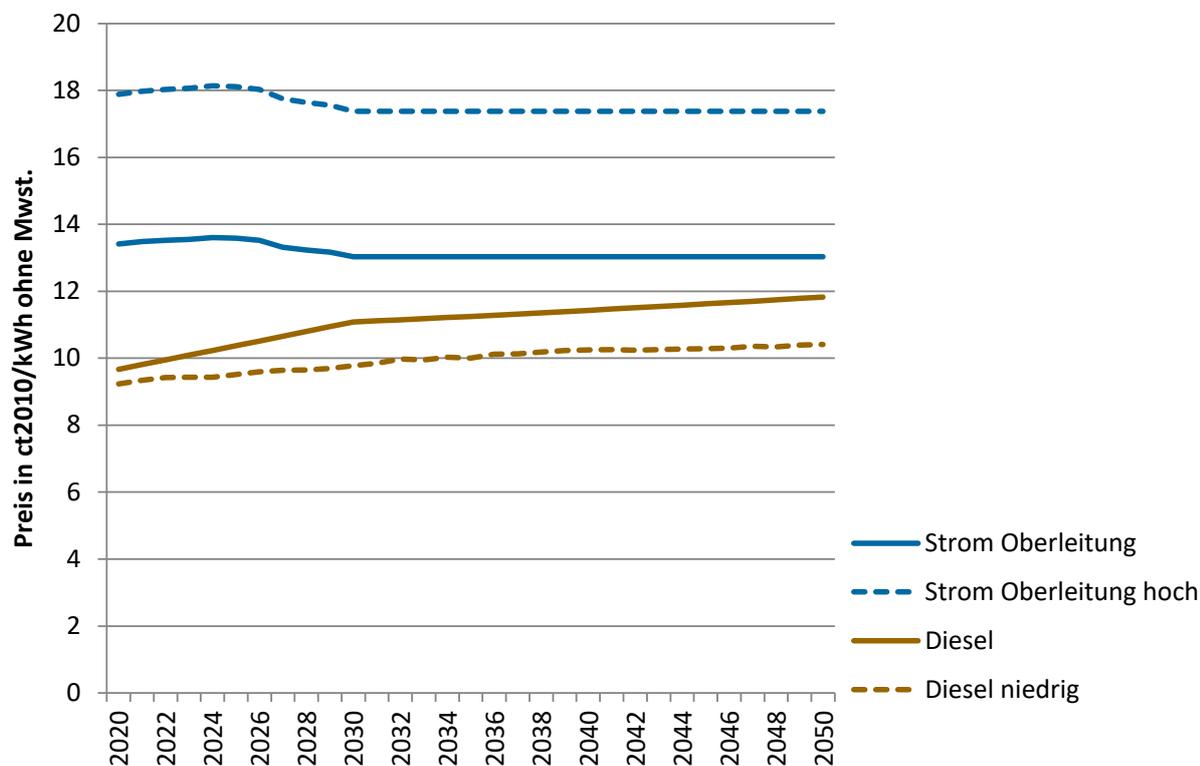
### 8.3.6. Variation von Dieselpreis und Strompreis

#### Einleitung

Da die Energiekosten wesentlich die Ergebnisse beeinflussen, werden sowohl Diesel- als auch Strompreis in einer Sensitivität variiert. In den obigen Szenarien steigt der Rohölpreis zwischen 2018 und 2030 um 52 % (analog zu den Annahmen im Technologiebericht). In einer Sensitivität (D-) wurde ein niedrigerer Anstieg des Rohölpreises in Höhe von 19 % angenommen gemäß der Klimaschutzszenarien 2050 3. Runde (2019). Es ist eine nominal konstante Dieselsteuer hinterlegt bei einer Inflationsrate von 1 %.

Der Strompreis beträgt, gemäß der bisher verwendeten Annahme, 60 % des Haushaltsstrompreises. Diese Annahme wurde im Beirat als verhältnismäßig niedrig eingeordnet. In der Sensitivität „E+“ wird daher ein erhöhter Strompreis von 80 % des Haushaltsstrompreises angenommen. Die Entwicklung des Dieselpreises und des Strompreises ist in Tabelle 8-17 und Abbildung 8-34 dargestellt.

**Abbildung 8-34: Entwicklung des Diesel- und Strompreises in ct<sub>2010</sub>/kWh**



Quelle: eigene Darstellung

**Tabelle 8-17: Diesel- und Strompreise in ct<sub>2010</sub>/kWh (ohne Mehrwertsteuer)**

	Diesel	Diesel (niedrige Sensitivität „D-“)	Strom an der Oberleitung	Strom an der Oberleitung (hohe Sensitivität „E+“)
2015	8,5	8,5		
2020	9,7	9,2	13,4	17,9
2025	10,4	9,5	13,6	18,1
2030	11,1	9,8	13,0	17,4
2040	11,4	10,2	13,0	17,4
2050	11,8	10,4	13,0	17,4

Quelle: Eigene Darstellung

**Tabelle 8-18: Übersicht über die Szenarien zu Kraftstoff- und Strompreis**

Kurzname	Beschreibung
M0	Ausgangsszenario mit Oberleitungsnetz
M0_D-	M0 mit niedrigem Dieselpreis – 0,97 €/2010/Liter in 2030 und 1,03 €/2010/Liter in 2050
M0_E+	M0 mit erhöhtem Strompreis von 80 % des Haushaltsstrompreises
M80	CO <sub>2</sub> -Preis (80 €/t) ab 2023
M80_D-	M80 mit niedrigem Dieselpreis – 0,97 €/2010/Liter in 2030 und 1,03 €/2010/Liter in 2050
M80_E+	M80 mit erhöhtem Strompreis von 80 % des Haushaltsstrompreises

Quelle: eigene Darstellung

Die Variation der Energiepreisannahmen wird jeweils einmal gegenüber dem Szenario M0 (Ausgangsszenario mit Oberleitungsnetz) sowie gegenüber dem Szenario M80 (mit Lkw-Maut) durchgeführt.

In Tabelle 8-19 findet sich eine Übersicht über die resultierenden Energiekosten pro Kilometer im Jahr 2030. Es zeigt sich, dass im Szenario mit dem höheren Strompreis (M0\_E+) O-Lkw nur noch einen geringen Kilometerkostenvorteil vor einem Diesel-Lkw aufweisen: Während der O-BEV im Szenario M0 um fast 8 ct/km (oder 30 %) niedrigere Energiekosten hat, liegt der Vorteil in der Sensitivität „E+“ nur noch bei knapp 2 ct/km. Bei den O-HEV ist das Fahren im elektrischen Modus in der Sensitivität „E+“ sogar teurer als im Dieselpetrieb (aufgrund der angenommenen Hybridisierung des Dieselantriebs bei O-HEV). Auch in der Sensitivität mit einem niedrigeren Rohölpreis (M0\_D-) schrumpft der Kilometerkosten-Vorteil des O-BEV, allerdings weniger stark (auf noch rund 4,6 ct/km). Die Mehrinvestition in O-Lkw ist in den Sensitivitäten daher in vielen Fällen nicht mehr lohnenswert.

**Tabelle 8-19: Durchschnittliche Energiekosten in ct<sub>2010</sub>/km im Jahr 2030**

	M0	M0_E+	M0_D-
Diesel-Lkw	26,8	26,8	23,6
O-HEV/O-BEV, <i>Oberleitung</i>	19,0	25,0	19,0
O-HEV, <i>Dieselpetrieb</i>	23,0	23,0	20,1
O-BEV, <i>Batteriebetrieb</i>	18,3	23,9	18,3

Quelle: eigene Darstellung

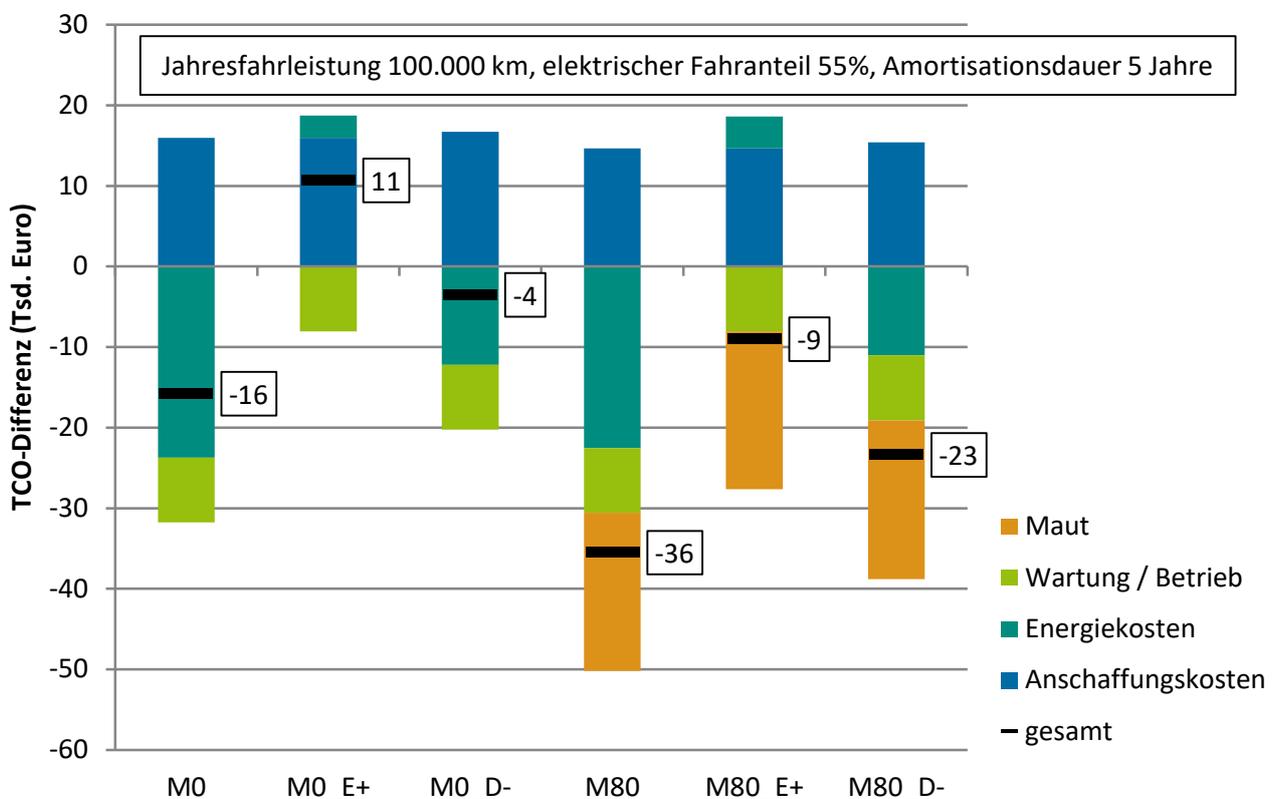
### TCO-Vergleich

Für ein beispielhaftes Nutzerprofil ist in Abbildung 8-35 die Nutzerkostendifferenz zwischen O-BEV200 und Diesel-Lkw dargestellt. Bei den angegebenen Nutzungsparametern sinkt der TCO-

Vorteil des O-BEV 200 durch einen niedrigeren Dieselpreis von 16 Tsd. auf nur noch 4 Tsd. Euro. Der höhere Strompreis hat eine noch stärkere Wirkung auf die TCO-Differenz. Bei dem betrachteten Beispiel-Profil hat der O-BEV 200 gegenüber dem Diesel in der Sensitivität „E+“ einen TCO-Nachteil von 11 Tsd. Euro.

Eine CO<sub>2</sub>-abhängige Komponente auf der Lkw-Maut in Höhe von 80 €/t wirkt sich deutlich auf den TCO-Vergleich aus. Eine Maut in Höhe von 80 €/t CO<sub>2</sub> reicht aus, um die niedrigeren Kilometerkosten bei niedrigerem Rohölpreis auszugleichen: Der TCO-Vorteil steigt von 4 Tsd. auf 23 Tsd. € und liegt also höher als in M0 (16 Tsd. Euro). Im Szenario mit höherem Strompreis hat das untersuchte Profil auch wieder einen TCO-Vorteil (von 9 Tsd. Euro), allerdings reicht der CO<sub>2</sub>-Preis in diesem Fall nicht aus, um den höheren Strompreis zu kompensieren.

**Abbildung 8-35: TCO-Vergleich: TCO-Differenz eines O-BEV200 gegenüber einem Diesel-Lkw**



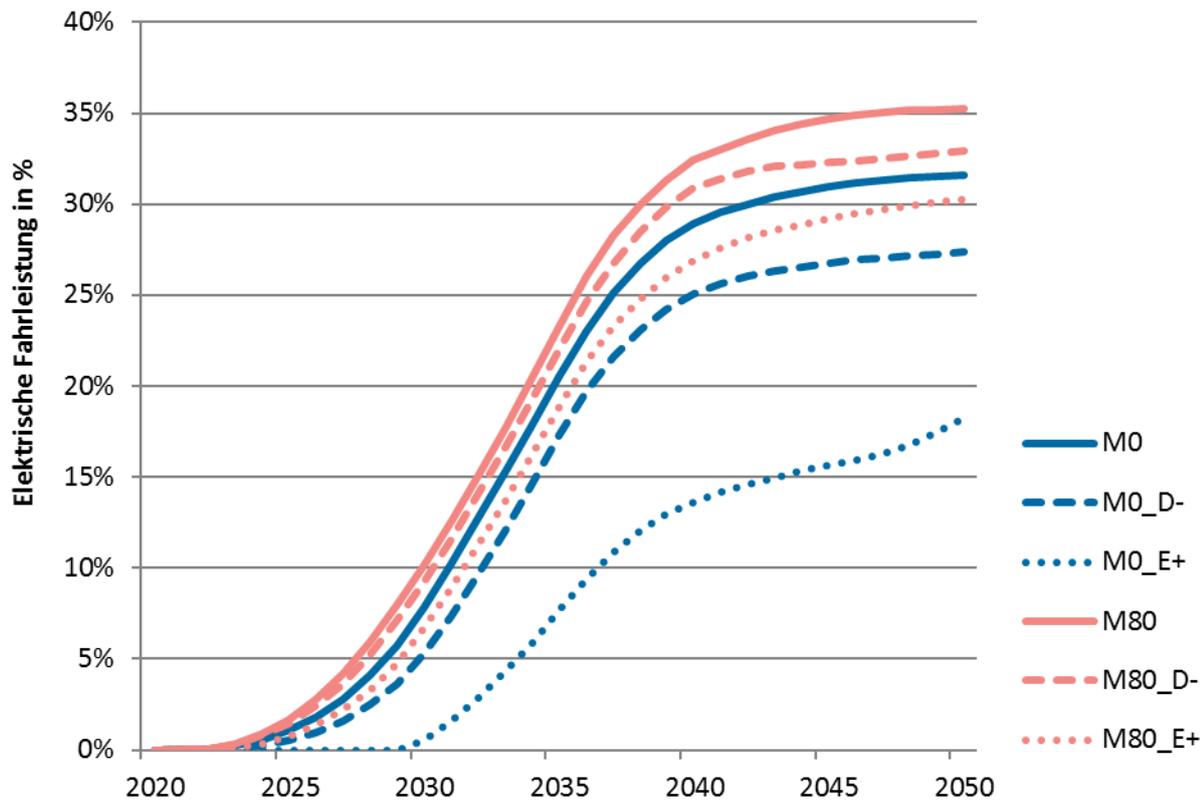
Quelle: eigene Darstellung

### Elektrische Fahrleistungen

Sowohl ein niedrigerer Dieselpreis als auch ein höherer Strompreis wirken dämpfend auf die erzielten elektrischen Fahrleistungen von O-Lkw. In Abbildung 8-36 ist die Entwicklung der elektrischen Fahrleistung über die Jahre dargestellt. Der Einfluss der Preisvariation ist beim Szenario M0 grundsätzlich stärker ausgeprägt als beim Szenario M80, was sich aus den obigen TCO-Überlegungen plausibel erklären lässt. Bei einem erhöhten Strompreis erreicht der elektrische Fahranteil im Szenario M0 bis 2050 nur 18 %, während im Szenario M80 dennoch rund 30 % erreicht werden. Grund hierfür ist, dass im Szenario M0 der TCO-Vorteil durch den fehlenden Anreiz grundsätzlich niedriger

ausfällt und daher bei veränderten Rahmenbedingungen schneller in einen TCO-Nachteil umschlagen kann.

**Abbildung 8-36: Anteil der elektrischen Fahrleistung bei Variation der Kraftstoff- und Strompreise im Jahr 2030**



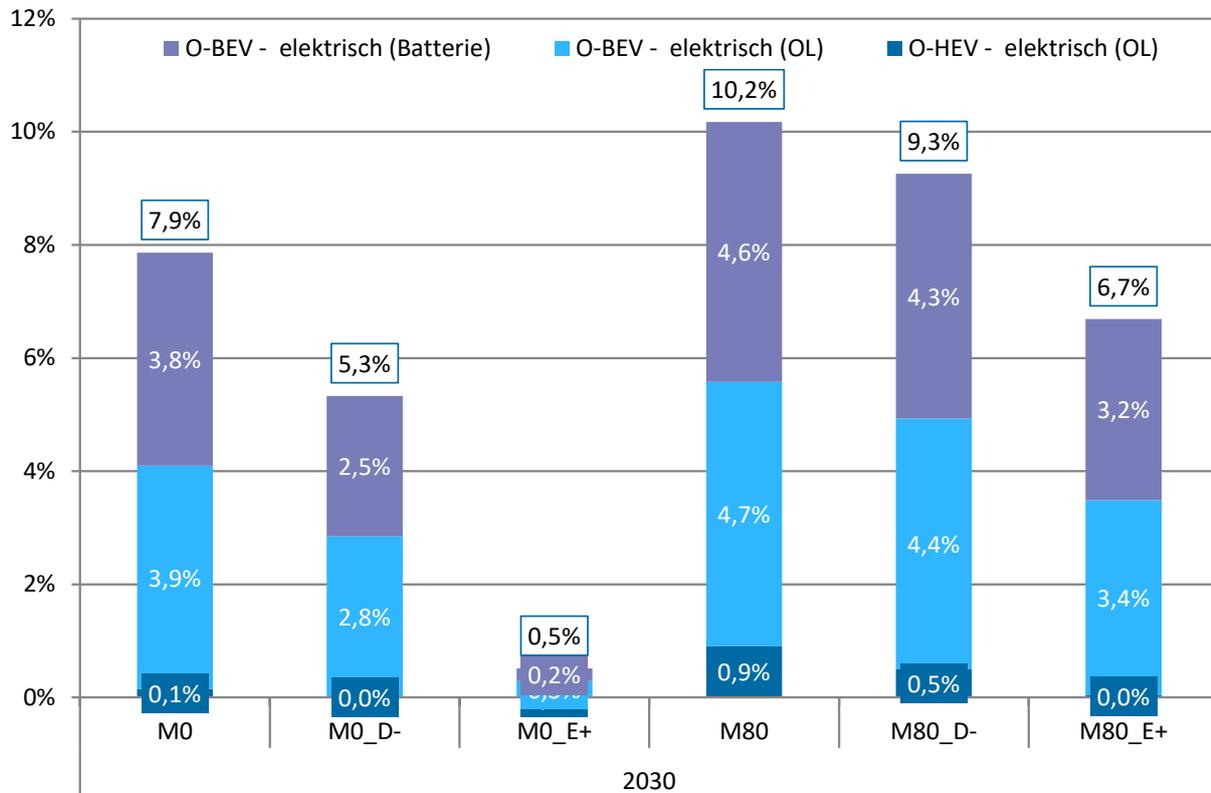
Quelle: eigene Darstellung

In Abbildung 8-37 ist die Verteilung der elektrischen Fahrleistung der Antriebsoptionen für das Jahr 2030 detailliert dargestellt.

Vor allem die Wirtschaftlichkeit von O-HEV geht durch den höheren Strompreis stark zurück. Ursache dafür ist, dass der TCO-Vorteil von O-HEV aufgrund der höheren Fahrzeuganschaffungspreise niedriger ausfällt als der TCO-Vorteil von O-BEV, und somit mehr Profile die Wirtschaftlichkeitsschwelle unterschreiten.

Relativ bezogen auf die elektrische Fahrleistung des Vergleichsszenario M80 ist der Einfluss der Sensitivitäten auf die elektrischen Fahranteile im Jahr 2030 größer als im Jahr 2040. Hintergrund ist eine grundsätzliche Steigerung der Attraktivität von O-Lkw mit zunehmendem Netzausbau.

**Abbildung 8-37: Anteil der elektrischen Fahrleistung bei Variation der Kraftstoff- und Strompreise im Jahr 2030**



Quelle: eigene Darstellung

## Zwischenfazit

Die Sensitivätsbetrachtungen zeigen, dass - wie zu erwarten - die Sensitivität des Strompreises (+30 % höherer Strompreis in 2030) einen größeren Einfluss auf den Rückgang der elektrischen Fahrleistung hat als die Dieselpreissensitivität (-12 % niedrigerer Dieselpreis in 2030). Insbesondere bei dem höheren Strompreis wird für sehr viele Profile die Wirtschaftlichkeitsschwelle für O-Lkw unterschritten. Der Markthochlauf verschiebt sich dann nach hinten und erreicht auch mittelfristig nur niedrigere Anteile. Durch eine Lkw-Maut in Höhe von 80 €/t kann der TCO-Vorteil von O-Lkw bereits für einige (aber nicht alle) Profile stabilisiert werden. Bei ungünstiger Entwicklung der Energiekosten wären also noch höhere Mautspreizungen notwendig, um einen stabilen TCO-Vorteil des O-Lkw zu garantieren.

### 8.3.7. Variation des Netzausbaus

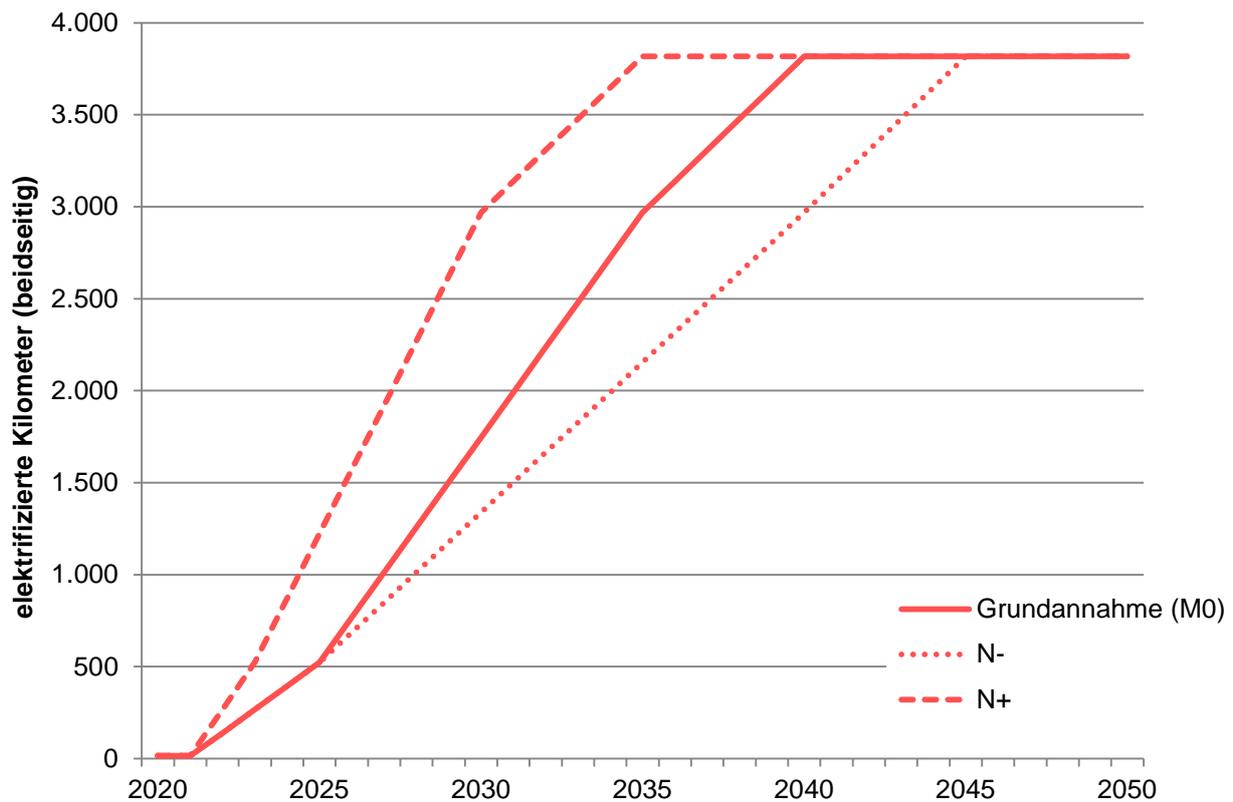
#### Einleitung

Nach Einschätzung einiger Mitglieder des Projektbeirats könnten bestimmte Restriktionen wie z. B. die Verfügbarkeiten der Stromnetz-Infrastruktur, Verfügbarkeiten von Materialien (Rohstoffe), sowie begrenzte Dienstleister-Kapazitäten (z. B. in der Bauwirtschaft) dazu führen, dass der bisher unterstellte Netzausbau sich als zu optimistisch erweist. Andererseits könnte gegebenenfalls unter forcierten Anstrengungen auch ein schnellerer Markthochlauf realisiert werden. Daher wurden zwei

Sensitivitäten mit schnellerem (M80\_N+) und langsamerem Markthochlauf betrachtet (M80\_N-). Abbildung 8-38 veranschaulicht die Entwicklung der elektrifizierten Kilometer.

Im Ausgangsszenario werden im Zeitraum 2025-2035 jährlich 245 Kilometer Netz elektrifiziert und das Kernnetz wird bis 2035 mit einem Elektrifizierungsgrad von 70 % aufgebaut; bis 2040 ist es zu 90 % elektrifiziert. In der Variante „N+“ wird der Netzaufbau um 5 Jahre beschleunigt und das Kernnetz mit einem Elektrifizierungsanteil von 70 % bereits bis 2030 aufgebaut. Das bedeutet, dass im Zeitraum 2025-2030 jährlich 350 Kilometer Netz elektrifiziert werden. In der langsamen Variante (N-) verzögert sich der Aufbau mit 70 % bis 2040; das entspricht einer jährlichen Elektrifizierung von 163 Kilometern.

**Abbildung 8-38: Varianten der Netzausbaugeschwindigkeit**

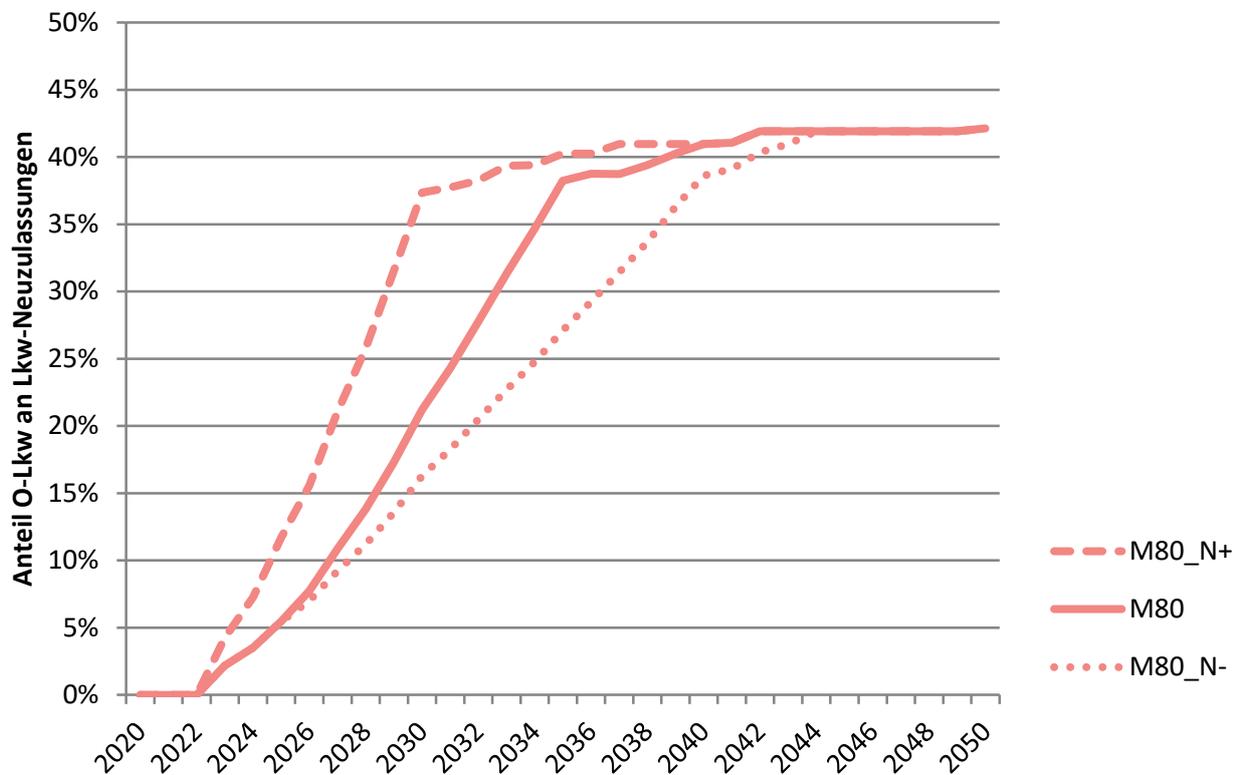


Quelle: eigene Darstellung

### Neuzulassungsanteile

Der variierte Netzausbau zeigt sich deutlich in den Neuzulassungsanteilen (Abbildung 8-39): Wird das Netz schneller ausgebaut, werden auch früher hohe Anteile an den Lkw-Zulassungen erreicht, da sich höhere elektrische Fahranteile realisieren lassen und diese einen Kostenvorteil generieren. Wird das Netz langsamer ausgebaut, so steigen auch die Neuzulassungen deutlich langsamer an.

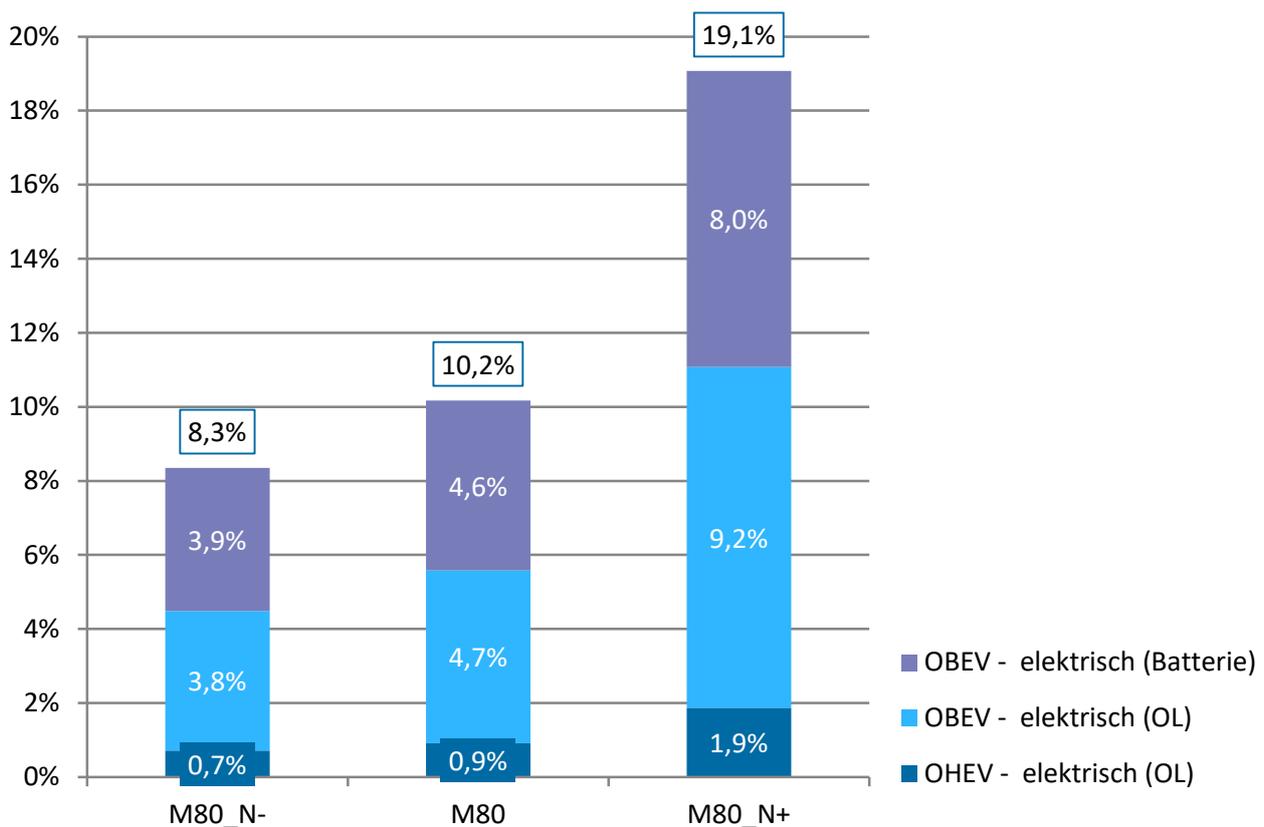
**Abbildung 8-39: Entwicklung der Neuzulassungen (O-HEV und O-BEV) bei Variation des Netzausbaus**



Quelle: eigene Darstellung

### Elektrische Fahrleistungen

Durch einen beschleunigten Netzausbau ließe sich theoretisch bereits im Jahr 2030 der elektrische Fahrleistungsanteil von rund 10 % auf fast 20 % deutlich erhöhen (Abbildung 8-40). Ein langsamerer Netzausbau führt hingegen zu einem niedrigen elektrischen Fahranteil von 8 %.

**Abbildung 8-40: Elektrische Fahrleistungen im Jahr 2030 bei Variation des Netzausbaus**

Quelle: eigene Darstellung

### Zwischenfazit

Der Grad des Netzausbaus stellt eine wesentliche Restriktion für den Markthochlauf dar. Mit einem zügigen Netzausbau (d. h. das „Kernnetz“ von rund 4.200 km ist bereits bis 2030 zu 70 % elektrifiziert) lässt sich – theoretisch – bereits 2030 ein deutlich höheres Potenzial an elektrischer Fahrleistung heben. Hierfür müssten aber ab 2021 250 km Autobahn pro Jahr (in beiden Richtungen) elektrifiziert werden. Eine weitere Voraussetzung für diesen beschleunigten Markthochlauf ist die ökonomische Attraktivität sowie Verfügbarkeit der Fahrzeuge.

### 8.3.8. Wechselwirkung mit den EU-Lkw-Standards

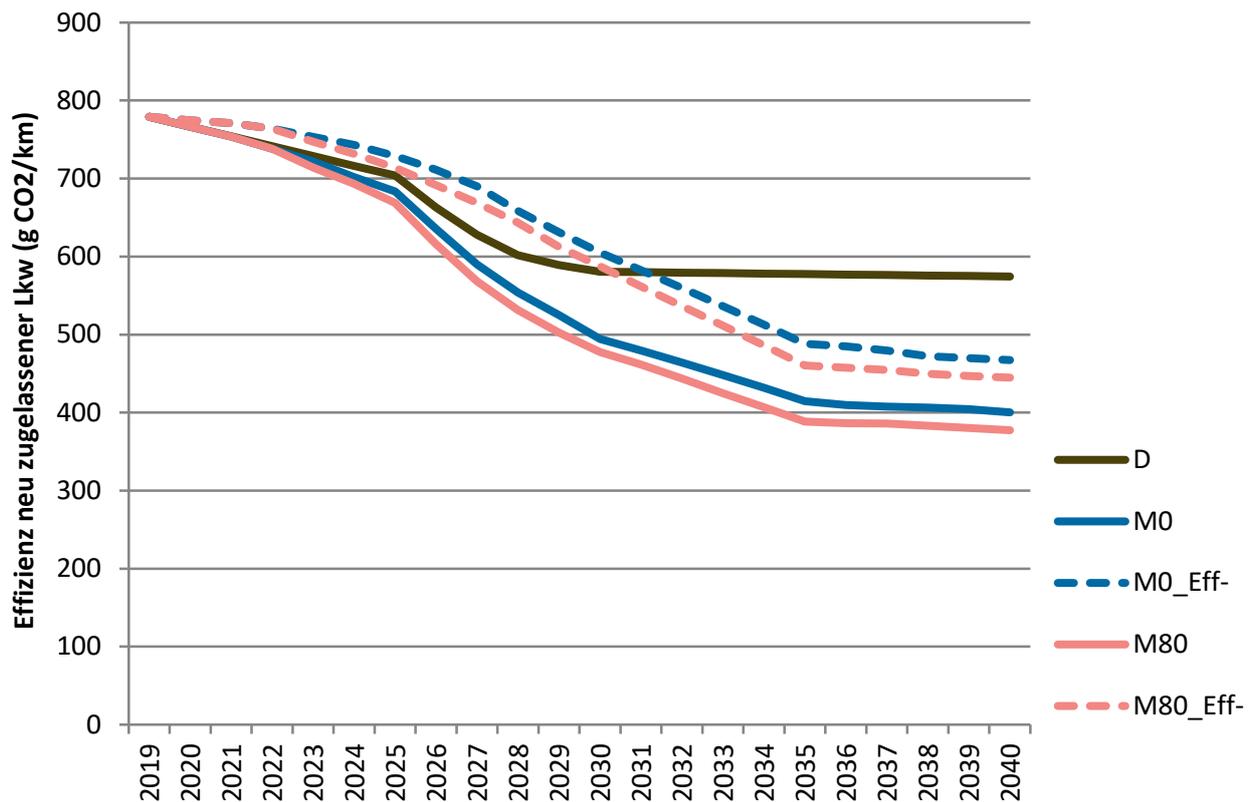
#### Einleitung

In den bisherigen Szenarien wurde angenommen, dass die Effizienzentwicklung der Diesel-Lkw vom zunehmenden Einsatz der O-Lkw nicht beeinflusst wird. Die EU-Standards geben eine Reduktion von nominal 30 % für die Lkw-Flotte im Zeitraum 2019-2030 vor. Da auch die O-Lkw einen Beitrag zur Erfüllung der Lkw-Standards leisten, besteht die Möglichkeit, dass im Gegenzug die Effizienzsteigerung von Diesel-Lkw niedriger ausfällt. Im Folgenden werden daher Sensitivitäten betrachtet, in denen angenommen wird, dass die Diesel-Lkw nur wenig effizienter werden (0,5 % p.a.). Die EU-Standards werden dabei dennoch durch den zunehmenden Anteil von O-Lkw erfüllt bzw. nahezu erfüllt.

## Effizienzentwicklung Lkw-Neuzulassungen

Betrachtet man die Effizienzentwicklung der Neuzulassungen über die Zeit, zeigt sich der Einfluss der EU-Standards für Lkw (Abbildung 8-41 und Abbildung 8-42). Bis zum Jahr 2030 verringern sich im Diesel-Szenario die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der neu zugelassenen Diesel-Lkw um 26 % gegenüber 2019. Dass die Effizienzsteigerung etwas niedriger liegt als die in der EU-Regulierung vorgeschriebenen 30 %, liegt daran, dass bereits ein Teil der Standards über die Anrechnung von elektrischen Bussen erreicht werden kann.

**Abbildung 8-41: Entwicklung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen neu zugelassener Last- und Sattelzüge, 2019-2040**

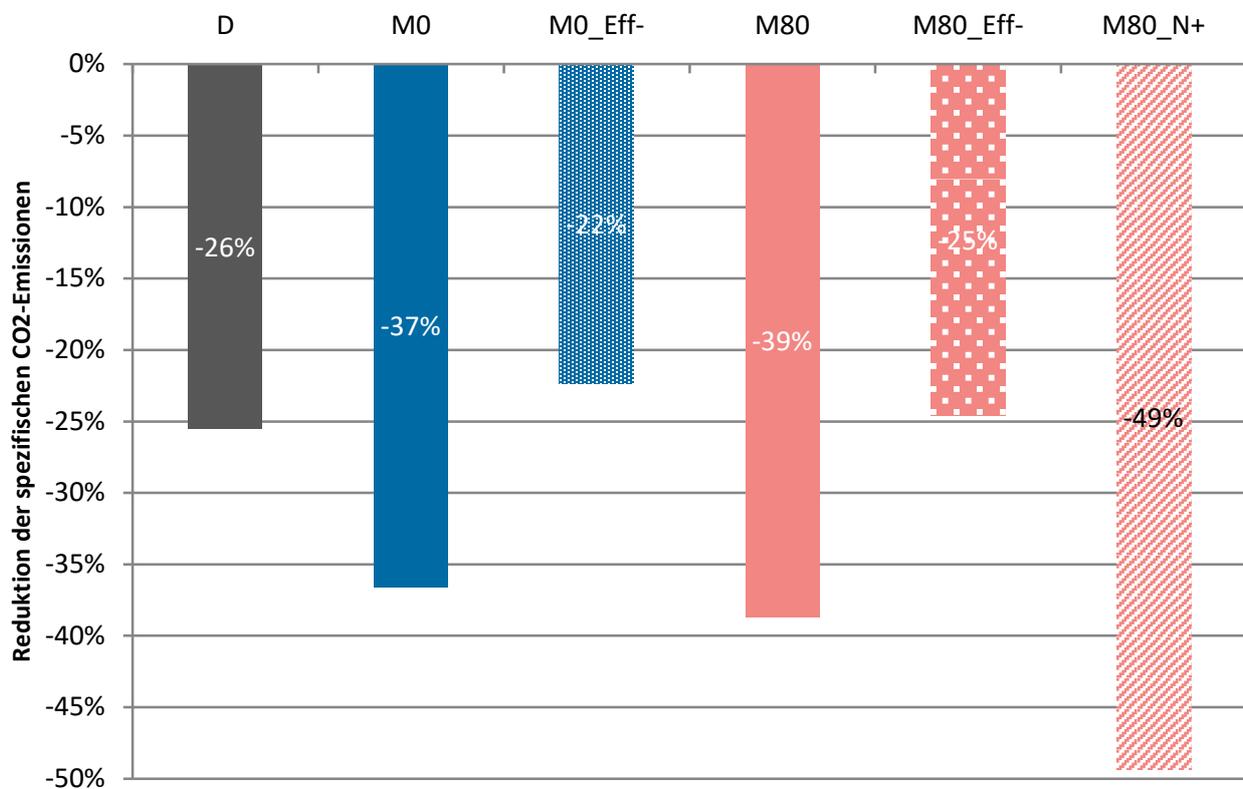


Quelle: eigene Darstellung

Wenn zur Effizienzsteigerung von Diesel-Lkw noch ein höherer Anteil von O-Lkw hinzukommt, sinken die spezifischen Emissionen bis 2030 deutlich stärker, und zwar um 37 % im Szenario M0 bzw. 39 % im Szenario M80. Bei einem schnelleren Netzausbau (M80\_N+) und einem entsprechend höheren Anteil von O-Lkw wird sogar eine Reduktion von fast 50 % erreicht (Abbildung 8-42).

Andererseits zeigen die Betrachtungen: Die EU-Lkw-Standards können unter der Voraussetzung eines erfolgreichen Markthochlaufs von O-Lkw auch ohne deutliche Effizienzsteigerung von Diesel-Lkw eingehalten werden. Die Erhöhung der Effizienz neu zugelassener Last- und Sattelzüge im Szenario M80\_Eff- von 25 % entspricht knapp dem Effekt der EU-Lkw-Standards von 26 %. Während sich der spezifische Verbrauch von Diesel-Lkw in dem Zeitraum nur um 5 % reduziert, wird der wesentliche Beitrag dazu durch einen steigenden Anteil von elektrischen Lkw erreicht.

**Abbildung 8-42: Reduktion der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen neu zugelassener Last- und Sattelzüge zwischen 2019 und 2030**

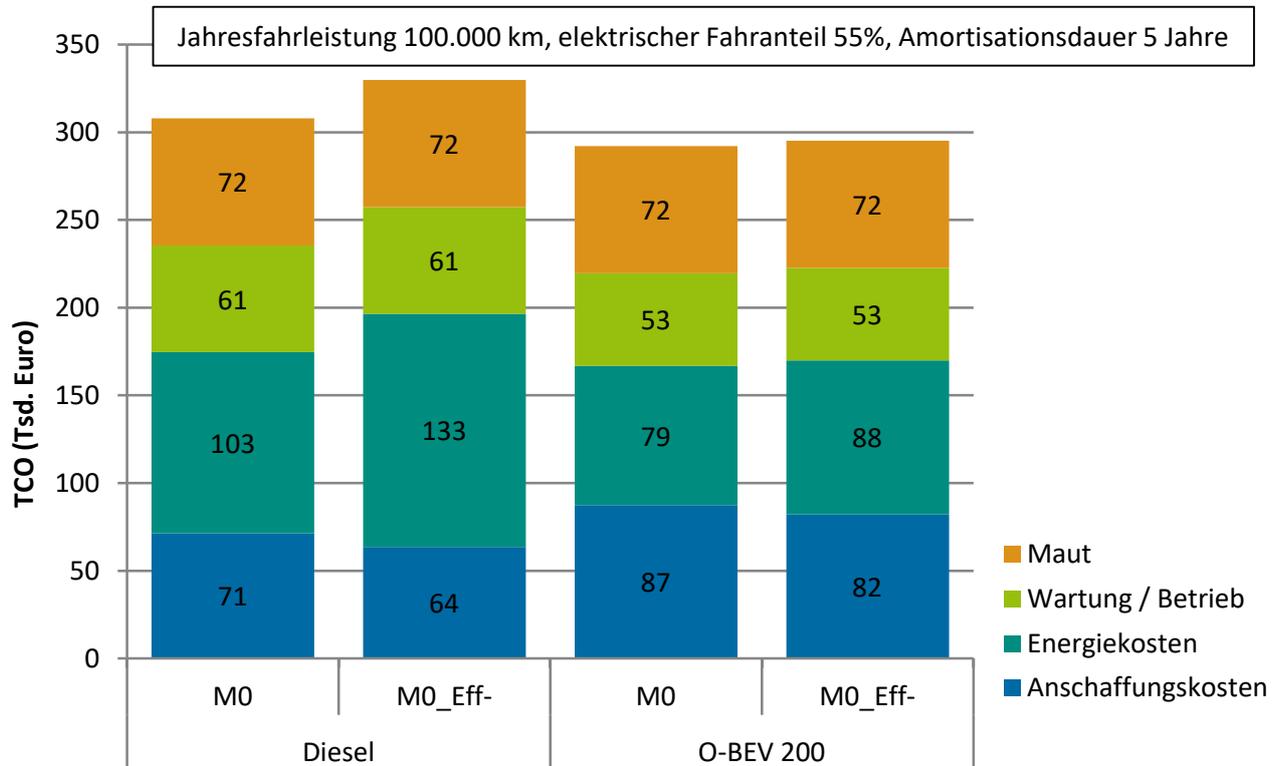


Quelle: eigene Darstellung

### TCO-Vergleich

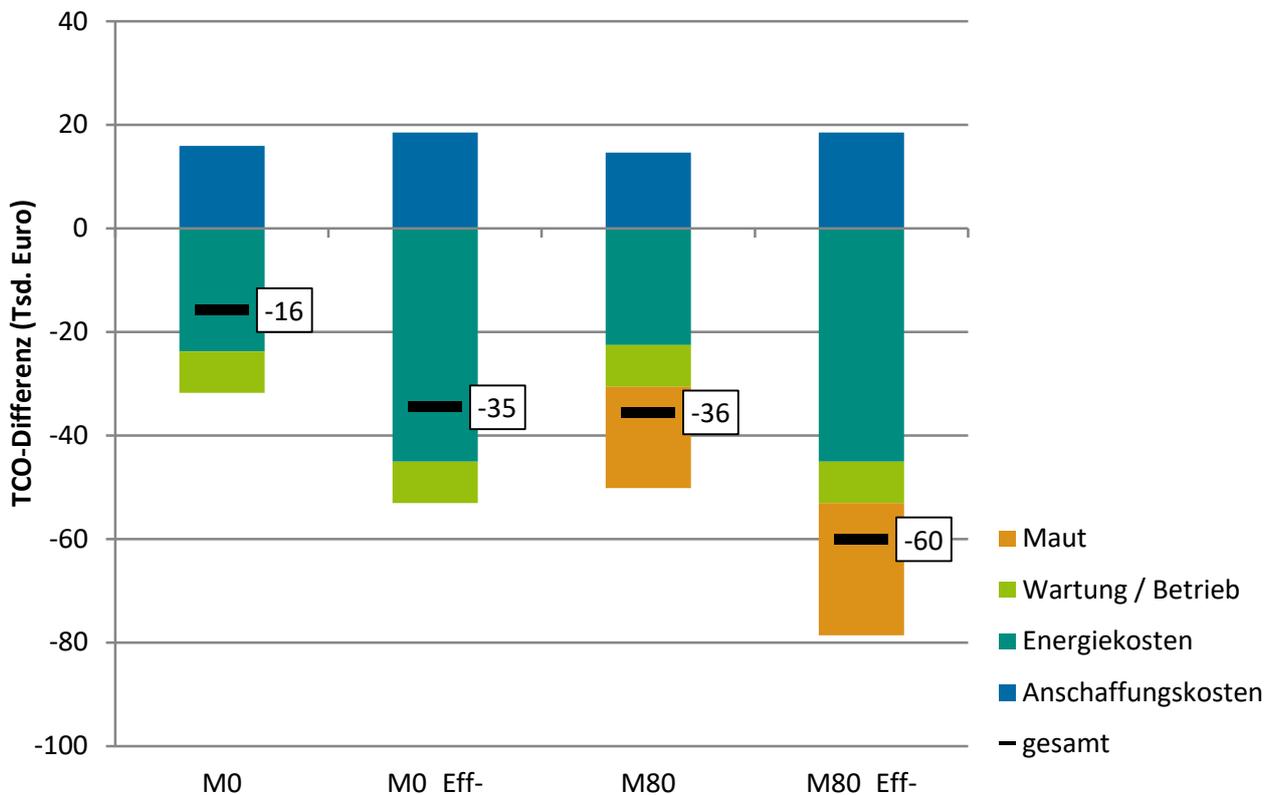
Bei Diesel-Lkw fallen im Szenario M80\_Eff- und M0\_Eff- durch die niedrigere Energieeffizienz höhere Energiekosten an. Gleichzeitig sind die Fahrzeuge etwas günstiger in der Anschaffung, da Effizienztechnologien nicht verbaut werden. In Abbildung 8-43 sind die TCO-Kosten für ein beispielhaftes Nutzerprofil im Vergleich zwischen Dieselfahrzeug und O-BEV 200 im Jahr 2030 mit und ohne Effizienzstandards dargestellt. Bei der Modellierung wird angenommen, dass Effizienztechnologien, welche nicht auf den Antriebsstrang wirken, bei allen Antriebsarten gleichermaßen umgesetzt werden. Daher sind im Szenario ohne Standards auch bei den O-Lkw der Energieverbrauch und damit die Energiekosten höher. Aufgrund der hohen Energiekosten der Diesel-Lkw erzielen O-Lkw in den entsprechenden Szenarien dennoch einen erheblich größeren TCO-Vorteil (Abbildung 8-44).

**Abbildung 8-43: Beispielhafter TCO-Vergleich von Diesel und O-BEV 200 im Jahr 2030 mit und ohne Lkw-Standards (Nutzerprofil: siehe Abbildung)**



Quelle: eigene Darstellung

**Abbildung 8-44: TCO-Differenz des O-BEV 200 gegenüber dem Diesel-Lkw im Jahr 2030 mit und ohne Lkw-Standards (Nutzerprofil: siehe Abbildung)**

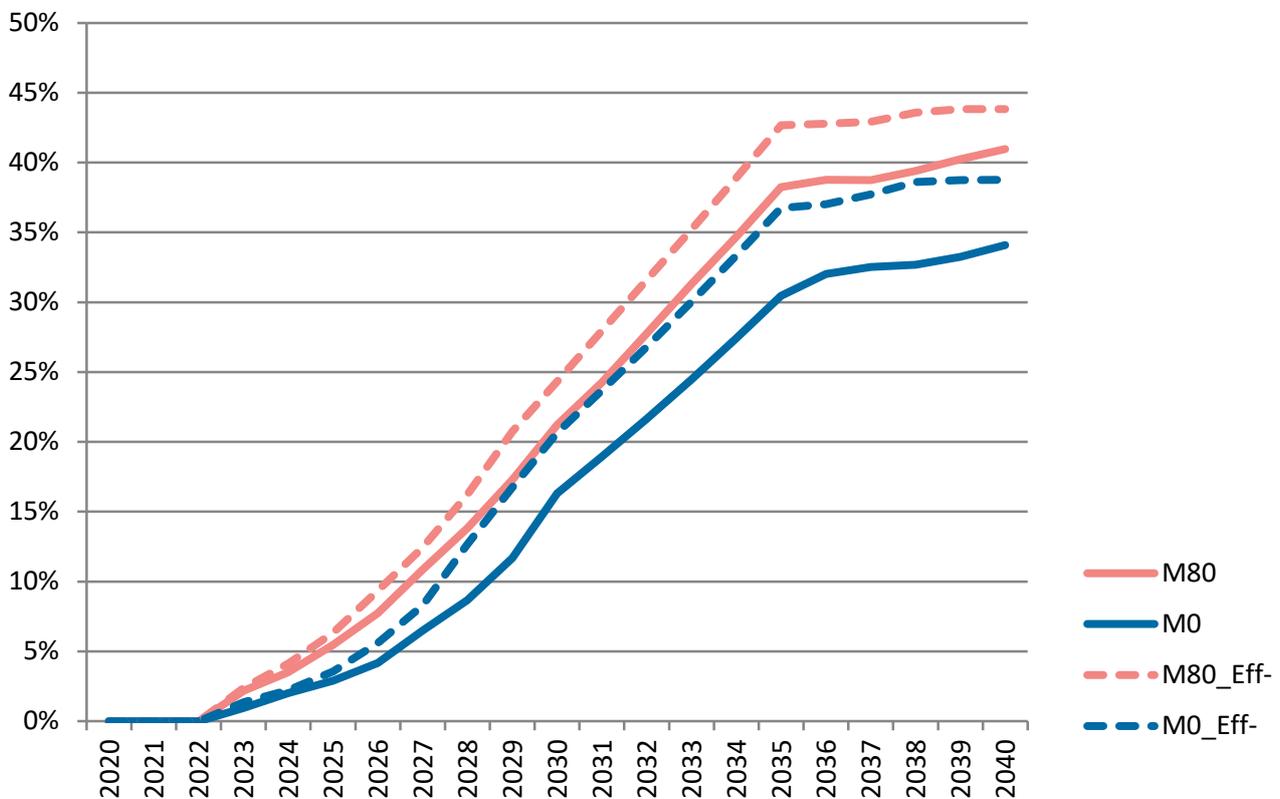


Quelle: eigene Darstellung

## Neuzulassungen

Neben dem Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen wirkt – wie oben dargestellt – die Effizienzentwicklung von Diesel-Lkw auch auf die relative Wirtschaftlichkeit der unterschiedlichen Antriebsalternativen. Bei niedrigerer Effizienz der Diesel-Lkw haben die O-Lkw einen etwas höheren TCO-Vorteil, so dass insgesamt der Anteil elektrischer Lkw an den Neuzulassungen nach den Modellergebnissen höher ausfällt (Abbildung 8-45). Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist jedoch in diesen Szenarien trotzdem geringer (siehe Abschnitt 8.4), da die geringe Effizienzsteigerung der Diesel-Lkw einen spürbaren Einfluss hat.

**Abbildung 8-45: Entwicklung der Neuzulassungen (O-HEV und O-BEV) mit und ohne Effizienzstandards**



Quelle: eigene Darstellung

### Zwischenfazit

Die Szenarien zeigen, dass die Wechselwirkungen von einem höheren elektrischen Anteil bei neuen Lkw und den EU-CO<sub>2</sub>-Standards sehr relevant sein können. Wenn es zu einem deutlichen Markthochlauf von O-Lkw bis 2030 kommt, leisten diese bereits einen deutlichen Beitrag zur Erfüllung der Lkw-Standards. Damit es trotzdem ausreichend Anreize gibt, dass die bestehenden (und oft ökonomischen) Kostenpotenziale bei verbrennungsmotorischen Lkw gehoben werden, sind mehrere Politikinstrumente denkbar - beispielsweise deutlich verschärfte CO<sub>2</sub>-Standards für Lkw, oder aber ökonomische Anreize zum Realisieren von Effizienzpotenzialen über einen CO<sub>2</sub>-Preis auf der Lkw-Maut.

In den dargestellten Modellrechnungen konnte die mögliche Wirkung von Energiepreisen bzw. CO<sub>2</sub>-Preisen auf die Effizienzentwicklung von Lkw nicht modellendogen berücksichtigt werden. Grund dafür ist, dass es keine ausreichend belastbare und repräsentative Datenbasis dazu gibt, in welchem Ausmaß Effizienzkriterien bei der Fahrzeugwahl berücksichtigt werden. Viele Anzeichen sprechen dafür, dass entgegen der Erwartung auch im Güterverkehr nicht nur nach ökonomischen Kriterien entschieden wird. Denn ansonsten würden bestimmte günstige Effizienztechnologien bereits heute deutlich stärker nachgefragt als das zu beobachten ist. Diese Entscheidungssituation des Fahrzeugkaufs und die dabei wesentlichen Kriterien sind auch für den Markthochlauf von O-Lkw sehr relevant; hier besteht daher weiterer Forschungsbedarf.

## 8.4. Strombedarf und THG-Minderungsbeitrag in den Szenarien

### 8.4.1. Einleitung und Übersicht über die Szenarien

In Tabelle 8-20 ist eine Übersicht über alle Szenarien und Sensitivitäten dargestellt, die im Rahmen der Modellierung des Markthochlauf von O-Lkw untersucht wurden. In diesem Kapitel sollen die Auswirkungen der Szenarien auf Endenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde dafür eine Auswahl besonders interessanter Szenarien getroffen; diese Auswahl ist in der Tabelle fett dargestellt.

**Tabelle 8-20: Übersicht über die Szenarien**

Kurzname	Beschreibung
<b>D</b>	<b>Vergleichsszenario ohne Oberleitungsnetz („Dieselszenario“)</b>
<b>M0</b>	<b>Ausgangsszenario mit Oberleitungsnetz ohne Mautbefreiung</b>
<b>M0_ohne_OBEV</b>	<b>M0 ohne O-BEV-Verfügbarkeit</b>
M0_D-	M0 mit niedrigem Dieselpreis – 0,97 €/2010/Liter in 2030 und 1,03 €/2010/Liter in 2050 (in 2030 12 % niedriger als in M0)
<b>M0_E+</b>	<b>M0 mit erhöhtem Strompreis (30 % höher als in M0)</b>
M0_investcost+	M0 mit erhöhtem Anschaffungspreis O-BEV (+10.000 €/2010)
<b>M0_investcost++</b>	<b>M0 mit erhöhtem Anschaffungspreis O-BEV (+20.000 €/2010)</b>
M0_Eff-	M0 mit nur sehr geringer Effizienzsteigerung bei Diesel-Lkw (0,5 % p.a. statt 2,4 % p.a. zwischen 2020 und 2030)
<b>MB</b>	<b>komplette Mautbefreiung für O-Lkw ab 2020</b>
ME50	50 % Mautbefreiung für O-Lkw im elektrischen Fahrmodus ab 2023
<b>M80</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Preis von 80 €/t ab 2023</b>
M80_ohne_OBEV	M80 ohne O-BEV-Verfügbarkeit
M80_D-	M80 mit niedrigem Dieselpreis – 0,97 €/2010/Liter in 2030 und 1,03 €/2010/Liter in 2050 (in 2030 12 % niedriger als in M0)
M80_E+	M80 mit erhöhtem Strompreis (30 % höher als in M0)
M80_investcost+	M80 mit erhöhtem Anschaffungspreis O-BEV (+10.000 €/2010)
M80_N-	M80 und langsamer Netzausbau - 2025: 523 km (Teilnetz); 2040: 2.969 km; 2045: 3.818 km (Kernnetz)
<b>M80_N+</b>	<b>M80 und schneller Netzausbau - 2023: 523 km (Teilnetz); 2030: 2.969 km; 2035: 3.818 km (Kernnetz)</b>
<b>M80_L</b>	<b>M80 mit Nachlademöglichkeit für O-BEV an Start- und Zielort</b>

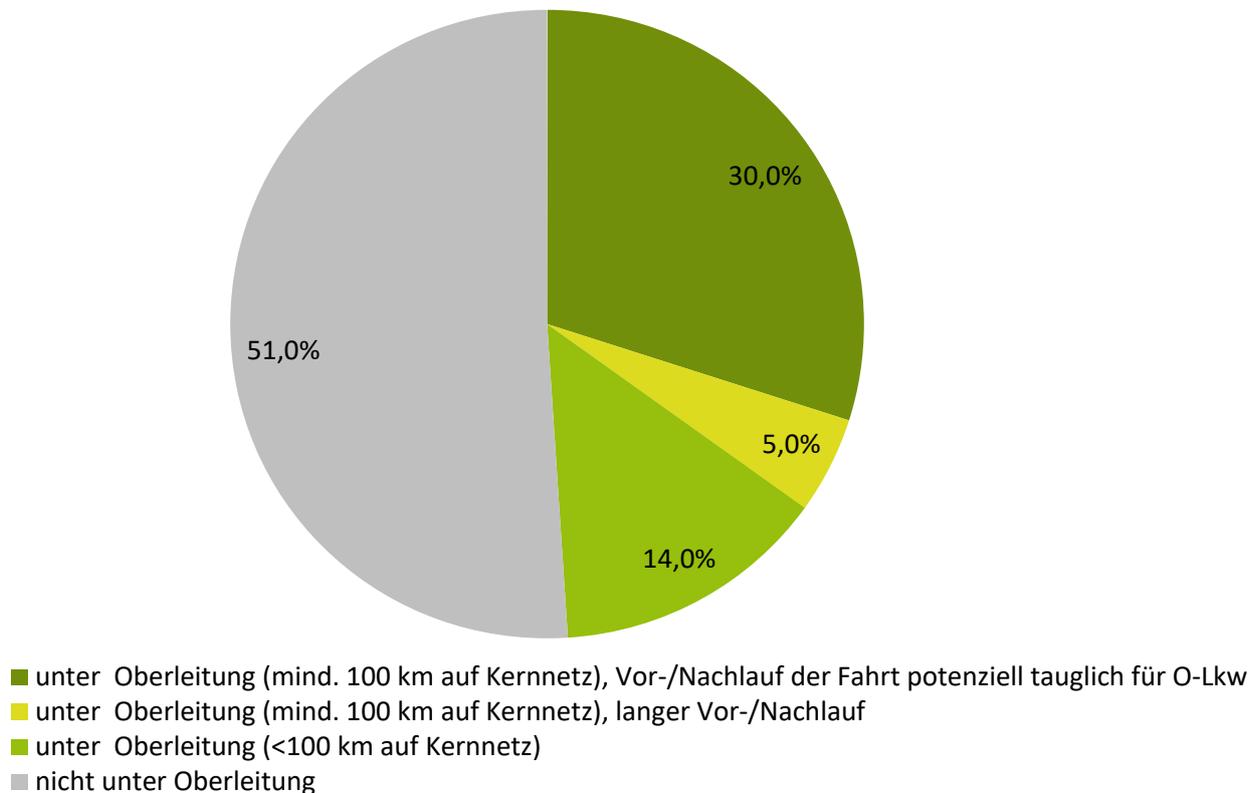
Kurzname	Beschreibung
<b>M80_Eff-</b>	<b>M80 mit nur sehr geringer Effizienzsteigerung bei Diesel-Lkw (0,5 % p.a. statt 2,4 % p.a. zwischen 2020 und 2030)</b>
M80+ME50	M80 und 50 % Mautbefreiung für O-Lkw im elektrischen Modus ab 2023
M80+MB50	M80 und 50 % Mautbefreiung für O-Lkw ab 2020
<b>M200</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Preis steigt von 80 €/t in 2023 auf 200 €/t ab 2026</b>
D_Ptx	kein O-Netz, gleiche THG-Minderung wie M0 mittels PtX-Kraftstoffe

Quelle: eigene Darstellung

#### 8.4.2. Zur Einordnung der Ergebnisse und Zusatzpotenziale durch Fahrten mit kurzem Hauptlauf

In den verkehrlichen Analysen (Kapitel 5) wurden alle territorialen Fahrten von Last- und Sattelzügen hinsichtlich ihrer Berührung mit dem Oberleitungs-Kernnetz untersucht. Daraus kann ein theoretisches Maximalpotenzial für O-Lkw-Fahrten abgeleitet werden: rund 49 % der territorialen Fahrleistung von Last- und Sattelzügen findet auf dem Kernnetz statt und ist damit potenziell direkt über die Oberleitung elektrifizierbar, ohne jegliche Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Die übrigen 51 % (in Abbildung 8-46 grau dargestellt) der Fahrleistung finden nicht unter der Oberleitung statt.

**Abbildung 8-46: Verteilung der territorialen Fahrleistung von Last- und Sattelzügen je nach Bezug zum O-Kernnetz**



Quelle: eigene Darstellung

Die detaillierten Fahrtenauswertungen, welche die Grundlage für die Modellierung darstellen, wurden nur für Fahrten mit einer Distanz >100 km auf dem Kernnetz durchgeführt. Hintergrund war die Überlegung, dass ein O-Netz insbesondere von Lkw im Fernverkehr genutzt werden würde und eine relevante Nutzung der Infrastruktur voraussetzt.

Der hellgrüne Bereich in Abbildung 8-46 enthält die Fahrleistungen mit einer Fahrtweite von je weniger als 100 km auf dem Kernnetz, die dadurch herausgefiltert wurden.

Für die Modellierung wurden zusätzlich vorab Fahrten mit sehr langem Vor- und Nachlauf herausgefiltert. Der gelbe Bereich bezieht sich auf Fahrten, bei denen die Summe aus Vor- und Nachlauf länger ist als 600 km und entweder Vor- oder Nachlauf mindestens 500 km lang ist. Dies sind zum Beispiel langlaufende internationale Verkehre. Eine wirtschaftliche Elektrifizierung dieser Fahrten würde andere Logistikkonzepte (z. B. ein Umladen von konventionellen Lkw auf O-Lkw) erfordern oder einen internationalen Netzausbau notwendig machen.

Die Fahrleistung auf dem Kernnetz mit besonders langem Vor-/Nachlauf jenseits der elektrifizierten Strecken (gelber Bereich) bzw. kürzeren Strecken <100 km auf dem Kernnetz (hellgrüner Bereich) wurde in den Potenzialanalysen also nicht berücksichtigt. Unter Berücksichtigung dieser beiden Restriktionen reduziert sich die direkt elektrifizierbare Fahrleistung von 49 % auf 30 % (in der Abbildung dunkelgrün dargestellt).

Bei den Fahrten mit einer Fahrtweite von je weniger als 100 km auf dem Kernnetz kann es sich einerseits um regionale Verkehre und Pendelverkehre handeln, die also nur vergleichsweise kurz

auf dem O-Netz unterwegs sind, aber auch kurze Vor- und Nachläufe haben. Bei einer kurzen Gesamtfahrtweite können hier also weitere wirtschaftliche Verkehre für O-Lkw enthalten sein. Zu einem unbekanntem Anteil besteht der Fahrleistungsanteil unter dem O-Lkw-Netz jedoch auch aus lang laufenden Verkehren, die nur einen kurzen Abschnitt auf dem Kernnetz unterwegs sind und einen langen Vor- und Nachlauf aufweisen (z. B. internationale Verkehre). Dies erschwert eine konkretere Einordnung des zusätzlichen Elektrifizierungspotenzials. Könnten insbesondere die kurzen Fahrten auf dem Netz ebenfalls durch O-Lkw erschlossen werden und wirtschaftlich betrieben werden, so würden sich die im vorangegangenen Kapitel diskutierten Potenziale weiter erhöhen.

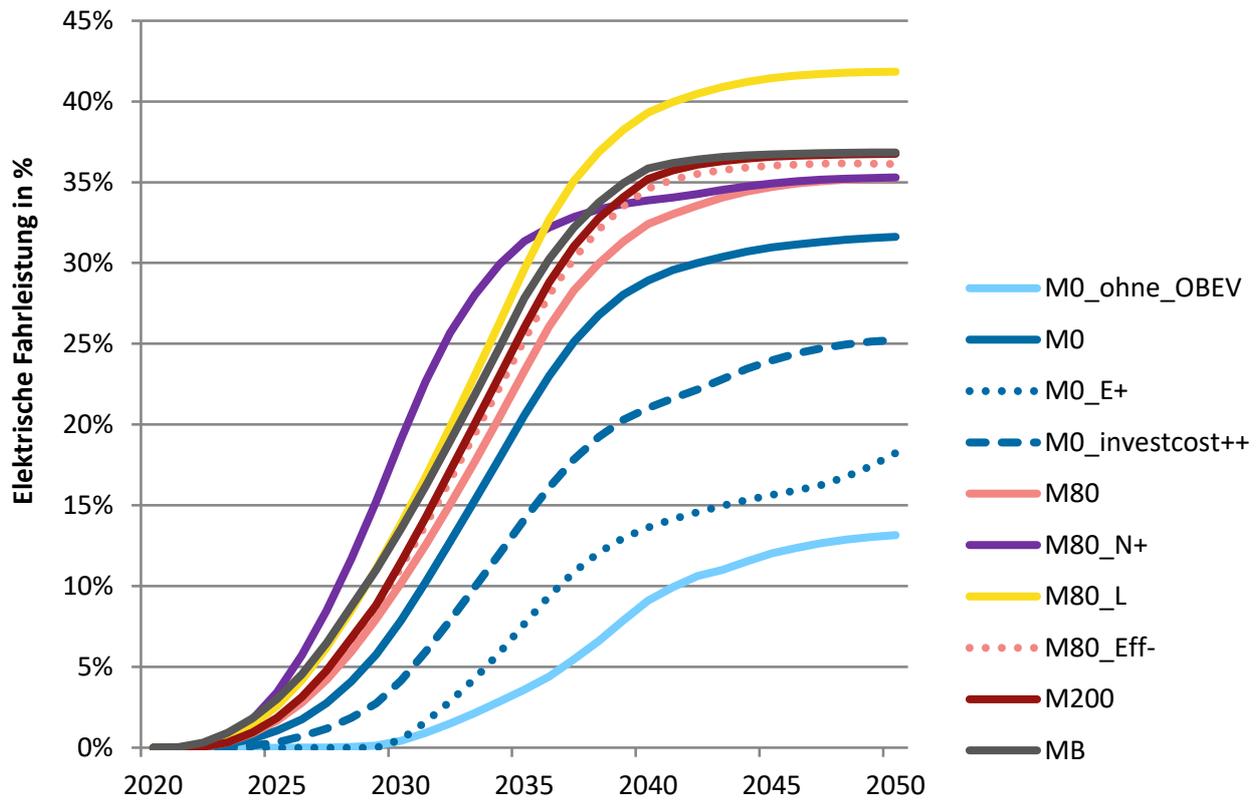
#### **8.4.3. Elektrische Fahrleistungen der O-Lkw**

Die erzielten Minderungen der THG-Emissionen der Szenarien hängen mit den jeweils elektrisch substituierten Fahrleistungen der Dieselfahrzeuge und dem daraus resultierenden Stromverbrauch zusammen.

In Abbildung 8-47 ist die Entwicklung der elektrischen Fahrleistung bezogen auf die gesamte Inlandsfahrleistung von Last- und Sattelzügen für die getroffene Auswahl der oben untersuchten Markthochlaufszenarien dargestellt. Der größte elektrische Fahranteil in Höhe von rund 42 % kann im Jahr 2050 durch das Szenario M80\_L mit einer Nachladeoption an Start- und Zielort erreicht werden.

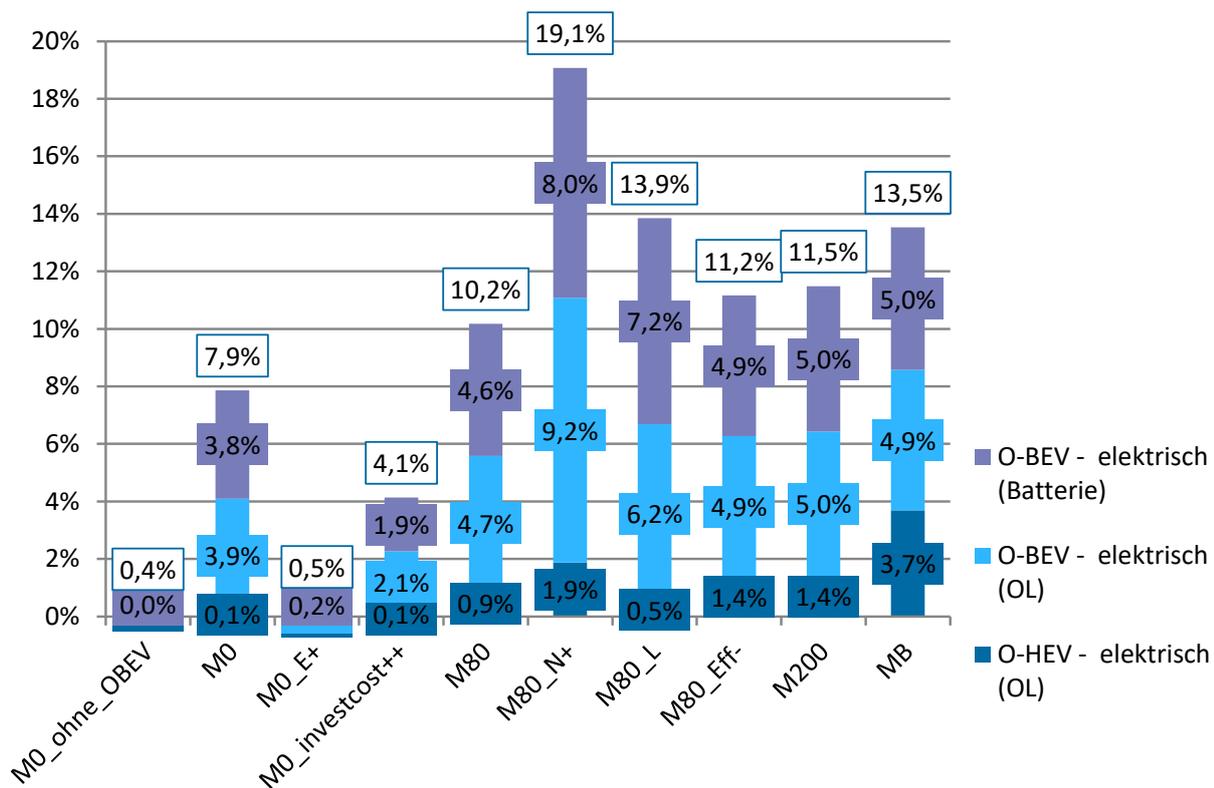
Betrachtet man die Szenarien ohne Nachladeoption, so erzielt das Szenario M200 mit einem CO<sub>2</sub>-Preis von 200 €/t den höchsten elektrischen Fahranteil mit etwa 37 %. Das Szenario M80 erzielt einen nur leicht geringeren Anteil von rund 35 %. Der relativ geringe Unterschied zeigt, dass in beiden Szenarien O-Lkw einen ausreichenden Kostenvorteil vor Diesel-Lkw generieren können und die maximale elektrische Fahrleistung auch durch die verfügbare Infrastruktur begrenzt wird. Wenn sich jedoch die Energiekosten oder Fahrzeugpreise ungünstig entwickeln, sinkt auch der elektrische Fahranteil, wie sich am Szenario M0\_E+ und dem Szenario mit höheren Investitionskosten in O-BEV (M0\_investcost++) zeigt. Das Szenario M0 erzielt im Jahr 2050 je nach Sensitivität einen elektrischen Fahranteil zwischen 13 % (ohne O-BEV) und 32 %.

Abbildung 8-47: Entwicklung des elektrischen Fahranteils von Last- und Sattelzügen



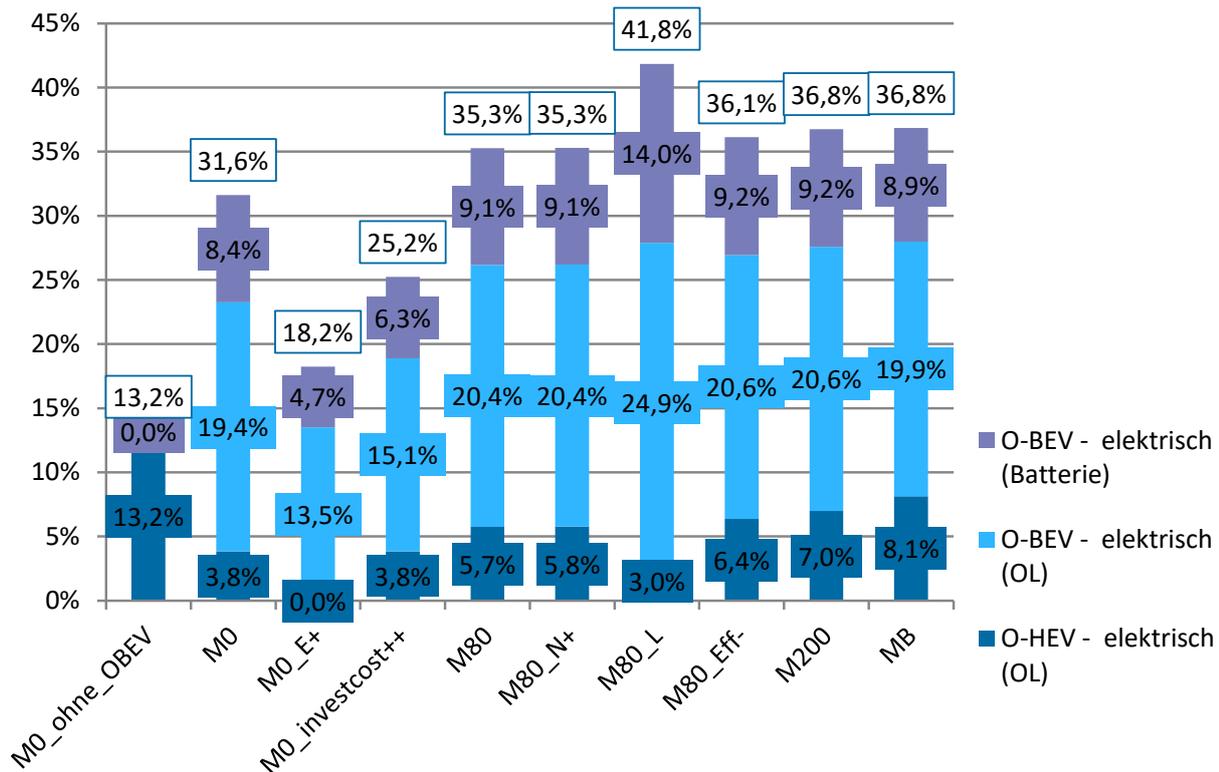
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 8-48: Elektrischer Fahranteil im Jahr 2030



Quelle: eigene Darstellung

Im Jahr 2030 unterscheiden sich die elektrischen Fahranteile zwischen den Szenarien teilweise deutlich. In mehreren betrachteten Szenarien sind O-Lkw ökonomisch für die Nutzer nicht attraktiv genug, um hohe Anteile zu erreichen. Das gilt sowohl wenn die Kosten für den Strombezug bei 80 % des Haushaltsstrompreises liegen statt bei 60 % (M0\_E+), wenn keine O-BEV verfügbar sind bzw. sich am Markt durchsetzen (M0\_ohne\_OBEV), bzw. mit höheren Investitionskosten verbunden sind (M0\_investcost++). Bei Szenarien mit einer CO<sub>2</sub>-Komponente auf der Lkw-Maut von 80 oder 200 €/t wird der TCO-Vorteil der O-Lkw stabilisiert und es können elektrische Anteile von 10-14 % erreicht werden; davon rund 5-7 % durch das batterieelektrische Fahren der O-BEV abseits der Oberleitungen. Höhere Anteile von 19 % erfordern einen deutlich schnelleren Netzausbau (M80\_N+).

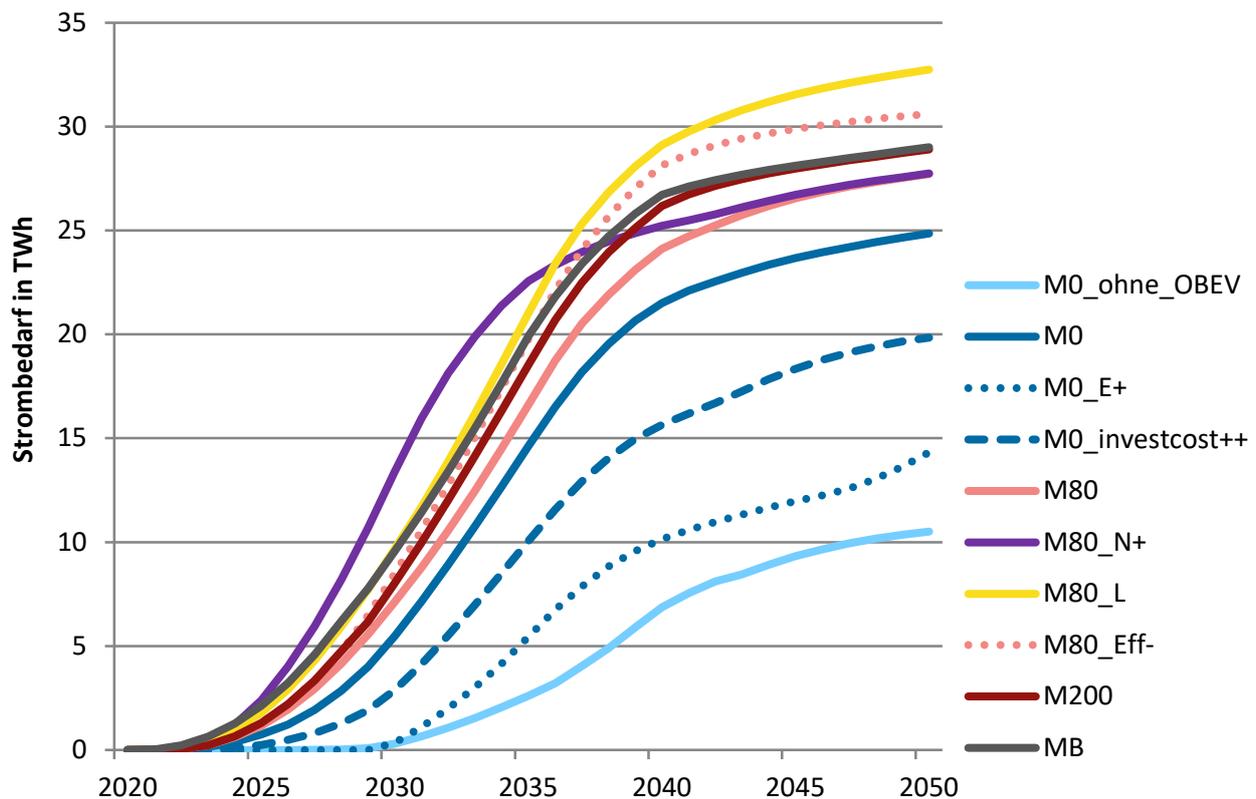
**Abbildung 8-49: Elektrischer Fahranteil im Jahr 2050**

Quelle: eigene Darstellung

Bei einer langfristigen Betrachtung bis zum Jahr 2050 (Abbildung 8-49) zeigt sich, dass sich die potenzielle elektrische Fahrleistung unter der Oberleitung in den Szenarien mit einem ausreichenden TCO-Vorteil für O-Lkw einem Wert von 30 % annähert. Dies entspricht dem methodischen Maximalpotenzial der Modellierung (siehe 8.4.2). Durch die Fahrleistung von O-BEV abseits der Oberleitung kann die elektrische Fahrleistung weiter erhöht werden – auf über 40 % bei einer Nachladeoption an Start- und Zielort. Im Jahr 2050 kann die batterieelektrische Reichweite von O-Lkw allerdings durchaus größer sein, als die in der Modellierung angenommenen 200 km. Der elektrische Fahranteil kann in diesem Fall noch höher ausfallen.

#### 8.4.4. Strombedarf

Die Abbildung 8-50 zeigt die Entwicklung des Strombedarfs durch O-Lkw. Der Verlauf ähnelt stark der Entwicklung des elektrischen Fahranteils. Nach 2040 steigt der Strombedarf weiter an, was durch die steigende Fahrleistung begründet ist. Die Wechselwirkung der Stromnachfrage durch O-Lkw mit dem Energiesektor wird im Kapitel 9 ausführlich untersucht.

**Abbildung 8-50: Entwicklung des Strombedarfs durch O-Lkw in TWh**

Quelle: eigene Darstellung

#### 8.4.5. THG-Minderungsbeitrag

Aus den oben beschriebenen elektrischen Fahranteilen und Stromverbräuchen sowie der damit einhergehenden Reduktion des Dieserverbrauchs leitet sich unter Berücksichtigung der Emissionsfaktoren der THG-Minderungsbeitrag ab.

Die direkten THG-Minderungen (TTW) entsprechen der Inventarlogik und der Abgrenzung im Klimaschutzplan (40 %-Ziel). Sie ergeben sich aus dem CO<sub>2</sub>-Gehalt des Kraftstoffs und Strom wird mit Null-emissionen bilanziert.

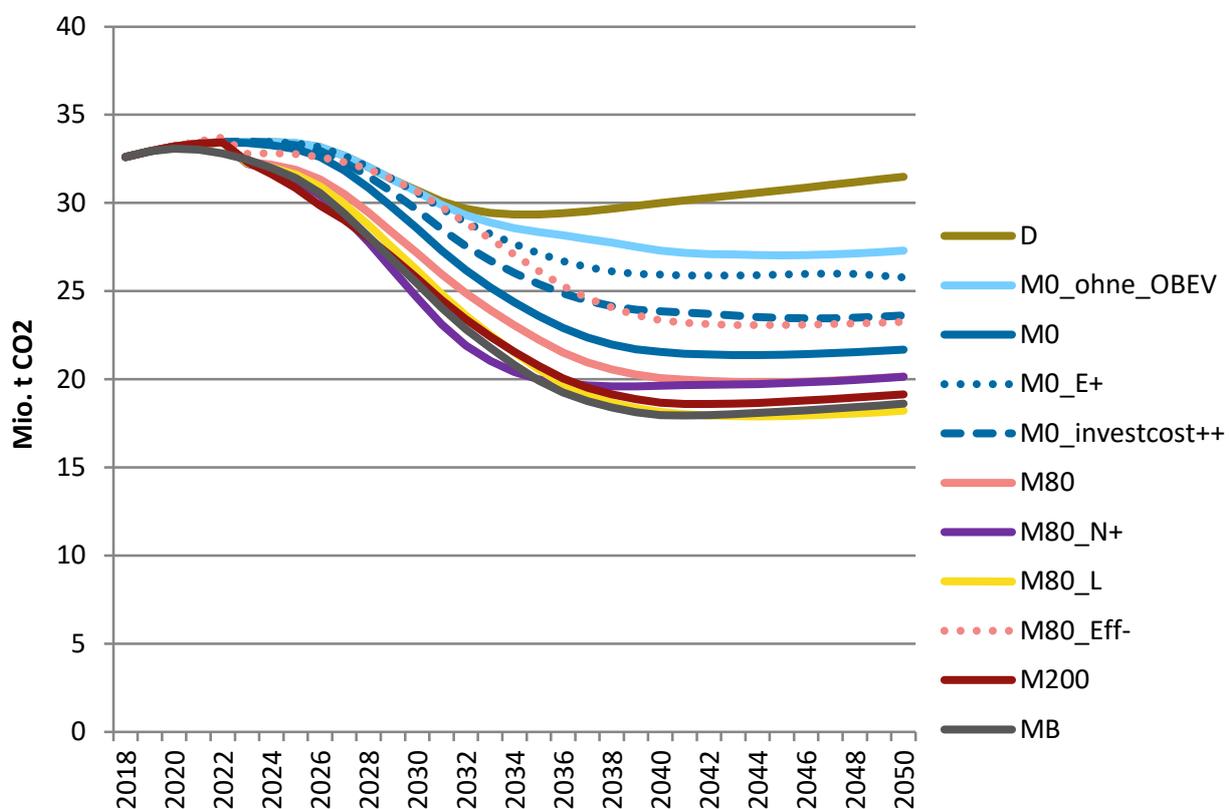
Für die WTW-Emissionen wird die Vorkette der Stromerzeugung und der Kraftstoffherstellung berücksichtigt. Für die Stromerzeugung wird ein Kohleausstieg bis 2038 gemäß der Empfehlung der „Kohlekommission“ angenommen (siehe Abschnitt 8.2.3).

Bei einer Reduktion der Transportkosten durch zunehmende Elektrifizierung kann es zu einer Zunahme der Fahrleistungen kommen (Rebound); dies gilt ebenso andersherum bei höheren Transportkosten, welche zu verbesserter Auslastung und Routenplanung und damit zu niedrigeren Fahrleistungen führen kann. Zu der Wirkung dieses Effekts werden Berechnungen unter Verwendung einer Transportkostenelastizität von -0,6 vorgenommen. In den folgenden Diagrammen sind die Änderungen THG-Reduktionen TTW und WTW unter Berücksichtigung der Wirkung auf die Fahrleistungen dargestellt. Die zugrunde liegenden Änderungen der Transportkosten und der Einfluss dieser auf die Ergebnisse werden weiter unten in Abbildung 8-54 und Abbildung 8-55 dargestellt.

## THG-Emissionen im Szenariovergleich

In Abbildung 8-51 sind die direkten THG-Emissionen der Last- und Sattelzüge für verschiedene Szenarien im Zeitverlauf dargestellt. In allen Szenarien, auch im „Dieselszenario“ (D) sinken die Emissionen zunächst aufgrund der in den Szenarien hinterlegten EU-Emissionsstandards für Lkw. Im weiteren Verlauf steigen die Emissionen im Dieselszenario durch die zunehmende Fahrleistung und ausbleibenden weiteren Maßnahmen zur Emissionsminderung wieder an. Die Szenarien mit O-Lkw erzielen - je nach Ausgestaltung – demgegenüber teils deutliche THG-Minderungen. Dabei wird die größte Minderung durch das Szenario M80\_L mit Nachladeoption am Start- und Zielort erreicht. Das Szenario M200 mit einem CO<sub>2</sub>-Preis von 200 €/t erreicht eine nur leicht geringere THG-Minderung. Das Szenario M80\_N+ mit einem schnelleren Netzausbau führt langfristig zur gleichen Minderung wie das Szenario M80, kann jedoch frühzeitig höhere Einsparungen erzielen.

**Abbildung 8-51: Direkte THG-Emissionen der Last- und Sattelzüge**

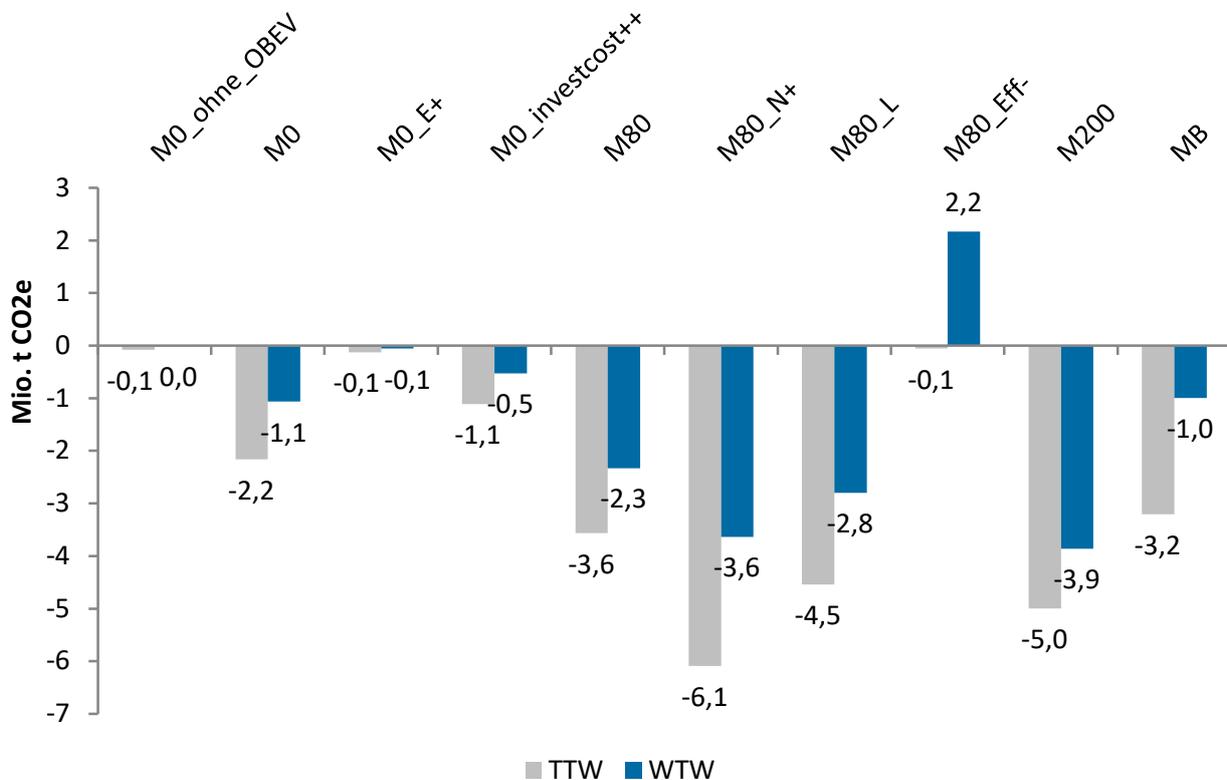


Quelle: eigene Darstellung

In Abbildung 8-52 ist die Reduktion der THG-Emissionen für das Jahr 2030, differenziert nach direkten (TTW) sowie den Gesamtemissionen (WTW) dargestellt. Die Einsparungen der direkten THG-Emissionen sind größer als bei Betrachtung der Gesamtemissionen, da hier die Emissionen der Stromerzeugung mit einbezogen sind. Ohne weitere Anreize fallen die Minderungen im Jahr 2030 im Szenario M0 mit 1,1 Mio. t CO<sub>2</sub> (WTW) vergleichsweise gering aus. Kommen ungünstige Rahmenbedingungen wie steigende Strompreise oder mangelnde Verfügbarkeit von O-BEV hinzu, wird im Jahr 2030 so gut wie keine THG-Einsparung erreicht. Ein Anreiz in Form eines CO<sub>2</sub>-Preises von 80 €/t führt zu einer deutlich gesteigerten Minderungswirkung. Dabei wird die Minderung nicht nur durch den Antriebswechsel, sondern zusätzlich auch durch die Fahrleistungsreaktion aufgrund höherer Kilometerpreise für Diesel-Lkw erzielt. Wird das Oberleitungsnetz schneller aufgebaut oder

eine zusätzliche stationäre Ladeinfrastruktur ausgebaut, kann die Minderungswirkung weiter erhöht werden. Die höchste WTW-Minderung wird mit -3,9 Mio. t bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von 200 €/t erreicht.

**Abbildung 8-52: Reduktion der THG-Emissionen gegenüber dem Dieselszenario im Jahr 2030**



Quelle: eigene Darstellung

Betrachtet man das Jahr 2040 (Abbildung 8-53), so steigen die erzielten Minderungsbeiträge gegenüber dem Jahr 2030 deutlich an. Dies liegt am zunehmenden Netzausbau und leicht sinkenden Technologiekosten und den damit weiter steigenden elektrischen Fahranteilen. Außerdem ist der Strommix im Jahr 2040 sauberer, so dass der Unterschied zwischen TTW- und WTW-Betrachtung geringer ausfällt als in 2030. Die Minderung im Szenario M0 steigt auf -6,3 Mio. t CO<sub>2</sub> und sowohl im Szenario M200 als auch M80\_L auf -9,1 Mio. t CO<sub>2</sub> (WTW).

Im Zeithorizont bis 2050 nähern sich TTW- und WTW-Emissionen weiter an und die erzielte jährliche THG-Minderung durch O-Lkw steigt je nach Szenario auf 10 bis 13 Mio. t CO<sub>2</sub> an.

**Abbildung 8-53: Reduktion der THG-Emissionen gegenüber dem Dieselszenario im Jahr 2040**



Quelle: eigene Darstellung

### Zusätzliche THG-Minderungspotenziale durch Regionalverkehre

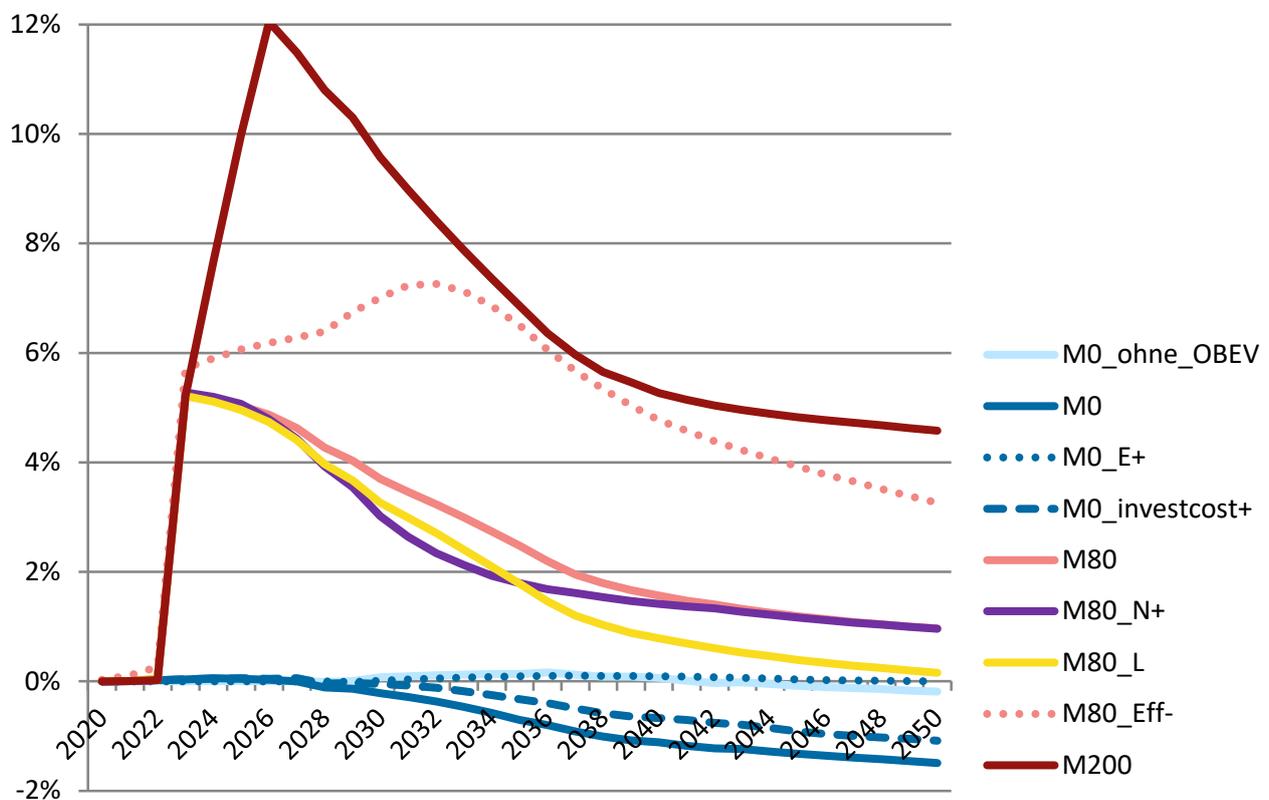
Wie in Kapitel 8.4.2 erläutert wurde, berücksichtigen die Ergebnisse der Szenarien nur Fahrten von Lkw, die mindestens 100 km auf dem elektrifizierten Netz unterwegs sind. Die potenzielle Fahrleistung der modellierten Fahrten unter der Oberleitung liegt im Jahr 2050 bei 30 % der gesamten territorialen Fahrleistung von Last- und Sattelzügen. Berücksichtigt man auch die Fahrten unter 100 km Fahrtweite unter der Oberleitung, liegt der potenzielle Fahrleistungsanteil unter der Oberleitung bei 44 %. Da für diese Fahrten unter 100 km Fahrtweite auf dem Netz keine verkehrlichen Analysen durchgeführt wurden, können keine Aussagen über die wirtschaftliche Elektrifizierung dieser Fahrten getroffen werden. Dies liegt daran, dass diese Fahrten nur zu einem unbekanntem Anteil aus regionalen Fahrten mit vergleichsweise hohem elektrischem Fahranteil bestehen (welche sich durch eine besonders hohe Wirtschaftlichkeit der Elektrifizierung auszeichnen). Ebenso bestehen die Fahrten aus einem unbekanntem Anteil an Fahrten mit langen Vor- und Nachläufen und damit einem geringen elektrischen Fahranteil (welche sich durch eine geringere Wirtschaftlichkeit der Elektrifizierung auszeichnen). Dies können beispielsweise internationale Verkehre sein, die das O-Netz nur an einem kurzen Autobahnabschnitt berühren. Für eine genaue Quantifizierung des Zusatzpotenzials durch regionale Fahrten sind daher zusätzliche verkehrliche Analysen notwendig, die in diesem Projekt nicht bearbeitet werden können.

## Wirkung der Transportkosten- und Fahrleistungsveränderungen auf die THG-Emissionen

Die Annahmen in den Szenarien führen zu Änderungen an den Transportkosten, z. B. durch Änderungen an der Maut. In den Transportkosten sind alle Fahrzeugkosten (Anschaffung, Energiekosten, Betrieb und Wartung) sowie die Fahrerkosten enthalten. Im Dieselszenario bleiben die Transportkosten (real) ab 2019 in den Szenarien in etwa konstant. Der etwas steigende Dieselpreis wird durch die effizienteren Fahrzeuge kompensiert.

In Abbildung 8-54 ist die Veränderung der Transportkosten der verschiedenen Szenarien im Vergleich zum Dieselszenario dargestellt. Den stärksten Effekt hat dabei die Einführung einer Lkw-Maut in Höhe von 200 €/t. Hierdurch erhöhen sich die Transportkosten bei Einführung um rund 12 %. Durch einen zunehmenden Anteil an O-Lkw sinken die mittleren Transportkosten bis 2040 aber schon wieder deutlich. Im Szenario M80\_Eff- ohne Lkw-Standards ist die Bestandsflotte um das Jahr 2030 rund 25 % weniger effizient als im Szenario M80, was höhere Nutzerkosten erzeugt.

**Abbildung 8-54: Änderung der Transportkosten gegenüber dem Dieselszenario**



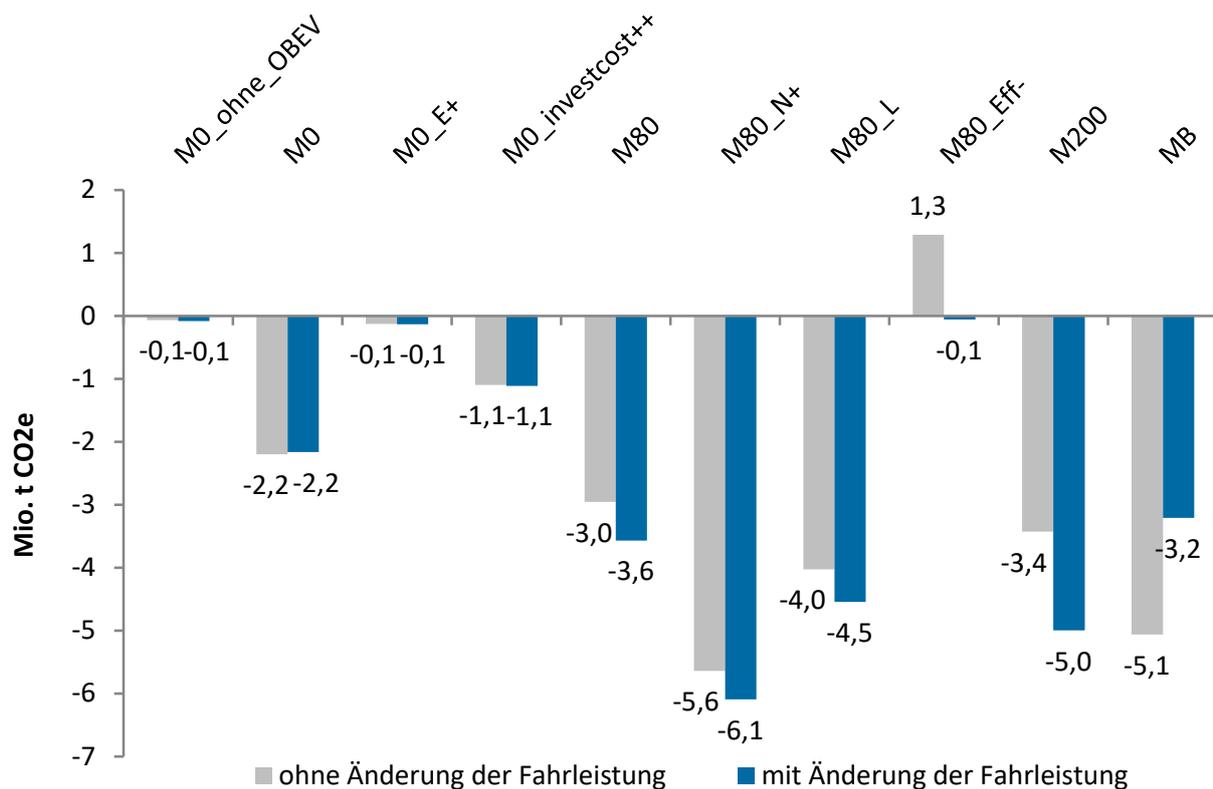
Quelle: eigene Darstellung

Eine Zunahme der Transportkosten resultiert in einem Rückgang der Verkehrsnachfrage und umgekehrt ein Rückgang der Kosten in einer erhöhten Verkehrsnachfrage (Rebound-Effekt). Es wird hierfür eine Transportkostenelastizität von -0,6 angenommen, d. h. bei einer Erhöhung der Transportkosten um beispielsweise 10 % sinkt die Fahrleistung um 6 %<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Die Transportkostenelastizität ist nicht zu verwechseln mit der Kraftstoffpreiselastizität. Da die Energiekosten nur einen Anteil von etwa 30 % an den Transportkosten haben, liegt die Kraftstoffpreiselastizität bei -0,18.

In Abbildung 8-55 ist der Einfluss des Transportkostenänderung bzw. des Rebound-Effekts auf die direkten THG-Emissionsreduktionen dargestellt. Vor allem in den Szenarien mit einer Erhöhung der Maut fällt die THG-Minderung unter Berücksichtigung der Wirkung auf die Fahrleistungen höher aus, da die erhöhten Transportkosten einen Rückgang der Verkehrsnachfrage verursachen. Der jeweils überwiegende Anteil der THG-Minderung ist jedoch nicht auf die Fahrleistungsveränderungen, sondern auf den Antriebswechsel zurückzuführen.

**Abbildung 8-55: Reduktion der direkten THG-Emissionen (TTW) gegenüber dem Dieselszenario im Jahr 2030 mit und ohne Rebound bzw. Änderung der Fahrleistung**



Quelle: eigene Darstellung

### Zwischenfazit

Mit O-Lkw lassen sich bereits bis zum Jahr 2030 relevante THG-Einsparungen erzielen, wenn die Rahmenbedingungen stimmen. Direkte THG-Einsparungen liegen mit Anreizen in der Größenordnung von bis zu 3,6 bis 6,1 Mio. t in 2030, wenn OBEV verfügbar sind und eingesetzt werden. Werden keine Anreize gesetzt, liegt das Minderungspotenzial bei rund 2 Mio. t CO<sub>2</sub> in 2030. Sind nur O-HEV verfügbar oder sind die Rahmenbedingungen eher ungünstig (Strompreis, Anschaffungspreise), ist so gut wie kein Reduktionspotenzial vorhanden. Will man Rebound-Effekte vermeiden und relevante THG-Einsparungen erzielen, bietet sich statt einer Mautbefreiung für O-Lkw eine zusätzliche CO<sub>2</sub>-Komponente für fossil betriebene Lkw an. Nach 2030 kann der THG-Minderungsbeitrag weiter deutlich ansteigen.

#### 8.4.6. Einordnung des THG-Minderungsbeitrags zu anderen Studien

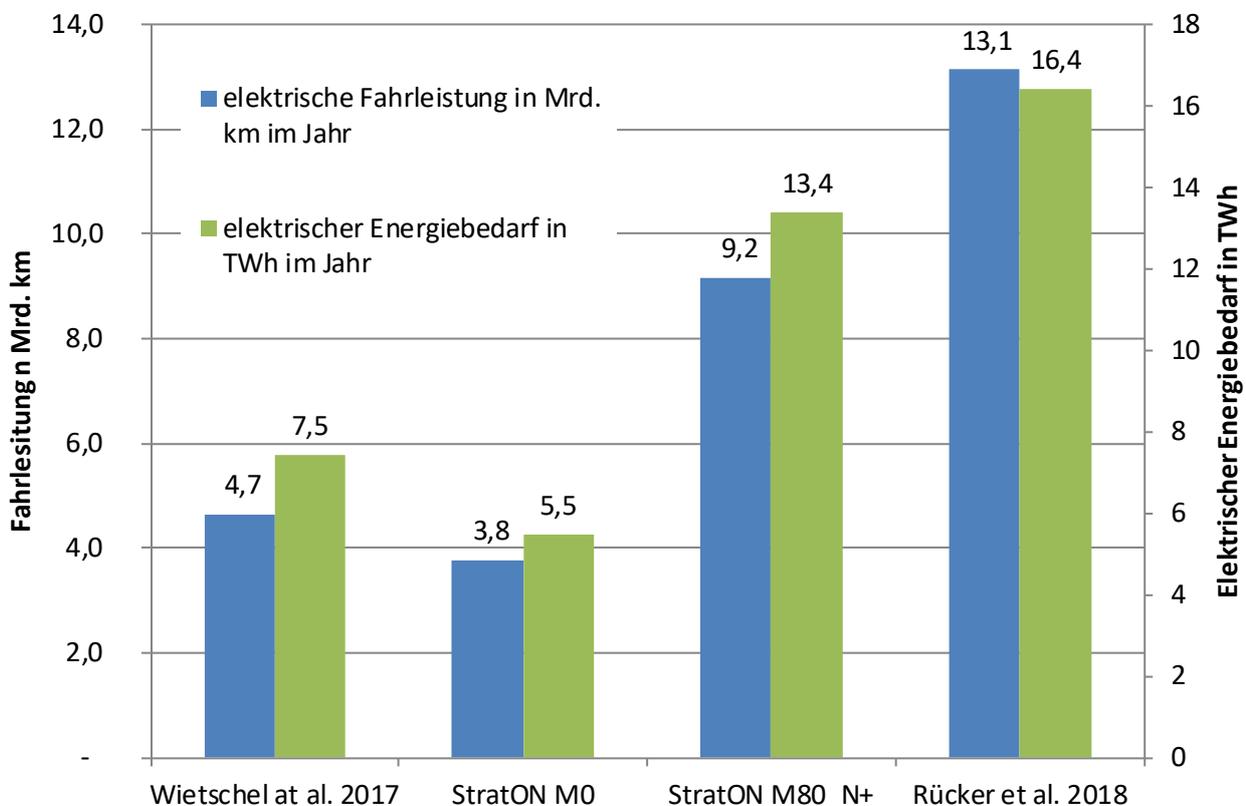
Zur Einordnung der Ergebnisse können zwei Studien herangezogen werden. Die vom BMVI beauftragte Studie „Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potenziale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw“ (Wietschel et al. 2017) sowie die Studie „Roadmap OH-Lkw: Kurzfristig realisierbare Potenziale für den wirtschaftlichen Betrieb von OH-Lkw“ (Rücker et al. 2018).

Als Methode in Wietschel et al. (2017) wurde eine TCO-basierte Modellierung des Markthochlaufs von Lkw mit alternativen Antrieben angewandt. Der O-Netzausbau erfolgt bis 2030 auf den 4.000 km Autobahn, die am stärksten mit Lkw belastet sind.

Die Studie Rücker et al. (2018) leitet aus einer TCO-Fallbetrachtung eine Mindestfahrweite auf dem O-Netz ab, welche als Wirtschaftlichkeitskriterium gilt. Dies bedeutet, dass alle Fahrten >50 km im Jahr 2030 elektrifiziert werden. Es wird ein O-Netz-Vollausbau auf allen Autobahnen und 4-streifigen Bundesstraßen angenommen. Die Ergebnisse der Studie stellen also eher ein Maximalpotenzial dar.

In Abbildung 8-56 sind die elektrische Fahrleistung und der Strombedarf im Jahr 2030 im Vergleich dargestellt. Die unterschiedlichen Verhältnisse der Balken sind in unterschiedlichen spezifischen Energieverbräuchen der O-Lkw in den jeweiligen Studien zurückzuführen. Die hohe elektrische Fahrleistung in Rücker et al. (2018) kommt durch den unterstellten Oberleitungsvollausbau zustande.

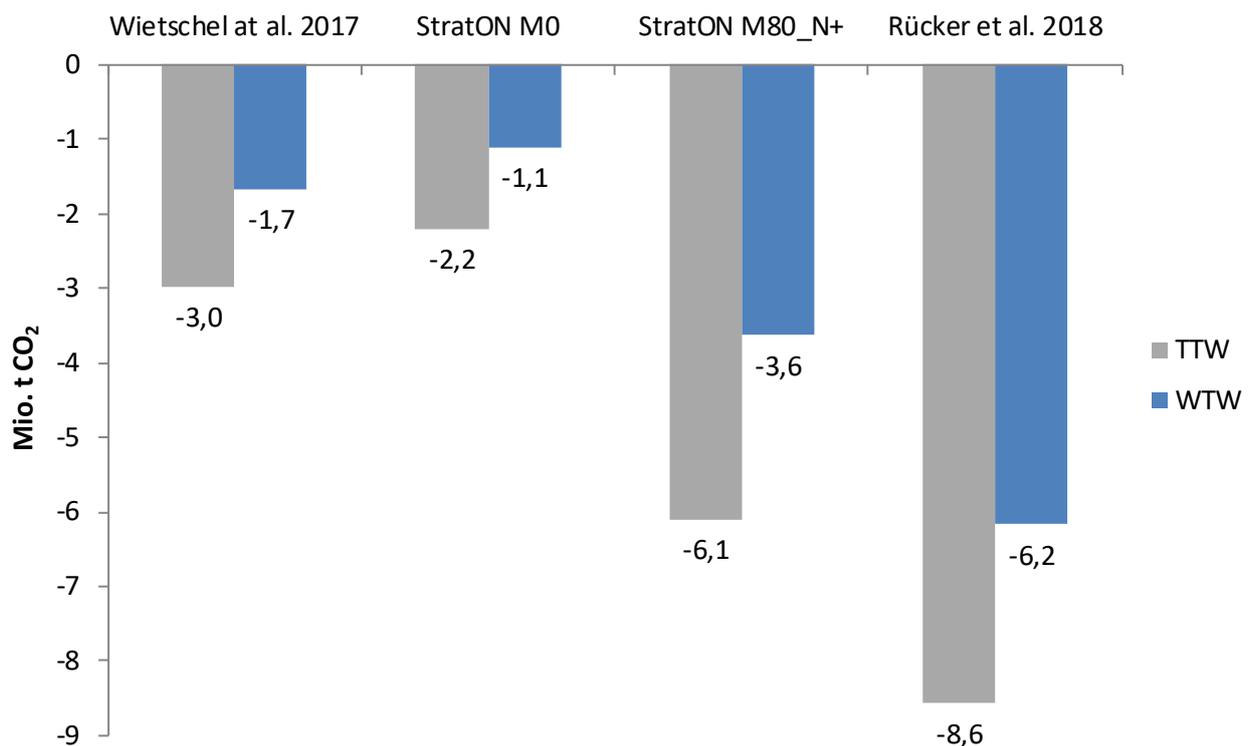
**Abbildung 8-56: Vergleich von elektrischer Fahrleistung im Schwerlastverkehr und Strombedarf im Jahr 2030**



Quelle: eigene Darstellung, Fahrleistung Wietschel et al. (2017) abgeleitet aus Bestand und mittlerer Fahrleistung, elektrischer Energiebedarf Rücker et al. (2018) hergeleitet aus spezifischem Energieverbrauch und Fahrleistung

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die THG-Minderungspotenziale der beiden Studien für Abbildung 8-57 auf den in den Markthochlaufszenerarien in StratON verwendeten Emissionsfaktor mit Kohleausstieg (275 gCO<sub>2</sub>e/kWh in 2030) umgerechnet (siehe Kapitel 8.2.3). Bei der Einordnung der StratON-Ergebnisse ist zu beachten, dass bei dem hinterlegten Netzausbau die elektrifizierte Kilometer in 2030 im Szenario M0 nur knapp 2.000 km betragen, im Szenario M80\_N+ hingegen 3.000 km. Das vergleichsweise hohe Minderungspotenzial in M80\_N+ kommt nicht allein durch O-Lkw, sondern zum Teil auch durch den Rückgang der Fahrleistung durch den CO<sub>2</sub>-Preis zustande.

**Abbildung 8-57: Reduktion der THG-Emissionen im Jahr 2030 im Vergleich mit anderen Studien**



Quelle: eigene Darstellung, THG-Emissionen mit StratON-Emissionsfaktor

## 8.5. Ausgewählte ökonomische Effekte

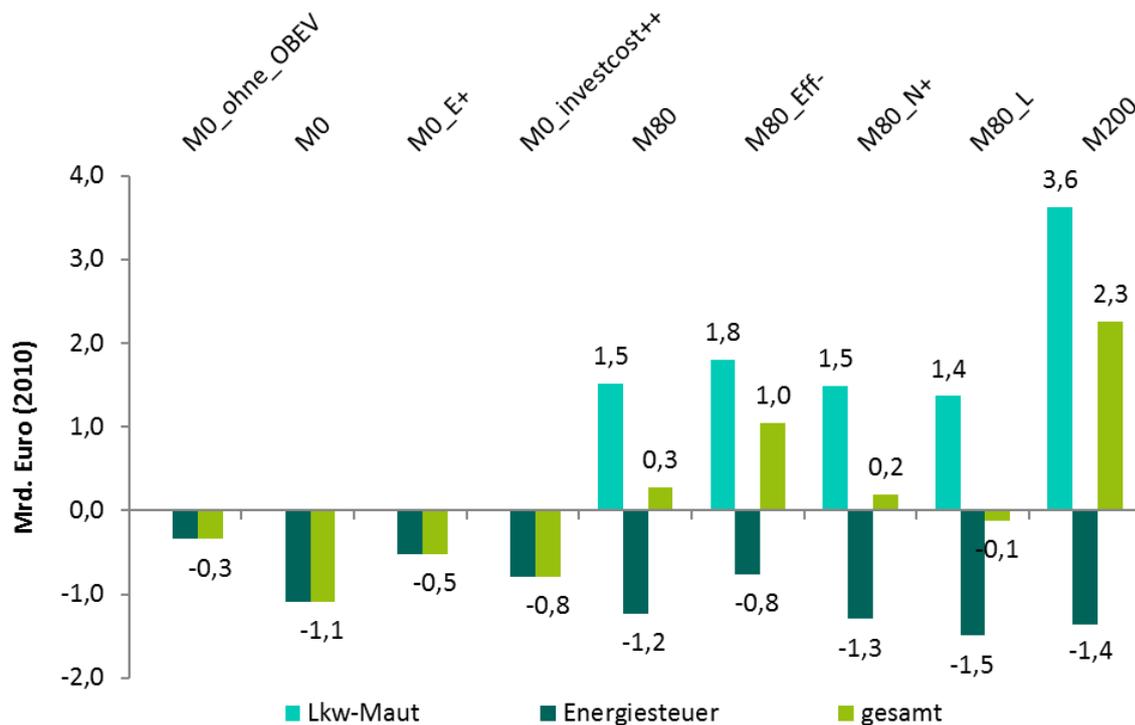
### 8.5.1. Abschätzung der Wirkung auf die Maut- und Energiesteuereinnahmen

Wenn sich die Jahresfahrleistungen mit Diesel-Lkw und O-Lkw ändern, so beeinflusst dies – die derzeitigen Abgabensätze vorausgesetzt – sowohl die erzielbaren Einnahmen aus Energiesteuern als auch die Lkw-Mauteinnahmen. Insgesamt ergibt sich durch den Markthochlauf an O-Lkw nämlich ein mehr oder weniger starker Rückgang des Dieserverbrauchs und damit der Einnahmen aus der Energiesteuer auf Mineralöl. Die gleichzeitig erzielten Mehreinnahmen durch den höheren Stromverbrauch und die hierfür anfallende Stromsteuer gleichen den Rückgang aufgrund eines niedrigeren Steuerniveaus nicht aus.

In der Modellierung ergibt sich in den Szenarien ohne Mauterhöhung (aber mit Mautpflicht für alle Lkw) im Jahr 2040 eine Einnahmenreduktion von 0,3 bis 1,1 Mrd. € (Abbildung 8-58). Wird zusätzlich eine CO<sub>2</sub>-Komponente in der Maut eingeführt, beschleunigt sich durch den Förderanreiz zwar der

Markthochlauf der O-Lkw, führt aber zu weiter sinkenden Energiesteuereinnahmen. Gleichzeitig erhöhen sich durch die CO<sub>2</sub>-Komponente allerdings die Mauteinnahmen, sodass insgesamt der Einfluss auf den Staatshaushalt ausgeglichen ist (bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von 80 €/t) bzw. sogar positiv ausfällt (bei höheren CO<sub>2</sub>-Preisen). Im Falle einer kompletten Mautbefreiung für O-Lkw ergeben sich hingegen für das Jahr 2040 Mindereinnahmen von 9,8 Mrd. €.

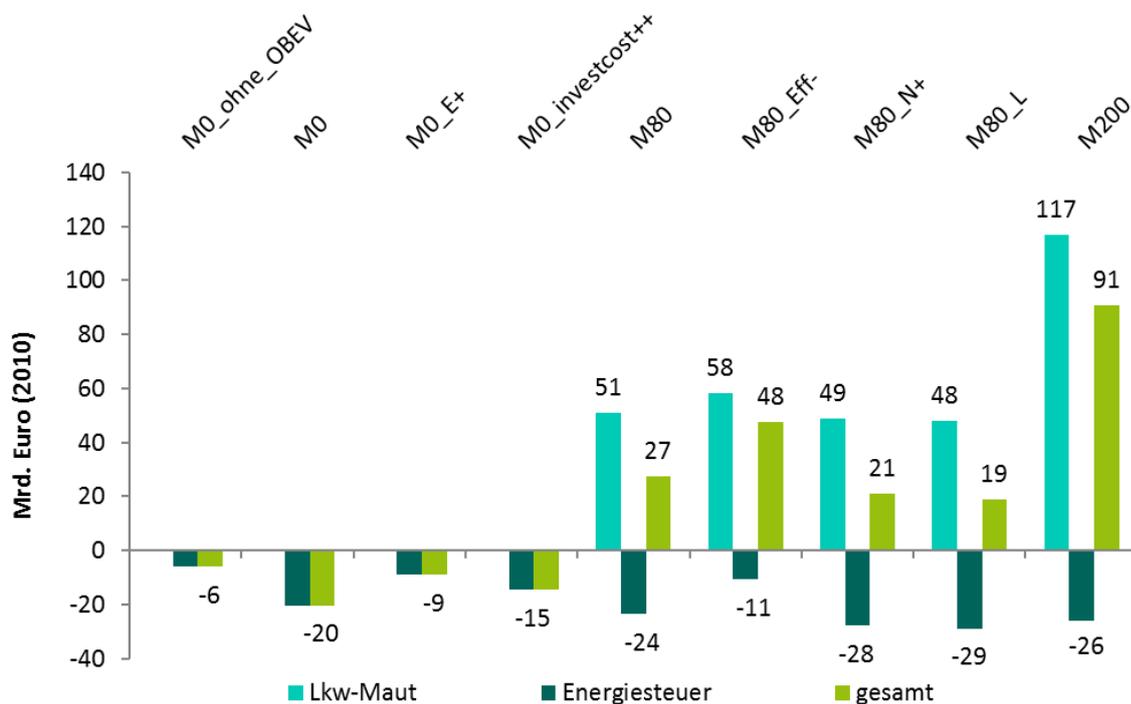
**Abbildung 8-58: Veränderung Energiesteuer und Maut gegenüber dem Dieselszenario im Jahr 2040**



Quelle: eigene Darstellung

Betrachtet man die Veränderung der Einnahmen kumuliert bis zum Jahr 2050 (Abbildung 8-59), zeigen sich in den Szenarien mit einer Mauterhöhung teils deutliche Mehreinnahmen bis zu rund 90 Mrd. €. Auch in den Szenarien mit einer vergleichsweise moderaten Mauterhöhung reichen die Mehreinnahmen aus, um die O-Infrastrukturausgaben (knapp 17 Mrd. € für das Kernnetz) zu refinanzieren. Im Falle einer kompletten Mautbefreiung würden sich die kumulierten Mindereinnahmen hingegen auf rund 250 Mrd. € belaufen. Die Höhe dieser Einnahmeausfälle zeigt, dass das Szenario „Mautbefreiung“ voraussichtlich – wenn überhaupt – nur in einer frühen Markthochlaufphase umsetzbar sein kann, aber nicht bzw. nicht ohne andere, den Einnahmeausfällen entgegenwirkende Maßnahmen über einen längeren Zeitraum hinweg.

**Abbildung 8-59: Veränderung Energiesteuer und Maut gegenüber dem Dieselszenario, kumuliert bis 2050**



Quelle: Eigene Darstellung

Eine Abschätzung der fiskalischen Gesamtwirkung des Markthochlaufs mit O-Lkw auf den Bundeshaushalt bedarf über die Betrachtung der Energiesteuer und der Lkw-Maut hinaus der Betrachtung verschiedener anderer Wirkungszusammenhänge. Auch Produktion, Verkauf und Wartung von O-Lkw und Komponenten, die Bautätigkeit zur Errichtung der Oberleitungen, der Stromhandel oder die Energieabrechnung bei O-Lkw entfalten u.a. über Umsatz- und Gewerbesteuern, die Einkommensteuern der hier beschäftigten Personen und andere Abgaben Wirkung auf den Staatshaushalt. Hingegen gehen im Bereich der Diesel-Lkw die Einnahmen zurück. Gleichzeitig beeinflusst die Notwendigkeit der Onboard-Energieabrechnung bei O-Lkw die Kosten der Mautabrechnung, wenn gemeinsame Systeme genutzt werden, was wiederum Einfluss auf die letztlich zur Verfügung stehenden Nettoeinnahmen aus der Lkw-Maut und damit auf die Finanzierbarkeit von mautfinanzierten Staatsaufgaben insbesondere im Bundesfernstraßenbau hat. Zuletzt stehen nicht alle Einnahmen aus den genannten Steuern und Abgaben auch vollständig dem Bund zur Verfügung. Vielmehr würden Steuerausfälle – aber auch eventuelle Mehreinnahmen – z. B. bei Einkommens- und Umsatzsteuer, sowie Verwendungsvorschriften im Bereich der Energiesteuereinnahmen auch Länder und Gemeinden betreffen, was weitere Folgefragen im Bereich des Bund-Länder-Finanzausgleichs aufwirft.

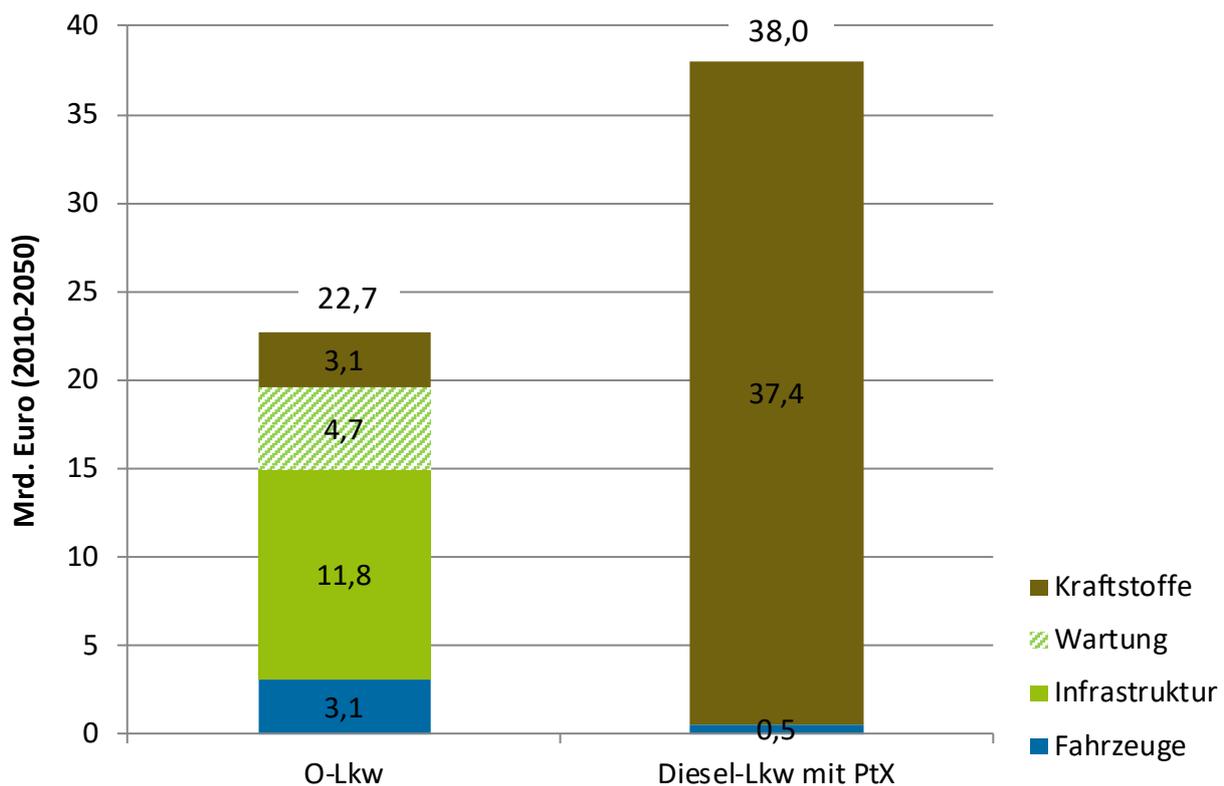
### 8.5.2. Volkswirtschaftliche Kosten von Oberleitungs-Lkw im Vergleich zur Dekarbonisierung mittels strombasierter Kraftstoffe

Im folgenden Abschnitt werden die volkswirtschaftlichen Mehrkosten des O-Lkw-Systems (am Beispiel des Szenarios M0) gegenüber dem Diesel-Referenzszenario ermittelt. Ferner wird die Alternative einer Dekarbonisierung des schweren Straßengüterverkehrs mittels strombasierter Kraftstoffe beleuchtet.

Sowohl für den Aufbau der Oberleitungs-Infrastruktur als auch für die elektrischen Fahrzeuge fallen zusätzliche Investitionskosten an. Für die betrachteten Netzausbaustufen ergeben sich unter den getroffenen Annahmen Investitionskosten von 11,8 Mrd. € für das zu 90 % elektrifizierte Kernnetz (3.800 elektrifiziert). Zusätzlich werden jährliche Betriebskosten in Höhe von 2 % der Investitionskosten angenommen. Daraus ergeben sich bis zum Jahr 2050 zusätzliche Infrastrukturkosten (für Bau und Betrieb des O-Netzes) von 16,5 Mrd. Euro. Hinzu kommen Mehrkosten für die (etwas teureren) Fahrzeuge, welche sich kumuliert bis zum Jahr 2050 auf 3,1 Mrd. € belaufen. Die volkswirtschaftlichen Mehrkosten bis 2050 belaufen sich damit im Szenario M0 auf rund 23 Mrd. Euro. Demgegenüber stehen kumulierte THG-Einsparungen von rund 150 Mio.t über den gesamten Zeitraum. Das entspricht volkswirtschaftlichen Vermeidungskosten von rund 150 €/t CO<sub>2</sub>.

Andere Optionen zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs sind auf Basis des derzeitigen Kenntnisstandes mit deutlich höheren volkswirtschaftlichen Kosten verbunden. Um eine ähnlich hohe THG-Minderung wie durch O-Lkw durch den Einsatz strombasierter Kraftstoffe zu erreichen, sind die volkswirtschaftlichen Mehrkosten in etwa doppelt so hoch – sie liegen bei rund 250 €/t. Ursache dafür sind die hohen Herstellungskosten von strombasierten Power-to-Liquid (PtL)-Kraftstoffen. Die zugrunde liegenden Produktionskosten basieren auf der Studie Agora Energiewende et al. (2018) und betragen im Jahr 2030 rund 47 €<sub>2010</sub>/GJ für importierten Flüssigkraftstoff.

**Abbildung 8-60: Volkswirtschaftliche Kosten der Dekarbonisierung im Straßengüterverkehr: O-Lkw und strombasierte Kraftstoffe im Vergleich**



Quelle: Eigene Darstellung

Zu ähnlichen Aussagen kommt auch der BDI in seiner Studie „Klimapfade für Deutschland“ (Gerbert et al. 2018). In dieser Studie werden sogar Vermeidungskosten von nur 60 €/t CO<sub>2</sub> für O-Lkw ermittelt (bei Aufbau einer Infrastruktur auf den meistbefahrenen 4.000 km Autobahnabschnitten und

unter der Annahme geringer Infrastrukturinvestitionsbedarfe sowie einer höheren elektrischen Fahrleistung). Im StratON-Szenario M200, welches sich durch eine CO<sub>2</sub>-basierte Mautspreizung auszeichnet und dadurch eine höhere elektrische Fahrleistung und somit eine höhere THG-Minderung erzielt, liegen die Vermeidungskosten bei 120 €/t CO<sub>2</sub>. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist damit der Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur eine sehr kosteneffiziente Maßnahme.

## 9. Wechselwirkung von O-Lkw mit dem Stromsektor

### 9.1. Einleitung

Ein steigender Einsatz von O-Lkw im Güterverkehr führt zu einer steigenden Stromnachfrage. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die Stromerzeugung und die daraus entstehenden THG-Emissionen sollen in diesem Kapitel untersucht und in Bezug zur zeitgleichen Elektrifizierung weiterer Straßenfahrzeuge (insbesondere Pkw) gesetzt werden. Hierbei wird in einem ersten Schritt die zusätzliche Stromnachfrage in hoher zeitlicher Auflösung im Strommarktmodell PowerFlex modelliert und der Einfluss des zusätzlichen Fahrstroms auf die Erzeugung untersucht (Kapitel 9.2.). Da vor allem erneuerbare Erzeugungskapazitäten regional sehr unterschiedlich zur Verfügung stehen und auch der Fahrstrombedarf räumlich deutlich variiert, wird in einem zweiten Schritt analysiert, welche Herausforderungen bei einem steigenden Anteil an O-Lkw am Straßengüterverkehr im Stromnetz auftreten können (Kapitel 9.3).

### 9.2. Modellierung der zusätzlichen Stromnachfrage

Um den Einfluss der zusätzlichen Stromnachfrage durch die O-Lkw auf die Erzeugung zu untersuchen, werden mit dem PowerFlex-Modell des Öko-Instituts mehrere Modellläufe mit und ohne O-Lkw durchgeführt und miteinander verglichen. Im folgenden Abschnitt wird das eingesetzte Strommarktmodell PowerFlex beschrieben.

#### 9.2.1. Methodik: Das PowerFlex-Modell

PowerFlex bildet den deutschen und europäischen Strommarkt ab. Im Rahmen einer numerischen Optimierung berechnet das Modell, wie thermische Kraftwerke, die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerke und flexible Stromverbraucher so eingesetzt werden können, dass Strom- und Fernwärmenachfrage gedeckt und gleichzeitig die Systemkosten minimiert werden. Ein modellendogener Ausbau von Kapazitäten findet dabei nicht statt; vielmehr wird der kostenoptimale Einsatz („Dispatch“) gegebener Kapazitäten in hoher zeitlicher Auflösung bestimmt. Wichtige Eingangsparameter sind die verfügbaren konventionellen und erneuerbaren Erzeugungskapazitäten, Angaben zu Netzinfrastruktur, Stromnachfrage, Flexibilitätsoptionen (z. B. Speicher), Brennstoffpreise und energiepolitische Rahmenbedingungen (z. B. CO<sub>2</sub>-Preise). Im Rahmen von StratON wird PowerFlex verwendet, um zu berechnen, wie das Stromsystem auf die zusätzliche Fahrstromnachfrage der O-Lkw reagiert.

Elektrofahrzeuge jenseits von O-Lkw (insbesondere E-Pkw) werden als Stromnachfrager abgebildet, deren Nachfrage (unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen) zeitlich verschiebbar (flexibilisierbar) ist. Der Stromverbrauch für die Batterieladung wird mit Lademanagement (preisoptimiert gesteuert) in die Modellierung des Strommarkts integriert. Pro Fahrzeugnutzungsprofil werden zwei Zeitreihen an das Strommarktmodell übergeben: die Fahrleistung jedes Fahrzeugtyps pro Stunde und den Standort des Fahrzeugs für die jeweilige Stunde. Zusammen mit den Informationen über den Verbrauch pro Kilometer und die Ladeleistungen an den jeweiligen Standorten kann so im

Modell ermittelt werden, wann im Rahmen des Lademanagements welches Fahrzeug geladen werden sollte.

Die Stromnachfrage von O-Lkw wird im Modell als unflexible Nachfrage abgebildet, die während des Betriebs unter der Oberleitungsinfrastruktur anfällt. Ebenso wird die Stromnachfrage von Schienenfahrzeugen abgebildet.

Der Fokus des Modells liegt auf Deutschland, es werden jedoch mit Ausnahme von Island und Zypern alle 35 EntsoE<sup>17</sup>-Mitgliedsländer berücksichtigt. Der Detaillierungsgrad ist für Deutschland hoch, die anderen Länder werden aggregiert abgebildet. Jedes Land stellt dabei einen Netzknoten dar, der über Kuppelleitungen mit seinen Nachbarländern verbunden ist. Innerhalb eines Knotens wird ein einheitliches Marktgebiet ohne Netzengpässe unterstellt. Die Austauschkapazitäten zwischen den Ländern (Net Transfer Capacities, NTC) in beide Richtungen werden vorgegeben.

Die einzelnen Kraftwerke werden im Modell detailliert mit Hilfe technischer und ökonomischer Parameter abgebildet. Thermische Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung größer 100 MW werden blockscharf und mit einem individuellen Wirkungsgrad erfasst. Kleinere thermische Stromerzeugungsanlagen werden in technologie- und baujahr-spezifischen Gruppen zusammengefasst und mit Hilfe von typspezifischen Parametern charakterisiert. Innerhalb von Deutschland werden keinerlei Netzrestriktionen berücksichtigt, es wird also angenommen, dass alle Kraftwerke unabhängig von ihrem Standort die Stromnachfrage erfüllen können.

Biomassekraftwerke, die Biogas, Holz oder Pflanzenöl einsetzen, werden über Technologieaggregate als Teil des thermischen Kraftwerksparks im Modell abgebildet. Das Stromangebot aus fluktuierenden Erzeugern (Laufwasser, Wind, Photovoltaik) wird in stündlicher Auflösung vorgegeben. Die tatsächlich eingespeiste Menge wird modellendogen bestimmt, sodass das zur Verfügung stehende fluktuierende Stromangebot auch als Überschuss identifiziert werden kann.

Das Erzeugungsprofil für Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) setzt sich aus einem typischen Fernwärmeprofil und einer angenommenen Gleichverteilung für industrielle KWK-Anlagen zusammen.

Im Rahmen der BMU-Projekte OPTUM (Zimmer et al. 2011) und emobil 2050 (Hacker et al. 2014) wurde ein Modul zur detaillierten Abbildung des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen mit Schwerpunkt auf den batterieelektrischen Antrieb und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Stromerzeugung für das *PowerFlex*-Modell entwickelt. Damit kann eine große Anzahl verschiedener Fahrzeugnutzungsprofile im Modell stundenscharf verarbeitet werden. Dies erlaubt die Abbildung detaillierter Inputdaten für die Elektromobilität. Im Modul E-Mobilität sind sowohl reine batterieelektrische Fahrzeuge als auch Plug-In-Hybridfahrzeuge, die einen Teil ihres Energiebedarfs durch Kraftstoff decken können, implementiert.

Die jährliche Stromnachfrage wird exogen vorgegeben und ergibt sich aus den Stromnachfragen der anderen Sektoren. Die Stromnachfrage teilt sich im Modell in einen unflexiblen Anteil mit vorgegebenem stündlichem Lastprofil sowie einen flexiblen Anteil, der aus der Stromnachfrage von Verbrauchern wie der Elektromobilität, aus Pumpspeicherkraftwerken oder Wärmepumpen resultiert. Für diese Verbraucher existieren im Modell zusätzliche Nebenbedingungen, die beispielsweise die Anforderungen aus den Fahrprofilen oder die Kapazität der Speicher abbilden. Unter Berücksichtigung dieser Nebenbedingungen wird die zeitliche Struktur dieser Nachfrage modellendogen im Zuge der Optimierung berechnet.

---

<sup>17</sup> EntsoE steht für *European Network of Transmission System Operators for Electricity*, auf Deutsch: *Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber*.

Auf Basis einer vollständigen Voraussicht wird dann im Rahmen einer linearen Optimierung der kostenminimale Einsatz von thermischen Kraftwerken, Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerken und Import/Export unter Berücksichtigung technischer und energiewirtschaftlicher Nebenbedingungen bestimmt.

### 9.2.2. Parametrisierung der Szenarien und Gesamtstromnachfrage

Als Basis für die Parametrisierung wurden die Rahmendaten aus der zweiten Runde des Projekts Klimaschutzszenario 2050 ausgewählt (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015). Das dort berechnete Szenario KS80 ist ein Zielszenario, welches eine sektorübergreifende Minderung der deutschen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 von 80 % gegenüber 1990 beschreibt.

#### Gesamtstromnachfrage

Die sich aus der Modellierung der einzelnen Sektoren ergebende Stromnachfrage konventioneller Verbraucher ist leicht rückläufig, die Nachfrage aus dem Verkehrssektor steigt jedoch, vor allem aufgrund der Elektromobilität, leicht an. Dies führt zu einer Gesamtstromnachfrage, welche in den Jahren 2020 bis 2050 zwischen 522 TWh und 572 TWh liegt.

Neben den Rahmendaten für die Elektromobilität und den Schienenverkehr, welche auf dem oben beschriebenen Szenario KS80 beruhen, wurden die Anzahl und Stromnachfrage der O-Lkw auf Grundlage des Szenarios M0 (Abschnitt 8.4) ausgewählt<sup>18</sup>. Tabelle 9-1 zeigt neben diesen Informationen die Anzahl der elektrischen Straßenfahrzeuge sowie die damit verbundene Stromnachfrage des Verkehrs (inklusive Schienenverkehr) im Überblick.

**Tabelle 9-1: Stromnachfrage des Verkehrs**

	2020	2030	2040	2050
Anzahl O-Lkw [in Tsd.]	0	14	68	88
Anzahl E-Fahrzeuge* [in Mio.]	1,2	5,6	17,3	28,5
Stromnachfrage O-Lkw [TWh]	0	5	18,5	25
Stromnachfrage Schiene [TWh]	17	17	17	17
Stromnachfrage E-Fahrzeuge [TWh]	4	17	51	78

\*E-Fahrzeuge: v.a. Pkw und (leichte) Nutzfahrzeuge mit (teil-)elektrischem Antrieb

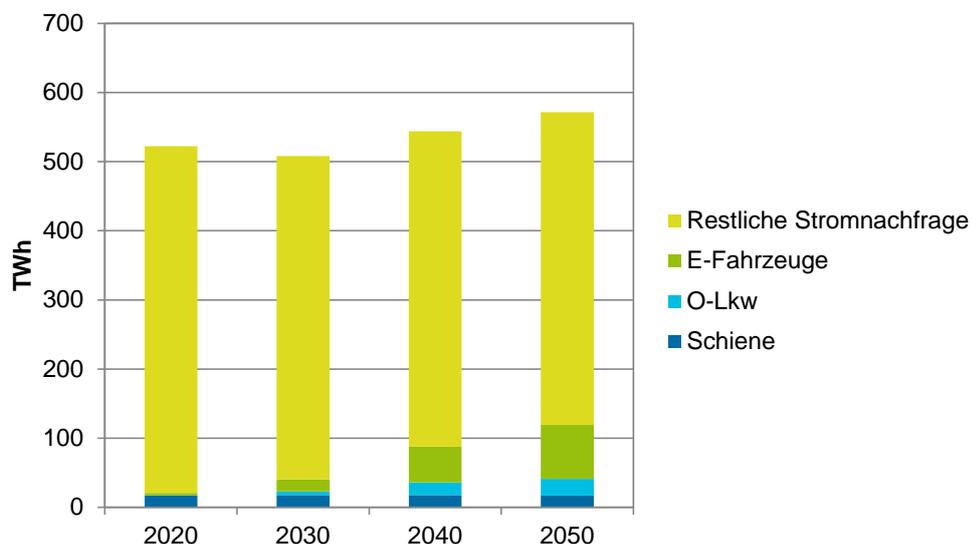
Quelle: Eigene Berechnungen und Öko-Institut; Fraunhofer ISI 2015

In Abbildung 9-1 ist die Stromnachfrage durch den Verkehr und die weiteren Sektoren dargestellt. Es wird hier deutlich, dass der Anteil des Verkehrs an der Gesamtstromnachfrage zwar zum Jahr 2050 deutlich ansteigt, insgesamt jedoch unter 20 % der Stromnachfrage bleibt. Der Fahrstrombedarf der O-Lkw macht im Jahr 2050 ca. 5 % der gesamten Stromnachfrage aus. Elektrische Pkw und leichte Nutzfahrzeuge haben mit einem Anteil von mehr als 11 % bis zum Jahr 2050 eine mehr als doppelt so große Bedeutung für die Gesamtstromnachfrage. Die geringere Jahresfahrleistung und die geringeren spezifischen Energieverbräuche im Vergleich zu O-Lkw werden durch die

<sup>18</sup> Um die Ergebnisse im Projektbeirat diskutieren zu können, erfolgte die Modellierung mit PowerFlex vor der endgültigen Finalisierung der in Kapitel 8 beschriebenen Szenarien. Die dargestellte Stromnachfrage unterscheidet sich daher leicht (Differenz <5 %). Für die Kernaussagen des Kapitels ist dieser Unterschied nicht von Relevanz.

deutlich höhere Gesamtanzahl an elektrischen Pkw und leichten Nutzfahrzeugen deutlich überkompensiert.

**Abbildung 9-1: Gesamtstromnachfrage und Stromnachfrage des Verkehrs**



Quelle: Eigene Berechnungen

### Verfügbare Erzeugungsleistungen

Tabelle 9-2 zeigt die Entwicklung der installierten Leistung der fossilen Kraftwerke und der erneuerbaren Energien im Verlauf des betrachteten Zeitraums gemäß dem Szenario „KS 80“. Die Leistung der mit fossilen Brennstoffen befeuerten Kraftwerke nimmt zwischen 2020 und 2050 kontinuierlich ab. Erneuerbare Energien und hier insbesondere onshore Windenergie und Photovoltaik werden dahingegen stark ausgebaut und erreichen im Jahr 2050 109 GW bzw. 125 GW.

**Tabelle 9-2: Entwicklung der installierten Leistung der Kraftwerke im Szenarienvlauf**

	2016	2020	2030	2040	2050
	<b>GW</b>				
Kernenergie	11	8	0	0	0
Braunkohle	21	16	12	6	0
Steinkohle	27	15	11	13	8
Erdgas	30	24	28	16	4
Sonstige	10	5	5	5	4
Erneuerbare Energien	103	129	173	208	281
Wasser	5	6	6	6	7
Wind onshore	46	54	72	88	109
Wind offshore	4	6	15	23	32
PV	41	54	72	82	125
Biogas	5	6	6	6	6
Biomasse	2	2	2	2	2

Quelle: BMUB 2019 (für 2016) Öko-Institut; Fraunhofer ISI 2015 (für 2020-2050)

### 9.2.3. Stündliche Auflösung der Stromnachfrage des Verkehrs in den Szenarien

Wie oben beschrieben, wird die Stromnachfrage im PowerFlex-Modell auf zwei unterschiedliche Arten modelliert:

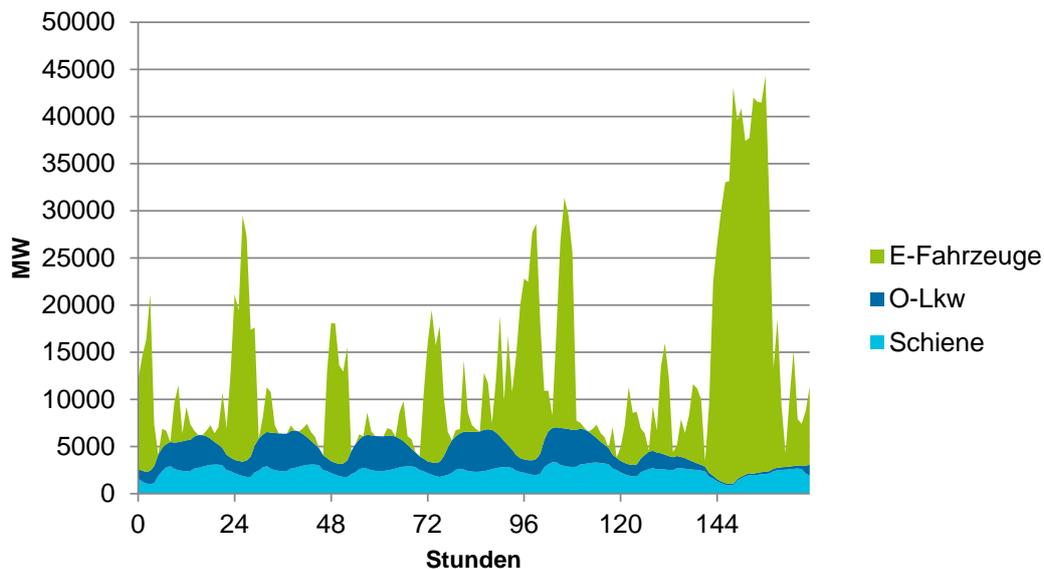
- Ein stündliches Lastprofil bildet unflexible Nachfrager wie O-Lkw, ab, bei welchen der Fahrstrombedarf aufgrund von Fahrplänen und/oder festen Routen vorhersagbar ist bzw. der Strombezug aus dem Netz beim Fahren erfolgt.
- Fahrzeugnutzungsprofile, welche Fahrten und Standorte in stündlicher Auflösung beinhalten, ermöglichen zusätzlich die Abbildung von flexibler Nachfrage und Lademanagement. Dies ist insbesondere für batterieelektrische Fahrzeuge der Fall, die eine Netzkopplung während der Standzeiten herstellen. Hierbei wird berücksichtigt, dass Fahrzeugbetreiber eine bestimmte Verfügbarkeit ihres Fahrzeugs wünschen und daher nach Ankunft einen bestimmten Ladezustand herstellen. Darüber hinaus wird der Akku strommarktgetrieben geladen.

Für die Abbildung der Stromnachfrage der O-Lkw wurde angenommen, dass diese nicht auf das Stromangebot reagiert, es sich also – ebenso wie der Schienenverkehr - um eine unflexible Nachfrage handelt. Die O-BEV laden im Szenario nur an der Oberleitung und nicht am Start- und Zielort.

Für die Verteilung der Stromnachfrage auf die 8.760 Stunden des Jahres (die im Modell PowerFlex abgebildet werden) wurde die stündliche Verteilung der Verkehrsstärke auf Basis der automatischen Zählstellen der BAST verwendet. Es wurde also für die Modellierung angenommen, dass es keine wesentlichen Verschiebungen in den zeitlichen Fahrprofilen des schweren Güterverkehrs gibt.

Abbildung 9-2 zeigt beispielhaft, wie die stündliche Stromnachfrage des Verkehrs im Jahr 2050 im Modell aussehen könnte. Für Schienenfahrzeuge und O-Lkw sind die jeweiligen Tagesgänge im Wochenverlauf sichtbar. Noch deutlicher als bei Schienenfahrzeugen, ist bei O-Lkw ein ausgeprägter Tag-Nacht-Lastgang zu beobachten sowie ein deutlicher Rückgang der Stromnachfrage am Wochenende. Die Nachfrageschwankungen begründen sich mit dem Tagesgang des Einsatzes von schweren Lkw (inkl. des Sonntagsfahrverbots). Die Nachfrage der flexibel ladenden Elektrofahrzeuge ist abhängig von der restlichen Stromnachfrage und der zur Verfügung stehenden Erzeugung aus erneuerbaren Energien. Diese ergibt sich als Modellergebnis und ist in Abbildung 9-2 nur als Beispielergebnis zu verstehen.

**Abbildung 9-2: Stündliche Stromnachfrage des Verkehrs in einer Beispielwoche im Jahr 2050**



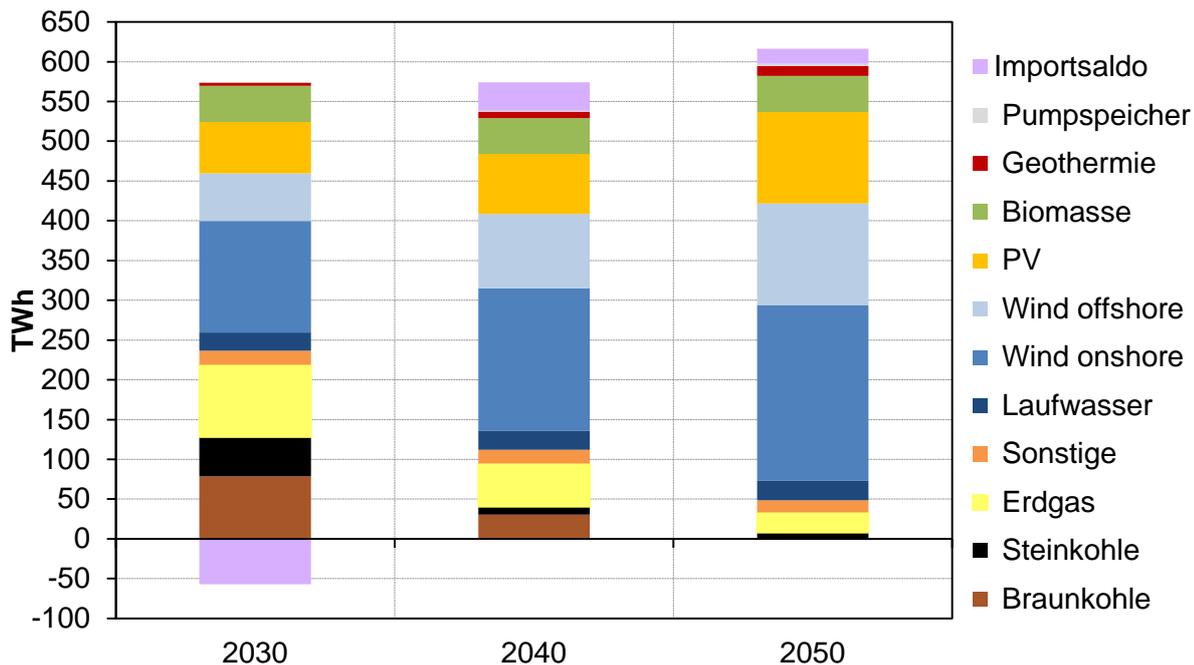
Quelle: Eigene Berechnungen

Zur Untersuchung des Einflusses der zusätzlichen Stromnachfrage der O-Lkw auf die gesamte Stromerzeugung und die Emissionen des Energiewirtschaftssektors wurden mehrere Modellläufe durchgeführt. Hierbei wurde jeweils immer einmal mit und einmal ohne die stündliche Nachfrage der O-Lkw gerechnet. Darüber wurden jeweils Modellläufe durchgeführt, in welchen entsprechend der zusätzlichen Nachfrage die Leistung von Wind an Land und Photovoltaik erhöht wurde, um den zusätzlichen Strombedarf erneuerbar decken zu können.

#### 9.2.4. Ergebnisse zur Stromerzeugung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellläufe dargestellt. Zuerst wird für das Szenario mit O-Lkw die jährliche Stromerzeugung für alle Szenariojahre dargestellt. Diese wird im Anschluss mit dem Szenario ohne O-Lkw und einem Szenario mit zusätzlichem Ausbau von erneuerbaren Energien verglichen.

Abbildung 9-3 zeigt die jährliche Gesamtstromerzeugung für die Szenariojahre 2030 bis 2050 unter Verwendung der in Tabelle 9-2 dargestellte installierte Leistung. Die Gesamtstromerzeugung steigt auf 616 TWh im Jahr 2050 an. Die Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern nimmt im Szenarioverlauf deutlich ab, während der Anteil an erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung ansteigt. Während im Jahr 2030 noch Strom aus Deutschland ins Ausland transportiert wird, entstehen in den Folgejahren leichte Importe.

**Abbildung 9-3: Jährliche Stromerzeugung im Szenario mit O-Lkw**

Quelle: Eigene Berechnungen

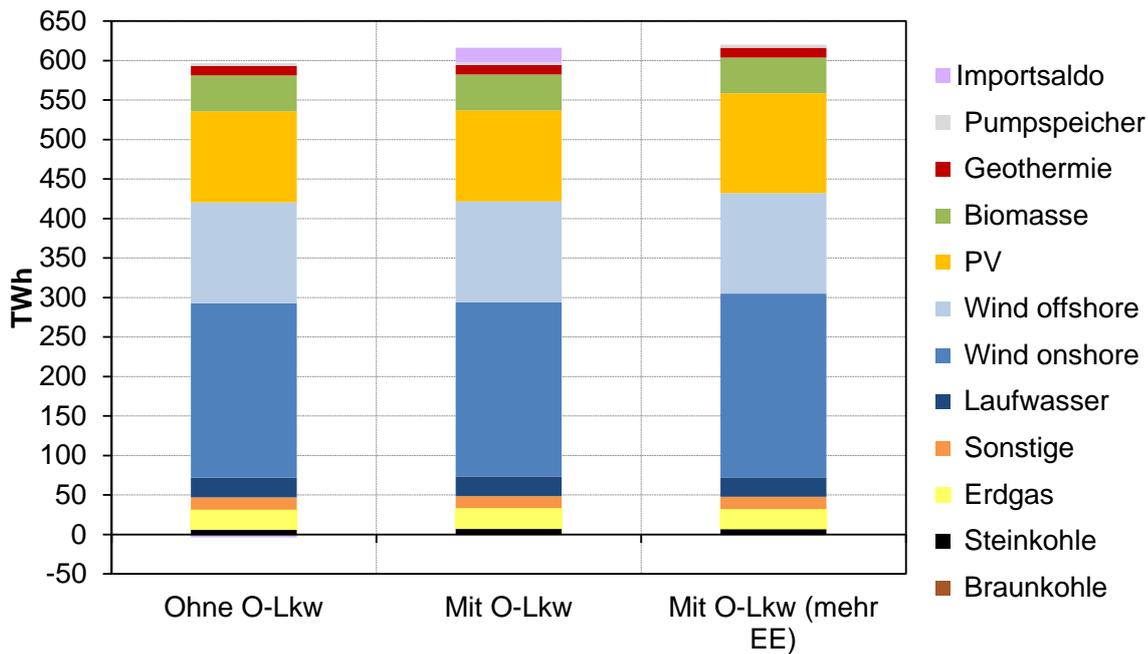
Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass die Modellierung der Stromerzeugung wie in Abschnitt 9.2.1 beschrieben auf Ergebnissen aus dem Projekt Klimaschutzszenario 2050 (2. Runde) basiert. Der dort ermittelte Kraftwerkspark ist daher ein Ergebnis der dort angenommenen wirtschaftlichen Optimierung und einer entsprechend hohen Auslastung der installierten Kraftwerkskapazitäten. Daher können im Falle einer zusätzlichen Stromerzeugung die fossilen Kraftwerke nur noch minimal stärker ausgelastet werden. Die als Import ermittelte Stromerzeugung könnte jedoch auch durch andere, zusätzlich installierte Kraftwerkskapazitäten erfolgen und kann daher auch als Leistungsbedarf interpretiert werden.

Daher wurde zusätzlich ein Modelllauf (Szenario „mehr EE“) durchgeführt, in welchem zur Deckung der zusätzlichen Stromnachfrage von O-Lkw in Höhe von 25 TWh die Leistung von Wind onshore und Photovoltaik um ca. 6 GW bzw. 13 GW erhöht wurde.

Um den Einfluss der O-Lkw auf die Stromerzeugung im Jahr 2050 zu untersuchen, zeigt Abbildung 9-4 die Stromerzeugung im Vergleich der betrachteten Szenarien. Die jährliche Stromerzeugung für 2050 wird einem Modelllauf ohne O-Lkw sowie einem Szenario mit mehr erneuerbaren Energien gegenübergestellt.

Die Grafik zeigt, dass die zusätzliche Stromnachfrage von 25 TWh nur einen geringen Einfluss auf die Erzeugung hat. Neben leicht höherer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (Vergleich ohne/mit O-Lkw), wird etwas mehr Strom aus dem Ausland importiert.

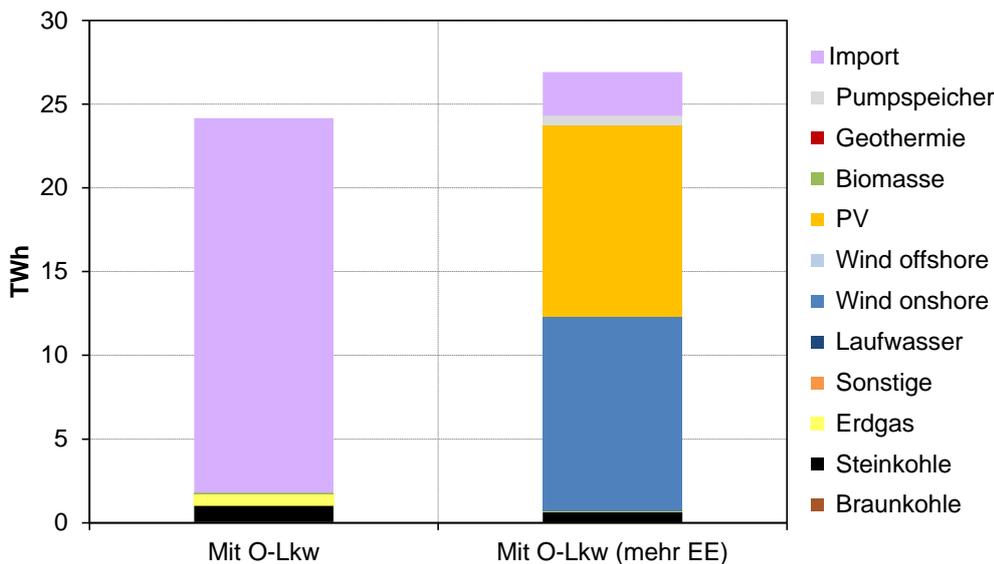
**Abbildung 9-4: Stromerzeugung im Jahr 2050 im Vergleich der Szenarien**



Quelle: Eigene Berechnungen

Dies ist auch in Abbildung 9-5 ersichtlich, in welcher die zusätzliche Stromerzeugung für die beiden Szenarien mit O-Lkw im Detail beleuchtet wird.

**Abbildung 9-5: Differenzstromerzeugung Fahrstrom O-Lkw im Jahr 2050**



Quelle: Eigene Berechnungen

Hierzu wurde für beide Szenarien die Differenz in der Erzeugung zum Szenario ohne O-Lkw ermittelt. Während für das Szenario mit zusätzlicher erneuerbarer Erzeugungsleistung diese mehrheitlich eingesetzt wird, um den Differenzstrom zu produzieren, wird im Falle gleichbleibender

Erzeugungskapazitäten der größte Teil der zusätzlichen Nachfrage importiert. Durch eine Erhöhung der EE-Erzeugungskapazitäten um 19 GW kann jedoch der Großteil der zusätzlichen Stromnachfrage der O-Lkw mit erneuerbaren Energien gedeckt werden.

Tabelle 9-3 zeigt die Emissionsfaktoren des Stromsektors in Deutschland für alle Betrachtungsjahre der drei Szenarien im Vergleich. Wie bereits für die Stromerzeugung in den vorangegangenen Abbildungen gezeigt, unterscheiden sich die Szenarien nur wenig. Daher sind auch die (mittleren) Emissionsfaktoren nur leicht unterschiedlich. Wie zu erwarten, sinkt der Emissionsfaktor im Falle der zusätzlichen Erzeugung aus erneuerbaren Energien stärker ab.

**Tabelle 9-3: Emissionsfaktor der Stromerzeugung [MtCO<sub>2</sub>]**

	2030	2040	2050
Ohne O-Lkw	364	193	83
Mit O-Lkw	364	195	85
Mit O-Lkw (mehr EE)	360	187	81

Quelle: Eigene Berechnungen

Wie die vorangegangenen Ergebnisse zeigen, macht der Fahrstrombedarf auf nationaler Ebene nur einen vergleichsweise kleinen Anteil des gesamten Strombedarfs aus. Über das gesamte Jahr betrachtet und bezogen auf die Gesamtstromerzeugung des kompletten Landes, sind die Auswirkungen auf die Stromerzeugung sowie die Emissionen daher gering. Auf regionaler Ebene können die Auswirkungen auf die Stromnachfrage jedoch erheblich größer sein. Der folgende Abschnitt 9.3 zeigt daher, wie die räumliche Verteilung von Fahrstrombedarf und erneuerbarer Stromerzeugung zusammenhängt und welche Regionen von zusätzlichem Fahrstrombedarf besonders betroffen sind.

### 9.3. Untersuchung der regionalen Verteilung des Fahrstrombedarfs

Der Fahrstrombedarf, der durch den Betrieb der O-Lkw entsteht, ist räumlich sehr inhomogen verteilt. Wo der zusätzliche Bedarf entsteht, ist im Wesentlichen abhängig vom Verlauf der elektrifizierten Autobahnabschnitte und von dem Verkehrsaufkommen auf diesen Strecken.

Dem gegenüber steht ein Stromsystem, in dem Verbraucher und Erzeuger von Elektrizität sowie die Verfügbarkeit von Übertragungs- und Verteilnetzen ebenfalls sehr inhomogen verteilt sind. Wenn beim Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung ambitionierte Ziele verfolgt werden – und in Szenarien, in denen O-Lkw eine große Rolle spielen, ist ein starker Ausbau erneuerbarer Energien sehr wahrscheinlich – ist die regionale Ungleichverteilung der Stromerzeugung besonders ausgeprägt.

In diesem Abschnitt wird diskutiert, inwiefern diese Verteilungsmuster zusammenpassen. Zunächst wird ein Szenario für eine wahrscheinliche räumliche Verteilung des Fahrstrombedarfs entwickelt. Diesem werden verschiedene Annahmen gegenübergestellt, wie sich die räumliche Verteilung von Stromnachfrage und Stromerzeugung entwickeln könnten. Insgesamt wird die räumliche Verteilung der folgenden Parameter diskutiert:

- Allgemeine Stromnachfrage
- Stromerzeugung
- Fahrstrombedarf der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge
- Fahrstrombedarf der O-Lkw.

Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um einen Vergleich von Szenarien und Datenquellen aus unterschiedlichen Studien auf einer qualitativen Ebene handelt, da eine konsistente Modellierung in hoher räumlicher Auflösung den Rahmen des hier vorgestellten Projekts gesprengt hätte.

### **9.3.1. Methodik**

Die Daten zur räumlichen Verteilung von Stromerzeugung und Stromnachfrage basieren auf der WWF-Studie Zukunft des Stromsystems II (Matthes et al. 2018). Die Studie wurde ausgewählt, weil dort eine räumlich hochaufgelöste Modellierung des Energiesystems durchgeführt wurde, in der das deutsche Übertragungsnetz mit ca. 450 Knoten vollständig abgebildet wurde. Somit sind Informationen zur räumlichen Verteilung von Stromerzeugung und Nachfrage ableitbar. Gezeigt werden die Ergebnisse zweier Szenarien, in denen die Stromerzeugung in Deutschland bis zum Jahr 2050 nahezu vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt wird. Hier besteht ein Unterschied zu dem in Kapitel 9.2 diskutierten Szenario, in dem angenommen wird, dass der Anteil erneuerbarer Energien am Strommix bis zum Jahr 2050 nur auf 80 % steigt. Der höhere Anteil erneuerbarer Energien führt entsprechend zu einem ausgeprägt inhomogenen räumlichen Verteilungsmuster der Stromerzeugung, das sich an der räumlichen Verteilung ertragreicher Anlagenstandorte orientiert. In einem der beiden Szenarien wird von einem zentralisierten EE-Ausbau ausgegangen (vorwiegend Windenergie an Land und auf See in Norddeutschland); im zweiten Szenario erfolgt der EE-Ausbau dezentral und lastnah (mit einem Schwerpunkt auf Photovoltaik und Windenergie an Land).

Der jährliche Strombedarf der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge wurde Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015) entnommen und ist somit konsistent zu Kapitel 9.2 (siehe Tabelle 9-1). Die Verteilungsschlüssel zur räumlichen Verteilung des Fahrstrombedarfs von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen basieren auf der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (Schubert et al. 2014).

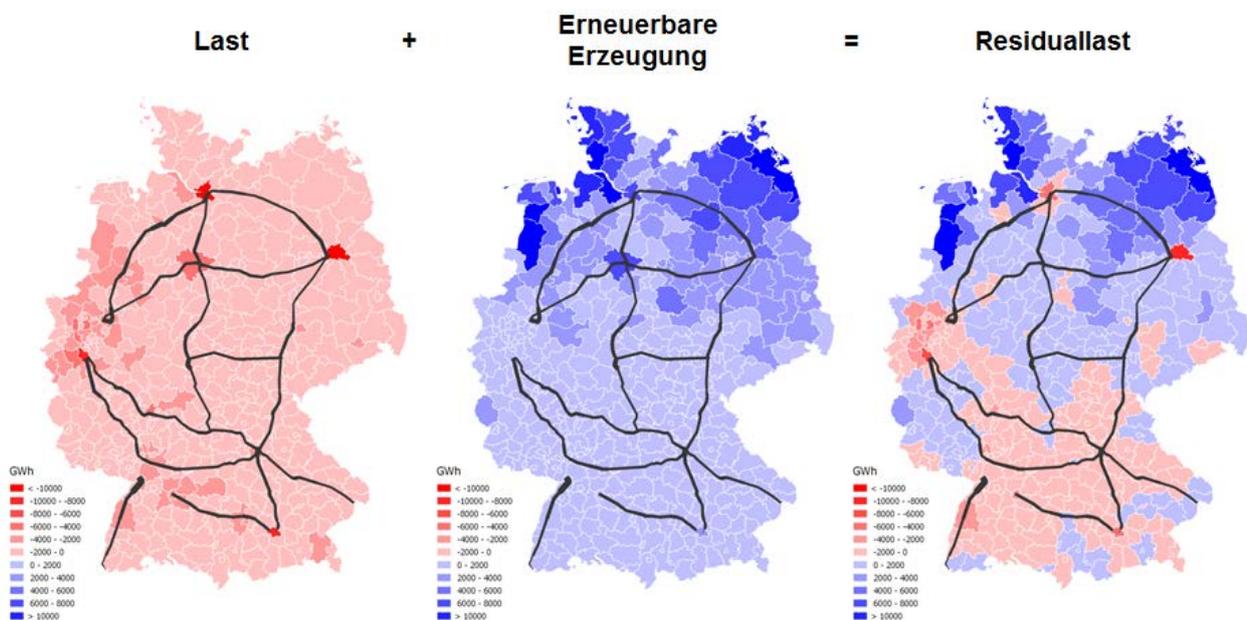
Die Verteilung der jährlichen Stromnachfrage auf die Regionen (NUTS 3, d. h. Stadt- und Landkreise) erfolgte anhand der verkehrlichen Analysen der Auswahlstrecken sowie der automatischen Zählstellendaten der Bundesanstalt für Straßenwesen zur Verkehrsstärke von Last- und Sattelzügen auf Autobahnen. Für die Regionalisierung der Stromnachfrage wurde in einem ersten Schritt anhand der verkehrlichen Analysen der Auswahlstrecken die Gesamtstromnachfrage je Strecke ermittelt, welche sich bei einer Ausschöpfung des O-Lkw-Potenzials ergibt. Die Auswahlstrecken berühren jedoch mehrere Landkreise. Anhand der BaSt-Zählstellendaten und deren Zuordnung zu NUTS3-Regionen wurde daher ausgehend von den Auswahlstrecken die Stromnachfrage weiter regionalisiert. Die Lückenschlüsse zwischen den Auswahlstrecken konnten aufgrund fehlender Daten bei der regionalen Verteilung nicht berücksichtigt werden.

### **9.3.2. Räumliche Verteilung von Stromverbrauch und Stromerzeugung**

Zur intuitiven Visualisierung der räumlichen Verteilung von Stromerzeugung und Stromverbrauch wird das Konzept der regionalen Residuallast verwendet. Die regionale Residuallast bezeichnet die regionale Stromnachfrage abzüglich der erneuerbaren Stromerzeugung in derselben Region. Anders formuliert: Die Residuallast ist der Teil der Stromnachfrage, der nicht durch regionale erneuerbare Stromerzeugung gedeckt werden kann. In Regionen mit einer negativen Residuallast muss die verbleibende Stromnachfrage durch konventionelle Erzeugung oder durch Import aus benachbarten Regionen gedeckt werden. In Regionen mit positiver Residuallast ist die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen größer als die regionale Stromnachfrage. Die so entstehenden Überschüsse können in benachbarte Regionen exportiert bzw. müssen im Falle überlasteter Netzinfrastrukturen abgeregelt werden.

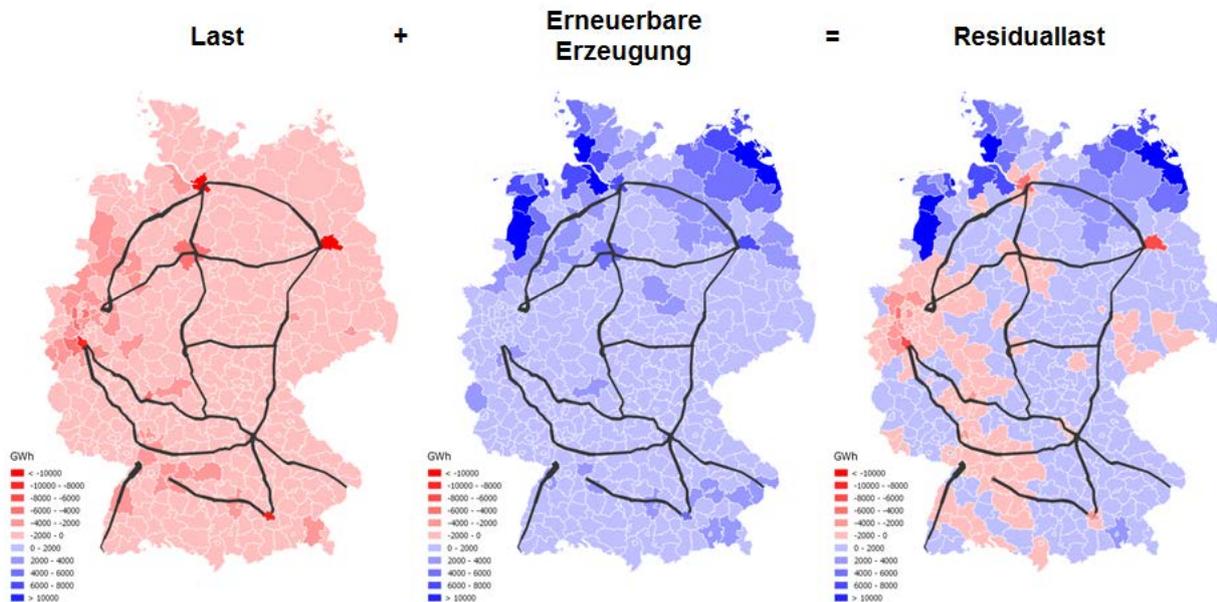
Abbildung 9-6 und Abbildung 9-7 zeigen regionale Last, erneuerbare Erzeugung und die daraus resultierende Residuallast für das Jahr 2050. Zur Orientierung sind zusätzlich die zu elektrifizierenden Strecken des Autobahnnetzes abgebildet (siehe Abschnitt 9.3.4). Bezüglich der Last ist eine deutliche Korrelation zur Bevölkerungsdichte zu erkennen – die weitaus größte Stromnachfrage ist in den urbanen Zentren und dicht bevölkerten Regionen lokalisiert. In Abbildung 9-6 wird dabei ein zentraler EE-Ausbau (Schwerpunkt auf Nutzung von Starkwind-Standorten in Norddeutschland) unterstellt. In Abbildung 9-7 wird von einem lastnahen EE-Ausbau ausgegangen (ausgeglichene Verteilung von Windkraftanlagen und Fokus auf dezentralem Ausbau von Photovoltaik). Bei zentralem EE-Ausbau ist bei der Residuallast ein deutliches Nord-Süd-Gefälle zu erkennen – in fast allen Regionen Süddeutschlands ist ein Erzeugungsdefizit zu verzeichnen, während in Norddeutschland deutliche EE-Überschüsse zu erkennen sind. Bei lastnahem EE-Ausbau zeigt sich ein etwas ausgewogeneres Bild. Insbesondere in Südostdeutschland können die regionalen Erzeugungsdefizite deutlich reduziert werden. Es zeigt sich jedoch, dass in beiden Szenarien in zahlreichen Regionen regionale Stromüberschüsse vorhanden sind, während in anderen Regionen (insbesondere im Süden und in Ballungszentren) nur ein Teil der Last durch regionale Erzeugung gedeckt werden kann.

**Abbildung 9-6: Räumliche Verteilung von Stromnachfrage und erneuerbarer Stromerzeugung im Jahr 2050 (zentrale EE-Erzeugung)**



Quelle: Eigene Berechnungen

**Abbildung 9-7: Räumliche Verteilung von Stromnachfrage und erneuerbarer Stromerzeugung im Jahr 2050 (lastnahe EE-Erzeugung)**

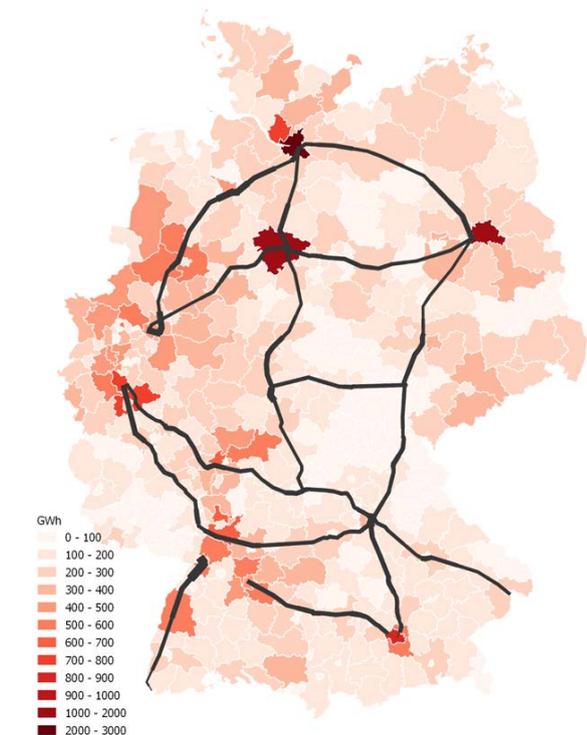


Quelle: Eigene Berechnungen

### 9.3.3. Fahrstrombedarf der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge

Abbildung 9-8 zeigt die räumliche Verteilung des Fahrstrombedarfs von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen im Jahr 2050 (jährliche Stromnachfrage je Landkreis). Die gesamte jährliche Stromnachfrage beträgt ca. 78 TWh. Auch hier zeigt sich eine deutliche Korrelation mit der Bevölkerungsdichte und dementsprechend auch mit der räumlichen Verteilung der allgemeinen Stromnachfrage (siehe Abschnitt 9.3.2).

**Abbildung 9-8: Räumliche Verteilung des Fahrstrombedarfs von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen im Jahr 2050**



Quelle: Eigene Berechnungen

#### 9.3.4. Fahrstrombedarf der O-Lkw

Abbildung 9-9 zeigt die räumliche Verteilung des Fahrstrombedarfs der O-Lkw im Jahr 2050.

Die linke Abbildung (a) zeigt den absoluten zusätzlichen Strombedarf pro Landkreis. Der Fahrstrombedarf beschränkt sich naturgemäß auf die zu elektrifizierenden Autobahnstrecken und ist im Bereich von Ballungsgebieten und entlang stark befahrener bzw. sich kreuzender Streckenabschnitte besonders hoch. Über ganz Deutschland aufsummiert beträgt der Fahrstrombedarf der O-Lkw im Jahr 2050 ca. 25,4 TWh/a. Gemessen am Strombedarf der übrigen Verbraucher von ca. 610 TWh/a (siehe Abschnitt 9.2.1) spielt der Fahrstrombedarf somit nur eine untergeordnete Rolle.

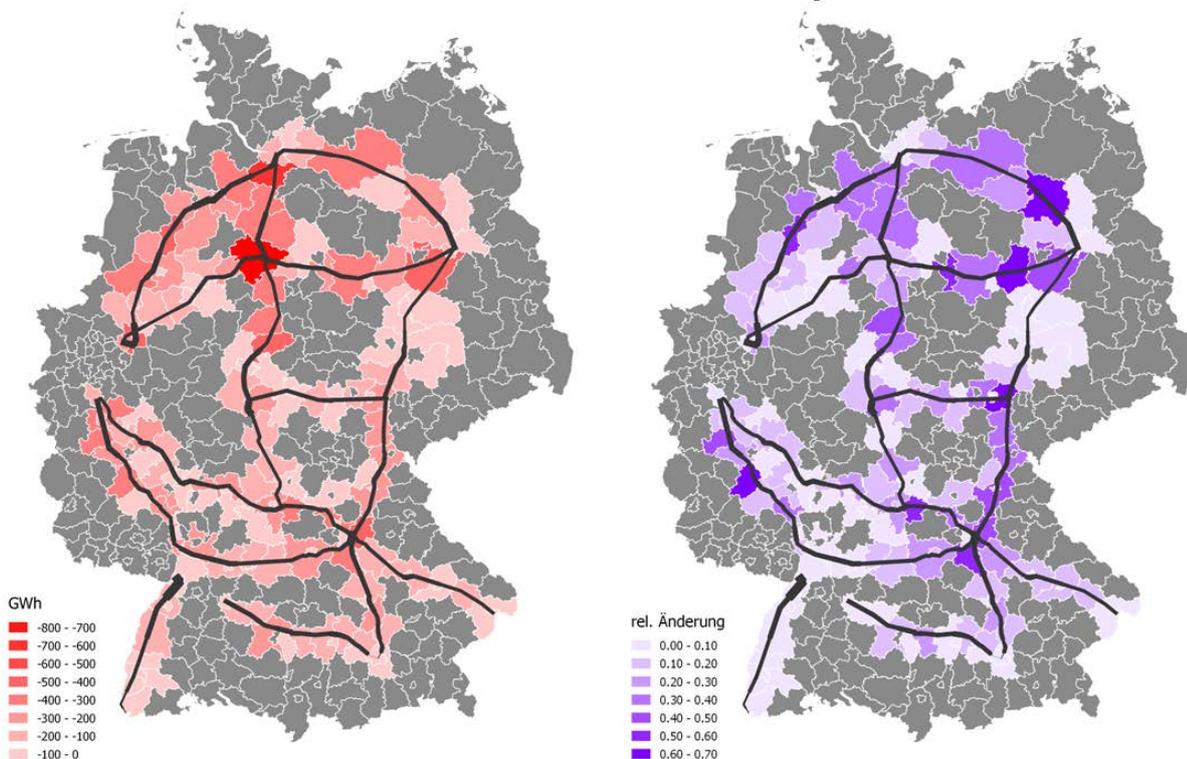
Die rechte Abbildung (b) zeigt den relativen Anstieg der regionalen Stromnachfrage, die durch den zusätzlichen Fahrstrombedarf verursacht wird. Es ist zu erkennen, dass durch den zusätzlichen Fahrstrombedarf die regionale Stromnachfrage in einigen Regionen um bis zu 70 % ansteigt. Es ist anzunehmen, dass die Integration des Fahrstroms zumindest in ländlichen Regionen erhebliche Auswirkungen auf die Netzinfrastruktur haben wird.

Ein Vergleich der regionalen Residuallasten mit der räumlichen Verteilung des Fahrstrombedarfs (siehe Abbildung 9-9) zeigt, dass zumindest sowohl Regionen mit einem Erzeugungsdefizit als auch solche mit starken EE-Überschüssen von der zusätzlichen Stromnachfrage betroffen sind. Es ist also vom geographischen Kontext abhängig und wird im Einzelfall zu prüfen sein, ob durch den Fahrstrombedarf Abregelungen erneuerbarer Energien in Überschussregionen vermieden werden können, oder ob durch die zusätzliche Nachfrage ein bereits bestehendes Lastdefizit vergrößert wird.

## Abbildung 9-9: Räumliche Verteilung des Fahrstrombedarfs von O-Lkw im Jahr 2050

(a) Jährlicher Fahrstrombedarf

(b) Relativer Anstieg der regionalen Stromnachfrage durch Fahrstrombedarf



Quelle: Eigene Berechnungen

### 9.4. Fazit

In den untersuchten Szenarien macht der Fahrstrombedarf der O-Lkw auf nationaler Ebene nur einen kleinen Anteil des gesamten Strombedarfs aus. Über das gesamte Jahr betrachtet und bezogen auf die Gesamtstromerzeugung des kompletten Landes, sind die Auswirkungen auf die Stromerzeugung sowie die Emissionen daher gering. Insgesamt kann also davon ausgegangen werden, dass aus einer energiewirtschaftlichen Perspektive ein verstärkter Einsatz von O-Lkw keine Probleme darstellt.

Bezüglich der regionalen Verteilungsmuster von Stromerzeugung und Verbrauch ist festzuhalten, dass, obwohl der Fahrstrombedarf auf nationaler Ebene nur einen kleinen Anteil des gesamten Strombedarfs ausmacht, die Auswirkungen auf regionaler Ebene erheblich sein können. Hier muss zwischen Pkw und O-Lkw differenziert werden: Während bei Pkw von einer hohen Korrelation zwischen Fahrstrombedarf und Bevölkerungsdichte auszugehen ist (der Fahrstrombedarf ist also in dicht besiedelten Regionen am höchsten), sind durch den Fahrstrombedarf der O-Lkw auch dünn besiedelte Regionen mit niedriger Stromnachfrage betroffen. In diesen Regionen können die Effekte der zusätzlichen Stromnachfrage besonders stark ausfallen.

Der zunehmende Ausbau erneuerbarer Energieträger bewirkt eine stark inhomogene Verteilung von Erzeugungsüberschüssen und Erzeugungsdefiziten. Die räumliche Verteilung hängt dabei von der gewählten EE-Ausbaustrategie ab.

Beide Effekte legen nahe, dass die unter Umständen zur Integration des Fahrstrombedarfs erforderlichen Anpassungsmaßnahmen regional sehr unterschiedlich sein werden und eine Prüfung des regionalen Kontexts auf jeden Fall angezeigt ist.

## 10. Weiterführende Forschungsfragen

### O-Lkw im Kontext möglicher Antriebsalternativen

Im Projekt StratON wurde auf unterschiedliche Hybridvarianten des O-Lkw (inklusive O-BEV) fokussiert sowie die Stärken und Schwächen von BEV im Fernverkehr nach heutigem Wissensstand und mögliche Synergien mit den Alternativen diskutiert (z. B. dynamisches Laden).

Zum jetzigen Zeitpunkt ist zu konstatieren, dass alle denkbaren Antriebsalternativen bei Lkw sich noch in einem relativ frühen Technologiereifestadium befinden und noch nicht die Serienreife erlangt haben. Angesichts der hohen Dynamik bei der Batterieentwicklung wird der batterieelektrische Antrieb voraussichtlich zu einer ernstzunehmenden Alternative bzw. Ergänzung im Straßengüterverkehr, insbesondere im Nah- und Regionalverkehr. In weiterführenden Analysen sollte daher der batterieelektrische Antrieb als weitere Technologieoption (u. a. bei der Modellierung des Markthochlaufs) verstärkt Berücksichtigung finden und unterschiedliche Ladeszenarien (an der Oberleitung sowie stationär) vertiefend analysiert werden. Dies sollte vor dem Hintergrund unterschiedlicher Anforderungen im Fern- und Nah-/Regionalverkehr geschehen.

### Realisierbare O-Lkw-Potenziale auf elektrifizierten Korridoren

Die Elektrifizierung von hochfrequentierten Autobahnen macht den Einsatz der Oberleitungstechnik für Lkw auf diesen Korridoren voraussichtlich bereits kurzfristig wirtschaftlich. Bisherige Analysen auf Basis von Quelle-Ziel-Matrizen können allerdings die betriebliche Realität, dass Lkw häufig keine festen Routen fahren, sondern flexibel zum Einsatz kommen und Wegekettens mit diversen Be- und Entladungspunkten abfahren, nicht explizit abbilden. In den Modellen können lediglich Aussagen auf Ebene von Fahrten, aber nicht von konkreten Fahrzeugen getroffen werden.

Die verstärkte Berücksichtigung von realen Fahrzeugeinsatzprofilen könnte die Aussagen zum tatsächlich realisierbaren elektrischen Fahranteil für konkrete Fahrzeuge und Einsatzzwecke verbessern. Gleichzeitig sollte dabei auch untersucht werden, welche Potenziale bestehen bzw. welche Anreize oder Geschäftsmodelle etabliert werden müssten, um eine möglichst hohe Anzahl an Fahrten über Strecken mit Oberleitungsinfrastruktur auch tatsächlich O-Lkw mit angelegtem Stromabnehmer zuzuweisen und damit die Potenziale möglichst umfassend zu erschließen. Diesem Vorgehen würde die Annahme zugrunde liegen, dass der Kostenvorteil von O-Lkw auf elektrifizierten Strecken sich auch in einen abschöpfbaren Wettbewerbsvorteil von O-Lkw beim Angebot von Fahrten auf diesem Streckennetz gegenüber konventionellen Lkw manifestieren würde.

### Zusatzpotenziale durch Regionalverkehre und andere Fahrzeugklassen

Im Vorhaben StratON wurde bei den Potenzialanalysen für das Oberleitungssystem der Fokus auf den Güterfernverkehr gelegt. Entsprechend haben die verkehrlichen Analysen sich auf die typischen Fahrzeugklassen des Güterfernverkehrs (N 3 bzw. schwere Lkw und Fahrzeugkombinationen mit mindestens vier Achsen) sowie auf Fahrten beschränkt, die mindestens 100 Kilometer auf Autobahnen mit potenzieller Elektrifizierung stattfinden.

Nach Aufbau der Infrastruktur ist jedoch auch eine Nutzung der Infrastruktur durch den Regionalverkehr denkbar – ggf. auch mit kleineren Fahrzeugen (N 2). Dadurch könnte eine höhere Auslastung

und gleichzeitig eine schnellere Amortisation der Infrastrukturinvestition erreicht werden und sich das Treibhausgasreduzierungspotenzial erhöhen. Analysen zu den zusätzlichen Potenzialen des elektrischen Regionalverkehrs und mögliche Synergien zwischen stationärer und dynamischer Ladeinfrastruktur – insbesondere für die frühe Marktphase – sollten daher zukünftig ergänzend betrachtet werden.

### **Geschäftsmodelle für den Infrastrukturaufbau**

Im Vorhaben StratON konnten wichtige Grundsatzfragen zur Finanzierung des Infrastrukturaufbaus für O-Lkw sowie zu denkbaren Geschäftsmodellen und den daran beteiligten Akteuren geklärt werden. Auf Basis der verfügbaren Daten mussten sich die Analysen dabei allerdings auf die Identifizierung typischer Akteurskonstellationen und wesentliche Grundsatzfragen z. B. zur Stromabrechnung beschränken.

Noch ausstehend – aber für den Aufbau des im Projekt herausgearbeiteten Oberleitungs-Kernnetzes in der Realität unerlässlich – ist insbesondere die Verortung von denkbaren Akteurskonstellationen in einem Technologie-Lebenszyklusmodell. Mit einer Analyse und Modellierung der zeitlich differenzierten Zuweisung von Verantwortlichkeiten an die einzelnen Akteure (z. B. einer sich verändernde Rolle des Staats im Verhältnis zur privaten Wirtschaft bei fortschreitender Netzgröße) sollten weitere wichtige Voraussetzungen dafür geschaffen werden, die Oberleitungs-Infrastruktur wirtschaftlich errichten und die in den durchgeführten Modellrechnungen geforderte Ausbaugeschwindigkeit erreichen zu können.

### **Heterogenität des Markts und der Entscheidungskalküle abbilden**

Im Rahmen von StratON und der Markthochlaufmodellierung konnten die Akteursstruktur und die Rahmenbedingungen des Güterverkehrs- und Fahrzeugmarkts nur vereinfacht abgebildet werden. Unternehmensspezifische Finanzierungsbedingungen oder Vertragslaufzeiten in der Kontraktlogistik, die die Anforderungen an Amortisationszeiträume beeinflussen, sowie Anforderungen an die Flexibilität den Fahrzeugeinsatzes konnten nicht bzw. nur vereinfachend abgebildet werden.

Um die praktischen Hemmnisse für die Einführung von O-Lkw auf Unternehmensebene besser abbilden zu können, müssten die Entscheidungskalküle zukünftig wesentlich detaillierter erfasst werden. Hierfür können die Analyse von repräsentativen Fallbeispielen sowie die empirisch repräsentative Erhebung der Anforderungen an die Fahrzeuge für den täglichen Praxiseinsatz hilfreiche Erkenntnisse liefern. Unter Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen können im Idealfall besonders geeignete Zielgruppen für den frühen Markthochlauf identifiziert und notwendige Rahmenbedingungen benannt werden.

### **Energiewirtschaftliche Implikationen im Vergleich zu den Technologiealternativen**

Die energiewirtschaftlichen Analysen haben aufgezeigt, dass der zusätzliche Strombedarf von O-Lkw auch bei einem hohen Marktanteil im Kontext der Gesamtstromerzeugung in Deutschland von nachrangiger Bedeutung ist. Von größerer Relevanz ist jedoch die räumliche Verteilung der Stromnachfrage, da sich diese insbesondere in ländlichen Gebieten teilweise deutlich erhöht wird. Zudem hat der Vergleich von O-Lkw und batterieelektrischem Lkw im Fernverkehr unter anderem gezeigt, dass die Implikationen in Bezug auf die Lastnachfrage sehr unterschiedlich sind. Während sich der Betrieb von O-Lkw durch eine zeitlich und räumlich verteilte zusätzliche Last auszeichnet, führt der Betrieb von batterieelektrischen Lkw durch die stationäre Nachladung, u. a. während der Fahrerpausen, zu einer voraussichtlich wesentlich stärkeren punktuellen Stromnachfrage.

Perspektivisch sind daher Fragen der Netzeinbindung und der Laststeuerung im Kontext von elektrischen Lkw voraussichtlich von größerer Bedeutung als die Betrachtung der Strommengen und sollten auch im Vergleich der unterschiedlichen Antriebsoptionen vertieft werden.

### **Gesellschaftliche Akzeptanz und Praxiserfahrungen mit dem System**

Im Projekt StratON wurden die Potenziale des O-Lkw-System vorrangig auf Basis von verkehrlichen, technischen und wirtschaftlichen Analysen abgeleitet. Praxiserfahrungen zu bspw. der technischen Zuverlässigkeit und der Akzeptanz konnten lediglich im Rahmen verfügbarer Daten und Experteneinschätzungen aus bisherigen Pilotvorhaben einbezogen werden. Ebenso mussten die Kostenannahmen für Fahrzeuge und Infrastrukturaufbau auf Basis von Literaturanalysen und Experteneinschätzungen abgeleitet werden.

Für eine verlässliche Einschätzung dieser Einflussfaktoren können die nun anlaufenden Pilotvorhaben im öffentlichen Straßenraum und deren wissenschaftliche Begleitung wichtige Informationen aus der Praxis liefern und eine belastbarer Datengrundlage für zukünftige Analysen liefern.

## Literaturverzeichnis

- Aberle, Gerd (2009): Transportwirtschaft. Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen. 5. überarbeitete und ergänzte Aufl. München: De Gruyter (Wolls Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften). Online verfügbar unter [http://www.degruyter.com/search?f\\_0=isbnissn&q\\_0=9783486839869&searchTitles=true](http://www.degruyter.com/search?f_0=isbnissn&q_0=9783486839869&searchTitles=true), zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- acatech; DFKI (Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz); Fraunhofer IEM (Institut für Entwurfstechnik Mechatronik) (Hg.) (2018): Studie "Autonome Systeme". Dumitrescu, Roman; Gausemeier, Jürgen; Slusallek, Philipp; Cieslik, Sarah; Demme, Georg; Falkowski, Tommy; Hoffmann, Hilko; Kadner, Susanne; Reinhart, Felix; Westermann, Thorsten; Winter, Johannes. München, Kaiserslautern, Paderborn (Studien zum deutschen Innovationssystem, 13-2018). Online verfügbar unter [https://www.e-fi.de/fileadmin/Innovationsstudien\\_2018/StuDIS\\_13\\_2018.pdf](https://www.e-fi.de/fileadmin/Innovationsstudien_2018/StuDIS_13_2018.pdf), zuletzt geprüft am 12.11.2018.
- Agora Energiewende; Agora Verkehrswende; Frontier Economics (2018): The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels. Berlin.
- Alfen, Hans Wilhelm; Buschmeier, Bernd. (2013): Öffentlich-Private Partnerschaften – Initiative NRW, ÖPP im Vergleich zu anderen Organisationsmodellen der öffentlichen Beschaffung. Finanzministerium des Landes Nordrhein-Westfalen, Bauhaus-Universität Weimar.
- BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) (Hg.) (2016): Feldversuch mit Lang-Lkw. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Marco Irzik, Thomas Kranz, Jan-André Bühne, Klaus-Peter Glaeser, Sigrid Limbeck und Jost Gail. Bergisch Gladbach. Online verfügbar unter [https://www.bast.de/BAST\\_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-lang-Lkw/v-lang-Lkw-abschluss.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-lang-Lkw/v-lang-Lkw-abschluss.pdf?__blob=publicationFile&v=3), zuletzt geprüft am 23.10.2018.
- BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) (2017): Ergebnisse Fahrleistungserhebung 2014. Online verfügbar unter <http://www.bast.de/DE/Verkehrssicherheit/Fachthemen/u2-fahrleistung-2014/u2-Fahrleistung-2014-ergebnisse.html?nn=605482>, zuletzt geprüft am 05.07.2017.
- Bäumer, Marcus; Hautzinger, Heinz; Pfeiffer, Manfred; Stock, Wilfried; Lenz, Barbara; Kuhnimhof, Tobias Georg; Köhler, Katja (2017): Fahrleistungserhebung 2014 - Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. Hg. v. BAST. Bremen (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Unterreihe Verkehrstechnik, V 291). Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fn17/1001674367.pdf>, zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- Bernecker, Tobias; Boysen, Jens (2018): Oberleitungs-Lkw und Kombiniertes Verkehr Straße/Schiene. In: unikat (Hg.): Jahrbuch Logistik 2018. Wuppertal, S. 118–122.
- Bernecker, Tobias; Schwarz, Oliver; Winter, Elena; Raiber, Steffen (2016): Logistikinnovationen Baden-Württemberg. Eine Einschätzung aus Verlager- und Dienstleistersicht. Hg. v. Fraunhofer IAO (Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation). Stuttgart.
- BGL (Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung) (Hg.) (2016): Verkehrswirtschaftliche Zahlen (VWZ) 2015/2016. Frankfurt am Main, zuletzt geprüft am 23.10.2018.
- BGL (Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung) (Hg.) (2018): BGL Brancheninfo. Frankfurt a. M.
- BIEK (Bundesverband Paket und Expresslogistik) (Hg.) (2018): KEP-Studie 2018 - Analyse des Marktes in Deutschland. Berlin.

- BMF (Bundesfinanzministerium) (2017): Regierungsentwurf des Bundeshaushaltes 2018 und des Finanzplans bis 2021, [https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Abt\\_2/2017-06-28-PM-zahlen-und-fakten.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Abt_2/2017-06-28-PM-zahlen-und-fakten.pdf?__blob=publicationFile&v=2), zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- BMU (Hg.) (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2019): Projektionsbericht 2019 für Deutschland.
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (Hg.) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin.
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2017): Klimaschutz in Zahlen: Der Sektor Verkehr.
- BMUB (Hg.) (2019): BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Projektionsbericht 2019 für Deutschland, gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013, 2019. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/download/projektionsbericht-der-bundesregierung-2019/>, zuletzt geprüft am 23.05.2019.
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (Hg.) (2016): Forschungsinformationssystem. Ladungsverkehr. Forschungsinformationssystem. Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/52193/>, zuletzt aktualisiert am 08.03.2016, zuletzt geprüft am 25.10.2018.
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (Hg.) (2017): Masterplan Schienengüterverkehr. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StV/masterplan-schienengueterverkehr.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StV/masterplan-schienengueterverkehr.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 12.11.2018.
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (Hg.) (2017a): Verkehr in Zahlen 2017/18. 45. aktualisierte Neuauflage, revidierte Ausgabe. Hamburg: DVV Media Group.
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (Hg.), Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2014): Verkehr in Zahlen 2013/2014
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2018a): Das A-Modell (Ausbaumodell), <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/oepp-geschaeftsmodelle-a-modell.html?nn=36122>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2018b): Das F-Modell <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/oepp-geschaeftsmodelle-f-modell.html?nn=12830>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2018c): Das V-Modell (Verfügbarkeitsmodell), <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/oepp-geschaeftsmodelle-v-modell.html?nn=12830>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2016): Erneuerbare Energien in Zahlen, [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=8), zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Brandenburg, Hans; Oelfke, Dorit; Waschkau, Siegfried (2016): Güterverkehr - Spedition - Logistik. Leistungserstellung in Spedition und Logistik. 42. Auflage. Köln: Bildungsvlag EINS.
- BReg (Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland) (2017): Projektionsbericht 2017 für Deutschland. gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013.

- Clausen, Uwe; Geiger, Christiane (Hg.) (2013): Verkehrs- und Transportlogistik. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34299-1>.
- Cookson, Graham (2018): INRIX Global Traffix Scorecard. Hg. v. INRIX Research. Kirkland (USA).
- DB Energie (2014): Zugang zum Bahnstromnetz der DB Energie GmbH.
- DB Energie (2018): Auskunft per E-Mail (31.07.2018 / 03.08.2018).
- Delgado, Oscar; Rodríguez, Felipe; Muncrief, Rachel (2017): Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020–2030 timeframe. International Council on Clean Transportation (ICCT). Berlin (White Paper). Online verfügbar unter [http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential\\_ICCT-white-paper\\_14072017\\_vF.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf).
- Doderer, Hannes; Paulson, Joy: Güterverkehrskonzept Baden-Württemberg. Rechtswissenschaftliche Studie zur Ausweitung der 44-t-Regelung. Hg. v. IKEM - Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. 2018.
- DSLV (Bundesverband Spedition und Logistik) (Hg.) (2015): Zahlen, Daten, Fakten aus Spedition und Logistik.
- DSLV (Bundesverband Spedition und Logistik) (Hg.) (2018): Umsatz und Beschäftigte. Online verfügbar unter [https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/id/pa\\_de\\_beschaefigte.html](https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/id/pa_de_beschaefigte.html), zuletzt geprüft am 23.10.2018.
- Ernst & Young (Hg.) (2017): Autonomes Fahren in Deutschland. Ergebnisse einer Befragung von 1.000 Verbrauchern. Eschborn.
- Europäische Kommission (15.04.2014): Neue EU-Vorschriften für sichere und umweltfreundlichere Lkw: Europäisches Parlament billigt Vorschlag der Kommission. Pressemitteilung. Brüssel. Online verfügbar unter [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-14-443\\_de.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-443_de.htm), zuletzt geprüft am 12.11.2018.
- Europäische Kommission (Hg.) (2018): Support for preparation of the impact assessment for CO2 emissions standards for Heavy Duty Vehicles. Final report for 'SR9 Heavy Duty Vehicles CO2'. TNO innovation for life (TNO); Graz University of Technology; CE Delft; International Council on Clean Transportation (ICCT).
- Europäische Union (Hg.) (2018): EU transport in figures. Statistical pocketbook 2018. Brüssel. Online verfügbar unter <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/52f721ed-c6b8-11e8-9424-01aa75ed71a1>, zuletzt geprüft am 12.11.2018.
- FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (2017): Energiekonzerne müssen 300 Millionen draufzahlen, <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/energiepolitik/atomausstieg-kosten-fuer-energiekonzerne-steigen-um-300-mio-15000799.html>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Fraunhofer SCS (Arbeitsgruppe für Supply Chain Services SCS) (2018): Umsatz der Logistikbranche in Deutschland von 1995 bis 2017 (in Milliarden Euro). Statista. Hg. v. Statista. Hamburg. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/166970/umfrage/umsatz-der-logistikbranche-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- Gabler Wirtschaftslexikon (2018) (Hg.): Leasing – Definition, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/leasing-40697/version-264076> Version von Leasing vom 19.02.2018 - 16:47, zuletzt geprüft am 31.08.2018

- Gerbert, Philipp; Herhold, Patrick; Buchardt, Jens; Schönberger, Stefan; Rechenmacher, Florian; Krichner, Almut et al. (2018): Klimapfade für Deutschland. Hg. v. Bundesverband der deutschen Industrie (BDI). The Boston Consulting Group (BCG); Prognos. Berlin, Basel, Hamburg, München.
- Grandjot, Hans-Helmut; Bernecker, Tobias (2014): Verkehrspolitik. Grundlagen, Herausforderungen, Perspektiven. 2., komplett überarb. Aufl. Hamburg: DVV Media Group.
- Gruber, Christian (2015): LNG und CNG im schweren Lkw-Verkehr – Entwicklungspotenziale der Motorentechnologien. Fachworkshop im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). MAN. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-fachworkshop-Ing-cng-Ing-dokumentation.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-fachworkshop-Ing-cng-Ing-dokumentation.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 10.10. 2019.
- Hacker, Florian; Blanck, Ruth; Hülsmann, Friederike; Kasten, Peter; Loreck, Charlotte; Ludig, Sylvie et al. (2014): eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Öko-Institut (ÖI). Berlin.
- Heerwagen, Mathias (2015): Schwere Zeiten für Gebrauchte, <https://www.eurotransport.de/artikel/nutzfahrzeug-markt-schwere-zeiten-fuer-gebrauchte-6637787.html>, zuletzt geprüft am 15.09.2018.
- Heidt, Christoph; Biermann, Kai; Dünnebeil, Frank; Jamet, M.; Lambrecht, Udo; Althaus, Hans-Jörg (2018): Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. Abschlussbericht. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau (Texte, 12/2019).
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung (HMWEVW) (2017): ELISA - Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen. Online verfügbar unter <https://mobil.hessen.de/ELISA>, zuletzt aktualisiert am 28.05.2019, zuletzt geprüft am 13.06.2019.
- HMWEVW (Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung) (2017): ELISA - Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen. Online verfügbar unter <https://mobil.hessen.de/ELISA>, zuletzt aktualisiert am 28.05.2019, zuletzt geprüft am 13.06.2019
- Heuzeroth, Thomas (2016): Telekom – Glasfaser für viele Deutsche zu schnell, <https://www.welt.de/wirtschaft/webwelt/article152457733/Telekom-Glasfaser-fuer-viele-Deutsche-zu-schnell.html>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Heymann, Eric (2017): Logistik in Deutschland: zurück auf Wachstumskurs. Hg. v. DVZ. Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.dvz.de/rubriken/markt-unternehmen/detail/news/logistik-in-deutschland-zurueck-auf-wachstumskurs.html>, zuletzt geprüft am 08.11.2018.
- Hoffmann, Anette (2007): Unternehmensübergreifendes Kostenmanagement in intermodalen Prozesskette: Theoretische Fundierung und erste empirische Ergebnisse, Köln: Kölner Wiss.-Verlag.
- Holderied, Cornelius (2005): Güterverkehr, Spedition und Logistik. Managementkonzepte für Güterverkehrsbetriebe, Speditionsunternehmen und logistische Dienstleister. München: Oldenbourg. Online verfügbar unter <http://www.oldenbourg-link.com/doi/book/10.1524/9783486700299>, zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- Hüls, Norbert (2016): Schlepplmonopol im Nordwesten, Duisburg: WSA Duisburg-Meiderich.

- Huth, Michael (2015): Wiley-Schnellkurs Logistik. 1. Aufl. s.l.: Wiley-VCH (Wiley Schnellkurs). Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4044633>, zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- ICCT (International Council on Clean Transportation) (2017): Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: Baseline and Potential for the 2020-2030 Time Frame. Unter Mitarbeit von Oscar Delgado, Felipe Rodriguez und Rachel Muncrief. Hg. v. ICCT. Berlin.
- Ihde, Gösta B. (2001): Transport, Verkehr, Logistik. Gesamtwirtschaftliche Aspekte und einzelwirtschaftliche Handhabung. 3., völlig überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Ingelfinger, Dietmar; Liedke, Manuel (2012): Leichtbau-Fahrgestell mit Einzelradaufhängung für leichte Lkw. In: ATZ 114 (09), S. 672–676.
- Intraplan Consult GmbH, BAG Luftverkehr (2018): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Kurzfristprognose Sommer 2018
- Intraplan Consult GmbH, BVU GmbH, IVV Aachen, Planco Consulting GmbH (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030 Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs, FE-Nr. 96.0981/2011, Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
- Intraplan Consult GmbH (2010): Sensitivitätsmodell "Pro Move 25" (Prognose-Modell Verkehrsverflechtungen 2025), im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
- IW Consult; Fraunhofer IAO (Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation) (2018): Veränderungen der bayerischen Automobilindustrie durch automobiler Megatrends. Studie. Eine vbw/ bayme vbm Studie, erstellt von IW Consult GmbH und Fraunhofer IAO. Hg. v. vbw und bayme vbm. München. Online verfügbar unter [https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2018/Downloads/Studie-IW-Automobil\\_final.pdf](https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2018/Downloads/Studie-IW-Automobil_final.pdf), zuletzt geprüft am 12.11.2018.
- KBA (Kraftfahrtbundesamt) (2017): Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. FZ 13. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg.
- KBA (Kraftfahrtbundesamt) (Hg.) (2018a): Erneut mehr Gesamtkilometer bei geringerer Jahresfahrleistung je Fahrzeug. Online verfügbar unter [https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/2017\\_vk\\_kurzbericht\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=14](https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/2017_vk_kurzbericht_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=14), zuletzt geprüft am 23.10.2018.
- KBA (Kraftfahrtbundesamt) (Hg.) (2018b): Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach Herstellern. FZ 19. Flensburg. Online verfügbar unter [https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2018/fz19\\_2018\\_pdf.pdf;jsessionid=C28606D9E44C61614CDA8648F134B27A.live21302?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2018/fz19_2018_pdf.pdf;jsessionid=C28606D9E44C61614CDA8648F134B27A.live21302?__blob=publicationFile&v=2), zuletzt geprüft am 12.11.2018.
- Kartschall, André (2016): Riskante Wette auf die Zukunft, <https://www.rbb24.de/wirtschaft/thema/braunkohle/beitraege/EPH-Kosten-Braunkohle.html>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Kasten, Peter; Mottschall, Moritz; Köppel, Wolfgang; Dehoust, Günther, Charlotte; Schmied, Martin; Wüthrich, Philipp (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau.

- Kleine, Jens; Kling, Thomas; Krautbauer, Matthias (2015): Infrastrukturfinanzierung: Einbringungsmöglichkeiten privaten Kapitals in Deutschland, München: Steinbeis Research Center for Financial Services.
- Kühnel, Sven; Hacker, Florian; Görz, Wolf (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Erster Teilbericht des Forschungsvorhabens „StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“. Öko-Institut (ÖI). Freiburg, Berlin, Darmstadt.
- Lanzinger, Ralf (2018): Finanzierung des Fuhrparks - Speditionen kaufen weiterhin gerne Lkw, <https://www.eurotransport.de/artikel/finanzierung-des-fuhrparks-speditionen-setzen-weiterhin-auf-kauf-von-lkw-10387462.html>, zuletzt geprüft am 28.01.2019.
- Lobig, Anika; Liedtke, Gernot; Knörr, Wolfram (2017): Beitrag des Schienengüterverkehrs zur Energiewende. In: *Internationales Verkehrswesen* 69, S. 48–52, zuletzt geprüft am 31.05.2017.
- Lohre, Dirk; Bernecker, Tobias (2012): Grüne Logistik. Ein Gewinn für Verlader und Logistikdienstleister. Hg. v. Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart. Stuttgart.
- Lohre, Dirk; Bernecker, Tobias; Stock, Wilfried; Düsseldorf, Karl (2014): ZF-Zukunftsstudie Fernfahrer 2.0. Der Mensch im Transport- und Logistikmarkt. Hg. v. EuroTransportMedia. Stuttgart.
- Lohre, Dirk; Pfennig, Roland; Poerschke, Viktoria; Gotthardt, Ruben (2015): Nachhaltigkeitsmanagement für Logistikdienstleister. Ein Praxisleitfaden. Wiesbaden Germany: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=1048534>, zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- Martin, Heinrich (2016): Transport- und Lagerlogistik. Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-14552-1>, zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- Matthes, Felix; Flachsbarth, Franziska; Loreck, Charlotte; Hermann, Hauke; Falkenberg, Hanno; Cook, Vanessa (2018): Zukunft Stromsystem II. Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung. Vom Ziel her denken. Hg. v. WWF Deutschland. Öko-Institut e.V. (ÖI); Prognos. Berlin.
- Meszler, Dan; Delgado, Oscar; Rodríguez, Felipe; Muncrief, Rachel (2018): European Heavy Duty Vehicles: Cost-effectiveness of fuel-efficiency technologies for long-haul tractor-trailers in the 2025–2030 timeframe. International Council on Clean Transportation (ICCT). Washington (White Paper).
- Mercedes-Benz CharterWay (2018): Für alle, die sich keinen Fehltritt erlauben dürfen: Mercedes-Benz CharterWay - Mieten ohne böse Überraschungen, [https://charterway.mercedes-benz.com/de\\_DE/services/rent-and-drive.html](https://charterway.mercedes-benz.com/de_DE/services/rent-and-drive.html), zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Mottschall, Moritz; Kasten, Peter; Kühnel, Sven; Minnich, Lukas (2019): Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut e.V. (ÖI). Dessau-Roßlau (Texte, 114/2019). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sensitivitaeten-zur-bewertung-der-kosten>.
- Muchna, Claus; Brandenburg, Hans; Fottner, Johannes; Gutermuth, Jens (2018): Grundlagen der Logistik. Begriffe, Strukturen und Prozesse. Wiesbaden: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-18593-0>, zuletzt geprüft am 10.10.2019.

- NOZ Neue Osnabrücker Zeitung (2016): Rekordzahl ausländischer Lkw auf deutschen Maut-Straßen, <https://www.noz.de/deutschland-welt/wirtschaft/artikel/665399/rekordzahl-auslandischer-Lkw-auf-deutschen-maut-strassen>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Öko-Institut (2014): eMobil 2050, Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Berlin, 2014.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI - Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (2015): Klimaschutzszenario 2050, 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin, 18.12.2015.
- Prognos; Thinkstep (2017): Analyse des Einsatzes von Lang-Lkw im Hinblick auf seine Klimaeffekte. im Auftrag von LUBW und Daimler AG. Hg. v. LUBW. Karlsruhe, Stuttgart.
- Robinius, Martin; Linßen, Jochen; Grube, Thomas; Reuß, Markus; Stenzel, Peter; Syranidis, Konstantinos; Kuckertz, Patrick; Stolten, Detlef (2017): Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Band 408, ISBN 978-3-95806-295-5.
- Rücker, Julius; Helms, Hinrich; Jöhrens, Julius; Kräck, Jan; Lambrecht, Udo; Veres-Homm, Uwe; Waßmuth, Volker (2018): Vorteilhafte Einsatzfelder von Oberleitungs-Hybrid-Lkw. Ergebnisworkshop zur Potentialanalyse im Projekt „Roadmap OH-Lkw“. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE); Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen; PTV Transport Consult; M-
- SAE International (Hg.) (2014): Taxonomie and Definitions for Terms related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. J3016. Online verfügbar unter [https://www.sae.org/standards/content/j3016\\_201401/preview/](https://www.sae.org/standards/content/j3016_201401/preview/), zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- Schubert, Markus; Kluth, Tobias; Nebauer, Gregor; Ratzenberger, Ralf; Kotzagiorgis, Stefanos; Butz, Bernd et al. (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht. Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Intraplan Consult (Intraplan); Beratergruppe Verkehr + Umwelt (BVU); Ingenieurgruppe IVV (IVV); Planco Consulting (Planco). Freiburg, München, Aachen, Essen.
- Schwedes, Oliver; Canzler, Weert; Knie, Andreas (Hg.) (2016): Handbuch Verkehrspolitik. 2. Aufl. 2016. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden (Springer NachschlageWissen). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04693-4>.
- Schwemmer, Martin (Hg.) (2016): Die Top 100 der Logistik. Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer in der Logistikdienstleistungswirtschaft. Ausg. 2016/2017. Hamburg: DVV Media Group Dt. Verkehrs-Verl.
- Schwemmer, Martin; Pflaum, Alexander (2017): TOP 100 in European transport and logistics services. Market sizes, market segments and market leaders in the European logistics industry. 2017. Aufl. Hamburg: DVV Media Group.
- Siems, Dorothea (2017): Deutschland – die Investitionsruine, <https://www.welt.de/wirtschaft/article168220608/Deutschland-die-Investitionsruine.html>, zuletzt geprüft am 12.09.2018.
- Statistisches Bundesamt (Hg.) (2017a): Deutscher Außenhandel. Export und Import im Zeichen der Globalisierung. Wiesbaden. Online verfügbar unter

[https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Aussenhandel/Gesamtentwicklung/AussenhandelWelthandel5510006159004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Aussenhandel/Gesamtentwicklung/AussenhandelWelthandel5510006159004.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 08.11.2018.

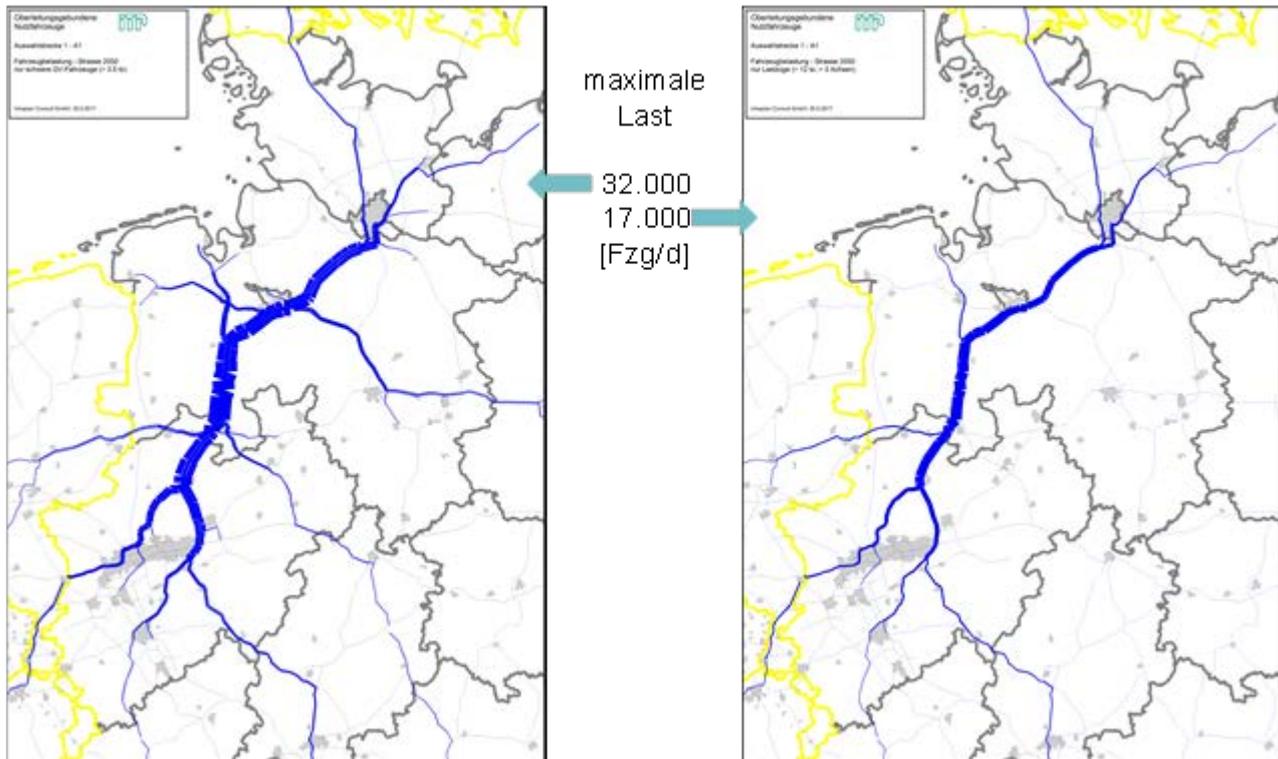
- Statistisches Bundesamt (Hg.) (2017b): Produzierendes Gewerbe. Beschäftigte, Umsatz und Investitionen der Unternehmen und Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Wiesbaden (Fachserie 4 Reihe 4.2.1). Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/BeschaefigteUmsatzInvestitionen2040421167004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/BeschaefigteUmsatzInvestitionen2040421167004.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 08.11.2018.
- Statistisches Bundesamt (Hg.) (2017c): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Anlagevermögen nach Sektoren. Wiesbaden. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/Vermögensrechnung/AnlagevermögenSektoren5816101177004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/Vermögensrechnung/AnlagevermögenSektoren5816101177004.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 08.11.2018.
- Statistisches Bundesamt (Hg.) (2018a): Güterbeförderung/ Beförderungsleistung. Güterverkehr. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Gueterverkehr/Tabellen/GueterbefoerderungLR.html>, zuletzt geprüft am 08.11.2018.
- Statistisches Bundesamt (Hg.) (2018b): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Bruttoinlandsprodukt, Bruttonationaleinkommen, Volkseinkommen. Lange Reihen ab 1925. Wiesbaden. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/VGR/Inlandsprodukt/Tabellen/Volkseinkommen1925\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/VGR/Inlandsprodukt/Tabellen/Volkseinkommen1925_pdf.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 08.11.2018.
- Stock, Wilfried; Bernecker, Tobias (2014): Verkehrsökonomie. Eine volkswirtschaftlich-empirische Einführung in die Verkehrswissenschaft. 2., vollst. überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02308-9> zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- Straßburg, Samuel; auf der Mauer, Alex; Piégsa, Alexander; Kritzinger, Stephan; Rexeis, Martin; Hausberger, Stefan; Kies, Antonius (2018): Energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut. Implementierung von Effizienzklassen. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Prognos AG (Prognos); Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH (FVT). Basel.
- Tagesspiegel (2018): Vorwürfe gegen den Maut-Betreiber: Dubiose Rechnungen von Toll Collect (09.08.2018); <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/vorwuerfe-gegen-den-maut-betreiber-dubiose-rechnungen-von-toll-collect/22899306.html>; zuletzt geprüft am 04.09.2018.
- TCI Röbling; Universität St. Gallen (2016): Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw. FE 89.0315/2015. Schlussbericht. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach. Online verfügbar unter [http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-lang-Lkw/Berichte/89315.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-lang-Lkw/Berichte/89315.pdf?__blob=publicationFile&v=3), zuletzt geprüft am 12.11.2018.
- Toll Collect (2018): Zwei Länder, eine OBU – Mauterhebung in Deutschland und Österreich, [https://www.toll-collect.de/de/toll\\_collect/service/mautservice\\_oesterreich/toll2go.html](https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/service/mautservice_oesterreich/toll2go.html), zuletzt geprüft am 02.08.2018.
- Wietschel, Martin; Gnann, Till; Kühn, André; Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Speth, Daniel et al. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Fraunhofer Institut für System- und Innovationstechnik (ISI); Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML); PTV Transport Consult; TU Hamburg-Harburg; M-Five. Karlsruhe.

- Wittenbrink, Paul (2014): Transportmanagement. Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe. 2., vollst. neu bearb. u. erw. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-3825-1>, zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- Wohlfahrt, Kai (2016): PPP: Zu Finanzierungsformen, Kapitalmarktrelevanz und öffentlicher Verschuldung, Potsdam: Universität Potsdam.
- Woll, Artur (1996): Allgemeine Volkswirtschaftslehre. 12., überarb. und erg. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Wolter, Maria (2003): BOT im Bauwesen – Grundlagen, Risikomanagement, Praxisbeispiele, Berlin: Springer-Verlag.
- Zimmer, Wiebke; Buchert, Matthias; Degreif, Stefanie; Hacker, Florian.; Harthan, Ralph; Hermann, Hauke; Jenseit, Ww Wolfgang; Kasten, Peter; Loreck, Charlotte; Götz, Konrad; Sunderer, Georg.; Birzle-Harder, Brigitte.; Deffner, Jutta (2011): OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft, Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft. Öko-Institut e.V.; ISOE. Öko-Institut e.V. (Hg.). Berlin, 2011.
- Zimmer, Wiebke; Blanck, Ruth; Bergmann, Thomas; Mottschall, Moritz; Waldenfels, Rut von; Förster, Hannah et al. (2016): Endbericht Renewability III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Studie im Auftrag des BMUB 2016. Öko-Institut; DLR; ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU); Infrac.

## Anhang A: Detaildarstellung zu verkehrlichen Analysen

**Abbildung 11-1: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 1 – A1 zw. Hamburg und Dortmund – bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-1: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 1 – A1 zwischen Hamburg und Dortmund 2050 im DTV-w**

Auswahlstrecke 1						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	235.141	5.631	1.070.680	27,5%	bis 100	228.787
bis 100	103.964	2.482	486.307	12,5%	101 - 250	379.971
bis 100	66.780	1.488	284.544	7,3%	251 - 500	504.621
bis 100	30.836	770	186.823	4,8%	ab 501	1.039.020
101 - 250	438.782	2.740	584.125	15,0%	bis 100	108.641
101 - 250	140.461	929	226.572	5,8%	101 - 250	141.590
101 - 250	95.213	622	167.517	4,3%	251 - 500	204.367
101 - 250	77.411	452	128.858	3,3%	ab 501	558.504
251 - 500	484.220	1.498	294.738	7,6%	bis 100	55.961
251 - 500	177.471	534	143.468	3,7%	101 - 250	80.837
251 - 500	45.142	138	39.645	1,0%	251 - 500	45.416
251 - 500	23.969	76	21.643	0,6%	ab 501	86.964
ab 501	591.218	428	97.728	2,5%	bis 100	18.385
ab 501	312.934	289	81.001	2,1%	101 - 250	48.013
ab 501	221.831	153	43.990	1,1%	251 - 500	51.474
ab 501	165.069	104	29.839	0,8%	ab 501	143.541

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 212 km

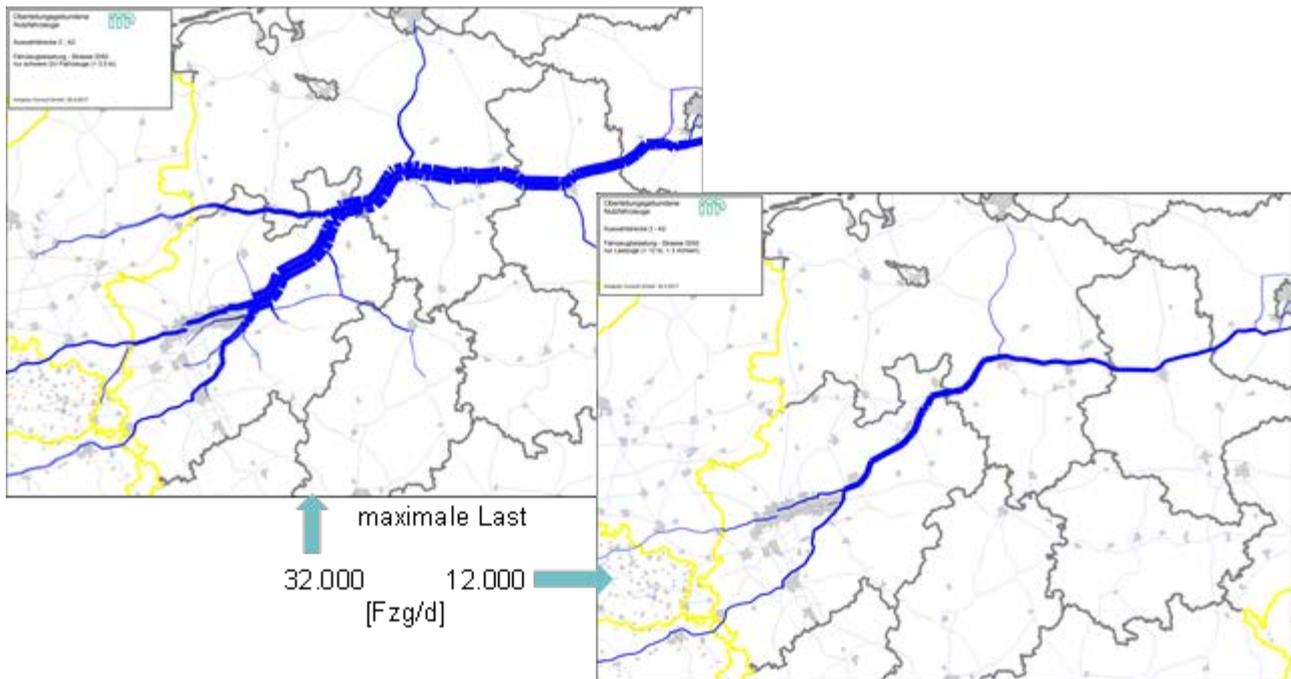
im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 175 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 202 km

**Abbildung 11-2: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 2 – A2 zwischen Dortmund und Hannover – bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km  
Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-2: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 2 – A2 zwischen Dortmund und Hannover 2050 im DTV-w**

Auswahlstrecke 2						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	93.133	1.928	279.917	13,7%	bis 100	87.662
bis 100	54.952	1.446	214.470	10,5%	101 - 250	242.620
bis 100	35.250	825	137.458	6,7%	251 - 500	261.264
bis 100	25.600	606	104.080	5,1%	ab 501	661.615
101 - 250	217.981	1.339	204.628	10,0%	bis 100	50.080
101 - 250	72.686	470	88.994	4,4%	101 - 250	79.152
101 - 250	89.145	542	105.634	5,2%	251 - 500	184.479
101 - 250	69.464	399	78.035	3,8%	ab 501	531.343
251 - 500	289.854	861	142.620	7,0%	bis 100	33.263
251 - 500	205.271	570	111.242	5,5%	101 - 250	88.245
251 - 500	91.332	257	50.529	2,5%	251 - 500	87.644
251 - 500	137.361	381	74.899	3,7%	ab 501	590.824
ab 501	585.986	517	86.898	4,3%	bis 100	21.146
ab 501	403.698	346	67.392	3,3%	101 - 250	56.007
ab 501	2.093.565	1.214	238.599	11,7%	251 - 500	359.713
ab 501	346.367	267	52.440	2,6%	ab 501	418.358

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 170 km

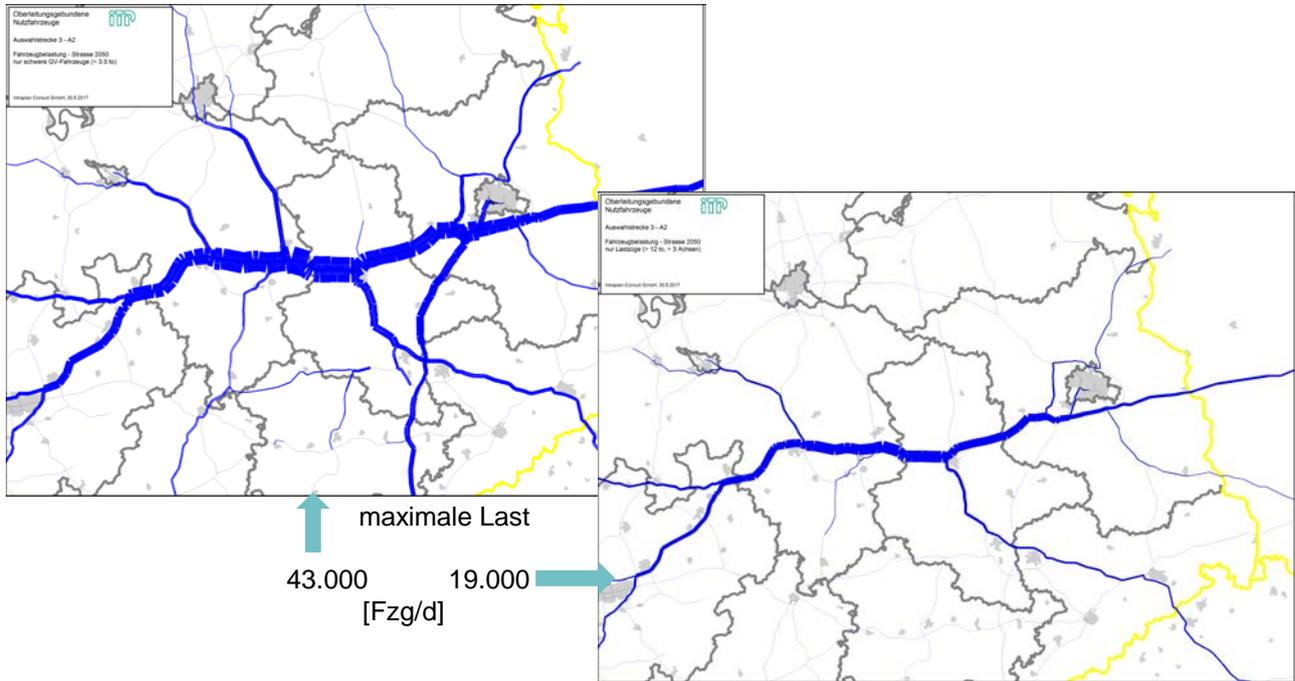
im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 402 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 314 km

**Abbildung 11-3: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 3 – A2 zwischen Hannover und Berlin – bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km  
Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-3: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 3 – A2 zwischen Hannover und Berlin 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 3						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	76.792	1.810	284.284	7,9%	bis 100	80.662
bis 100	75.219	1.524	270.091	7,5%	101 - 250	257.700
bis 100	52.072	1.127	213.857	5,9%	251 - 500	384.439
bis 100	26.361	574	100.363	2,8%	ab 501	730.548
101 - 250	293.318	1.767	320.119	8,9%	bis 100	87.897
101 - 250	282.563	1.650	270.058	7,5%	101 - 250	284.366
101 - 250	238.189	1.305	259.717	7,2%	251 - 500	469.642
101 - 250	215.788	1.209	222.716	6,2%	ab 501	1.341.143
251 - 500	488.613	1.424	280.684	7,8%	bis 100	67.909
251 - 500	482.567	1.324	253.498	7,0%	101 - 250	237.683
251 - 500	311.448	862	154.996	4,3%	251 - 500	299.104
251 - 500	280.406	840	169.106	4,7%	ab 501	852.911
ab 501	2.005.974	1.183	247.259	6,8%	bis 100	54.069
ab 501	1.490.183	1.303	226.503	6,3%	101 - 250	240.627
ab 501	1.398.472	1.321	253.955	7,0%	251 - 500	464.663
ab 501	440.753	386	89.310	2,5%	ab 501	473.529

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 184km

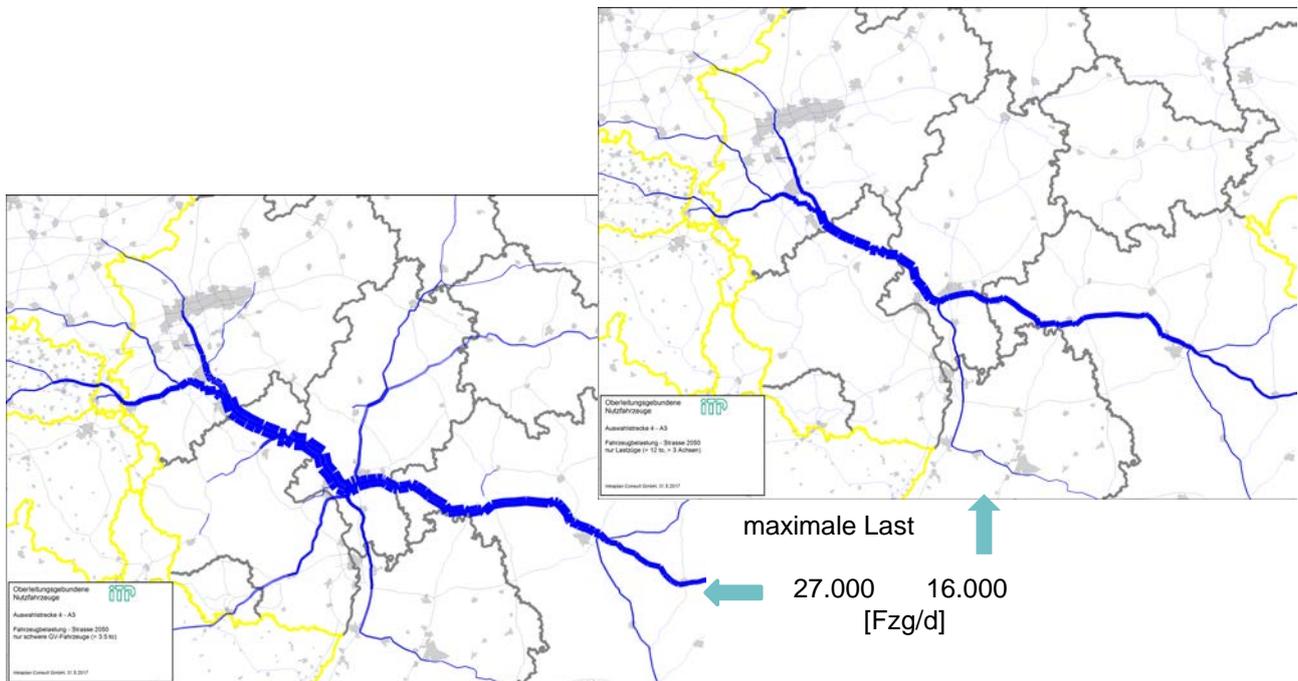
im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 416 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 323 km

**Abbildung 11-4: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 4 – A3 zwischen Köln und Frankfurt a.M. – bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km  
Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-4: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 4 – A3 zwischen Köln und Frankfurt a.M. 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 4						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	76.585	1.779	263.434	11,1%	bis 100	73.883
bis 100	61.034	1.368	211.201	8,9%	101 - 250	247.049
bis 100	64.507	1.431	222.946	9,4%	251 - 500	483.460
bis 100	49.031	906	144.429	6,1%	ab 501	1.067.110
101 – 250	246.931	1.387	209.655	8,8%	bis 100	56.490
101 – 250	139.508	788	121.527	5,1%	101 - 250	140.147
101 – 250	149.197	868	133.142	5,6%	251 - 500	313.493
101 - 250	196.049	1.184	177.657	7,5%	ab 501	1.240.329
251 - 500	428.238	1.280	196.611	8,3%	bis 100	54.247
251 - 500	287.060	819	126.165	5,3%	101 - 250	143.950
251 - 500	190.636	614	95.078	4,0%	251 - 500	209.621
251 - 500	135.328	482	74.261	3,1%	ab 501	445.277
ab 501	663.050	636	100.597	4,2%	bis 100	33.020
ab 501	1.840.305	1.664	248.042	10,4%	101 - 250	275.208
ab 501	437.311	323	48.522	2,0%	251 - 500	91.543
ab 501	25.371	19	2.730	0,1%	ab 501	19.484

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 153 km

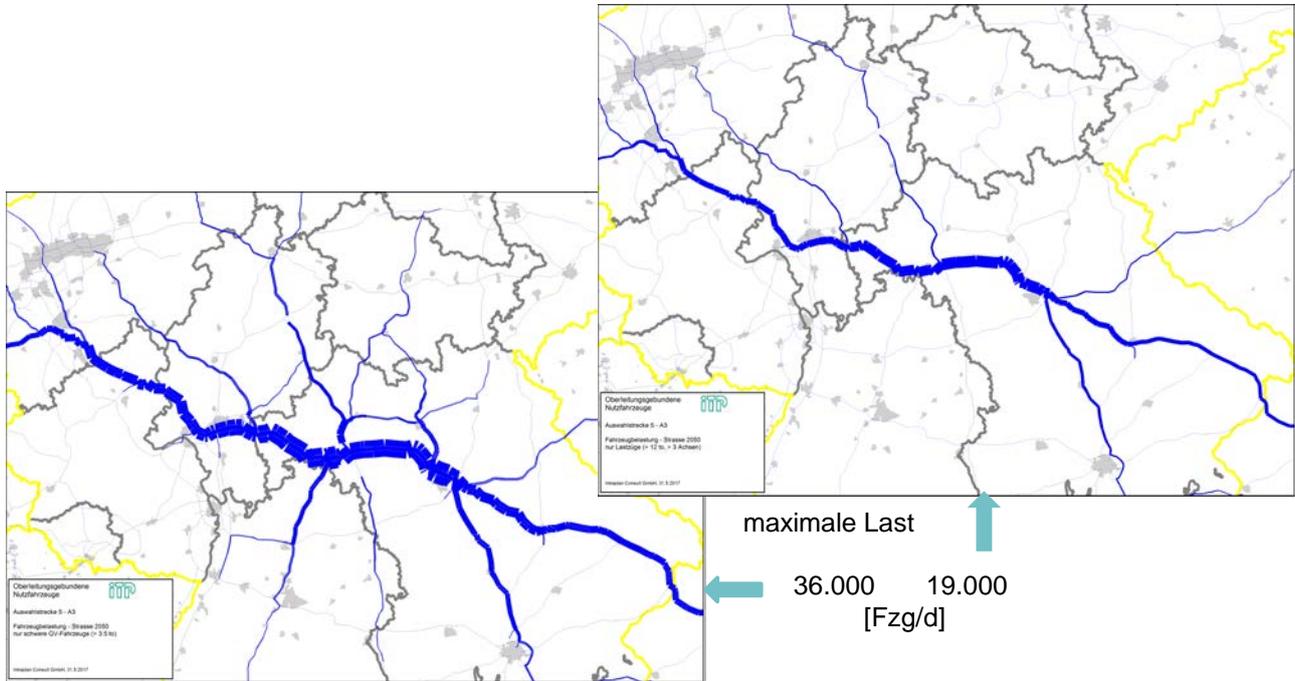
im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 321 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 315 km

**Abbildung 11-5: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 5 – A3 zwischen Frankfurt a.M. und Nürnberg – bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km  
Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-5: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 5 – A3 zwischen Frankfurt a.M. und Nürnberg 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 5						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	52.998	1.547	247.289	7,1%	bis 100	55.405
bis 100	49.169	1.612	262.311	7,6%	101 - 250	281.184
bis 100	36.756	891	150.474	4,3%	251 - 500	311.804
bis 100	16.619	518	101.854	2,9%	ab 501	676.067
101 – 250	352.975	1.911	305.178	8,8%	bis 100	74.639
101 – 250	321.672	1.734	293.464	8,5%	101 - 250	304.131
101 – 250	315.280	1.746	294.992	8,5%	251 - 500	623.216
101 - 250	156.454	795	164.363	4,7%	ab 501	998.259
251 - 500	472.313	1.306	220.980	6,4%	bis 100	60.338
251 - 500	665.924	1.852	326.556	9,4%	101 - 250	329.246
251 - 500	727.671	2.032	382.144	11,0%	251 - 500	722.710
251 - 500	388.620	1.140	250.430	7,2%	ab 501	1.322.484
ab 501	660.857	465	75.009	2,2%	bis 100	20.144
ab 501	493.337	480	72.652	2,1%	101 - 250	89.571
ab 501	2.086.823	1.862	310.250	8,9%	251 - 500	672.083
ab 501	82.476	76	11.563	0,3%	ab 501	51.284

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 174 km

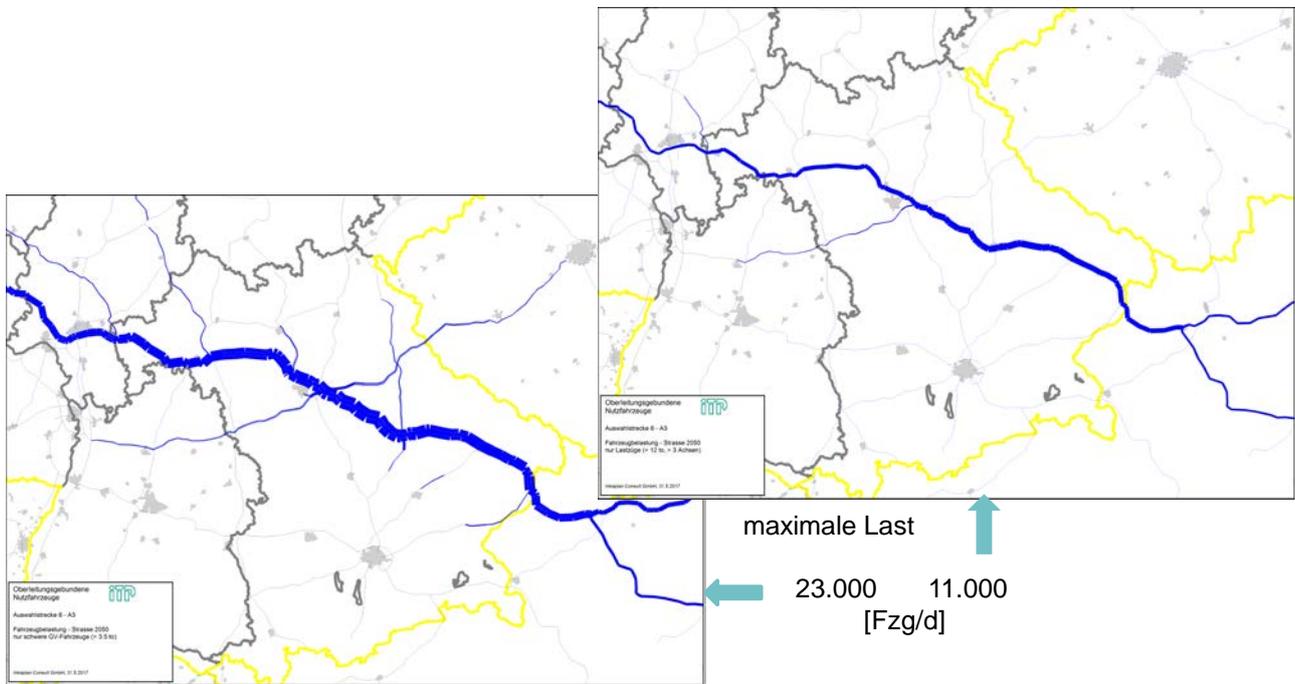
im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 345 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 330 km

**Abbildung 11-6: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 6 – A3 zwischen Nürnberg und Passau - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km  
Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-6: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 6 – A3 zwischen Nürnberg und Passau 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 6						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	58.949	2.011	284.708	13,3%	bis 100	58.034
bis 100	20.798	553	89.561	4,2%	101 - 250	93.668
bis 100	27.562	626	106.615	5,0%	251 - 500	231.512
bis 100	15.534	424	75.727	3,6%	ab 501	438.367
101 – 250	101.024	604	94.129	4,4%	bis 100	19.421
101 – 250	18.284	101	20.325	1,0%	101 - 250	17.992
101 – 250	58.789	303	63.091	3,0%	251 - 500	100.800
101 - 250	74.403	387	83.187	3,9%	ab 501	534.282
251 - 500	249.075	672	117.507	5,5%	bis 100	28.988
251 - 500	100.818	289	60.520	2,8%	101 - 250	53.940
251 - 500	314.756	867	185.715	8,7%	251 - 500	302.587
251 - 500	392.286	1.017	221.987	10,4%	ab 501	1.250.357
ab 501	523.337	535	97.859	4,6%	bis 100	23.023
ab 501	714.141	493	106.293	5,0%	101 - 250	96.105
ab 501	887.159	875	191.751	9,0%	251 - 500	328.565
ab 501	1.408.900	1.515	333.862	15,7%	ab 501	1.250.714

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 189 km

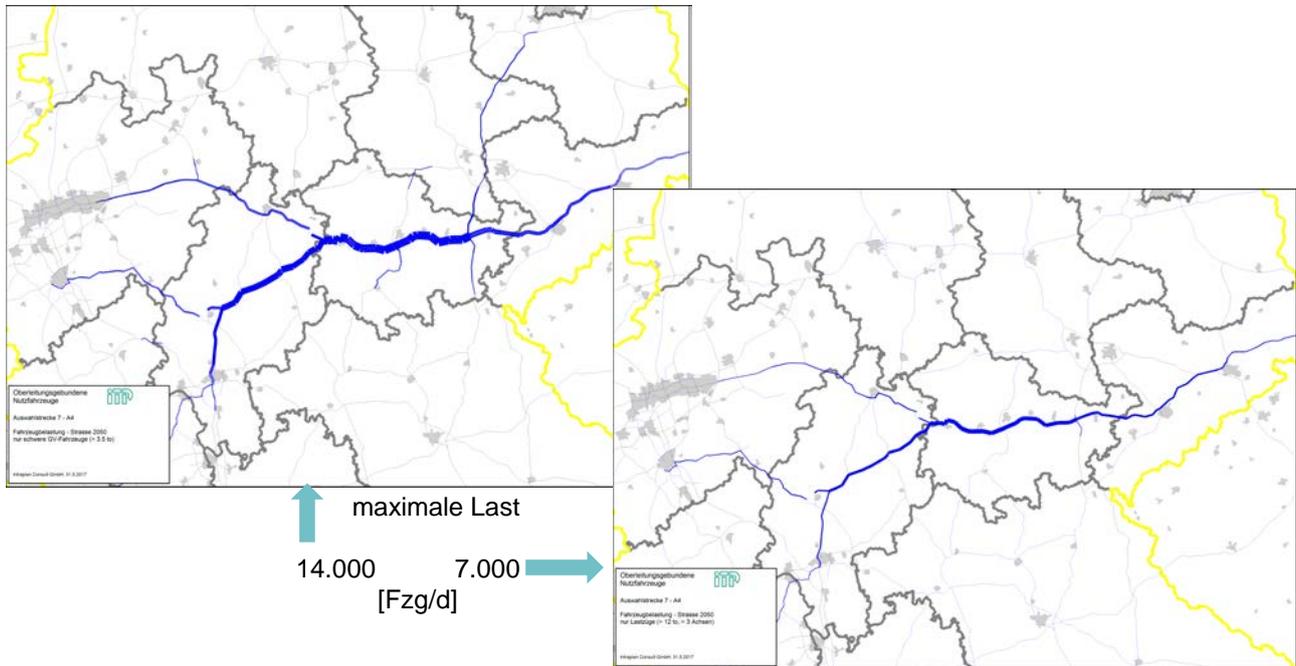
im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 441 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 428 km

**Abbildung 11-7: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 7 – A4 zwischen Bad Hersfeld und Hermsdorf - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km  
Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-7: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 7 – A4 zwischen Bad Hersfeld und Hermsdorf 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 7						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	37.527	816	110.183	9,8%	bis 100	37.970
bis 100	33.838	817	121.946	10,9%	101 - 250	149.499
bis 100	22.554	495	72.071	6,4%	251 - 500	162.885
bis 100	11.619	202	35.170	3,1%	ab 501	345.058
101 – 250	171.328	946	142.731	12,7%	bis 100	39.577
101 – 250	143.644	800	135.756	12,1%	101 - 250	135.150
101 – 250	82.663	463	79.109	7,0%	251 - 500	155.856
101 - 250	10.284	62	11.446	1,0%	ab 501	76.505
251 - 500	232.322	681	99.855	8,9%	bis 100	32.761
251 - 500	153.623	458	78.129	7,0%	101 - 250	77.986
251 - 500	333.758	916	170.050	15,2%	251 - 500	316.121
251 - 500	54.983	145	26.916	2,4%	ab 501	94.920
ab 501	238.080	150	19.970	1,8%	bis 100	3.265
ab 501	34.073	41	7.432	0,7%	101 - 250	7.219
ab 501	39.858	56	10.474	0,9%	251 - 500	19.878
ab 501	5.881	6	1.077	0,1%	ab 501	9.394

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 159 km

im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 228 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 236 km

**Abbildung 11-8: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 8 – A5 zwischen Karlsruhe und Basel - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to



Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



maximale Last

21.000  
6.000  
[Fzg/d]

Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-8: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 8 – A5 zwischen Karlsruhe und Basel 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 8						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	72.461	2.295	298.442	34,6%	bis 100	71.471
bis 100	7.333	304	45.823	5,3%	101 - 250	47.810
bis 100	8.730	334	51.886	6,0%	251 - 500	121.216
bis 100	10.498	337	50.906	5,9%	ab 501	378.560
101 – 250	62.344	372	54.655	6,3%	bis 100	9.785
101 – 250	10.497	64	11.678	1,4%	101 - 250	9.506
101 – 250	26.365	170	31.219	3,6%	251 - 500	61.896
101 - 250	9.379	62	10.840	1,3%	ab 501	68.516
251 - 500	195.451	530	80.502	9,3%	bis 100	15.583
251 - 500	121.613	326	60.173	7,0%	101 - 250	48.738
251 - 500	105.670	284	52.409	6,1%	251 - 500	101.036
251 - 500	20.509	56	10.281	1,2%	ab 501	38.213
ab 501	492.011	494	77.911	9,0%	bis 100	16.772
ab 501	75.856	76	13.488	1,6%	101 - 250	11.166
ab 501	45.448	70	12.879	1,5%	251 - 500	25.292
ab 501	952	2	305	0,0%	ab 501	989

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 149 km

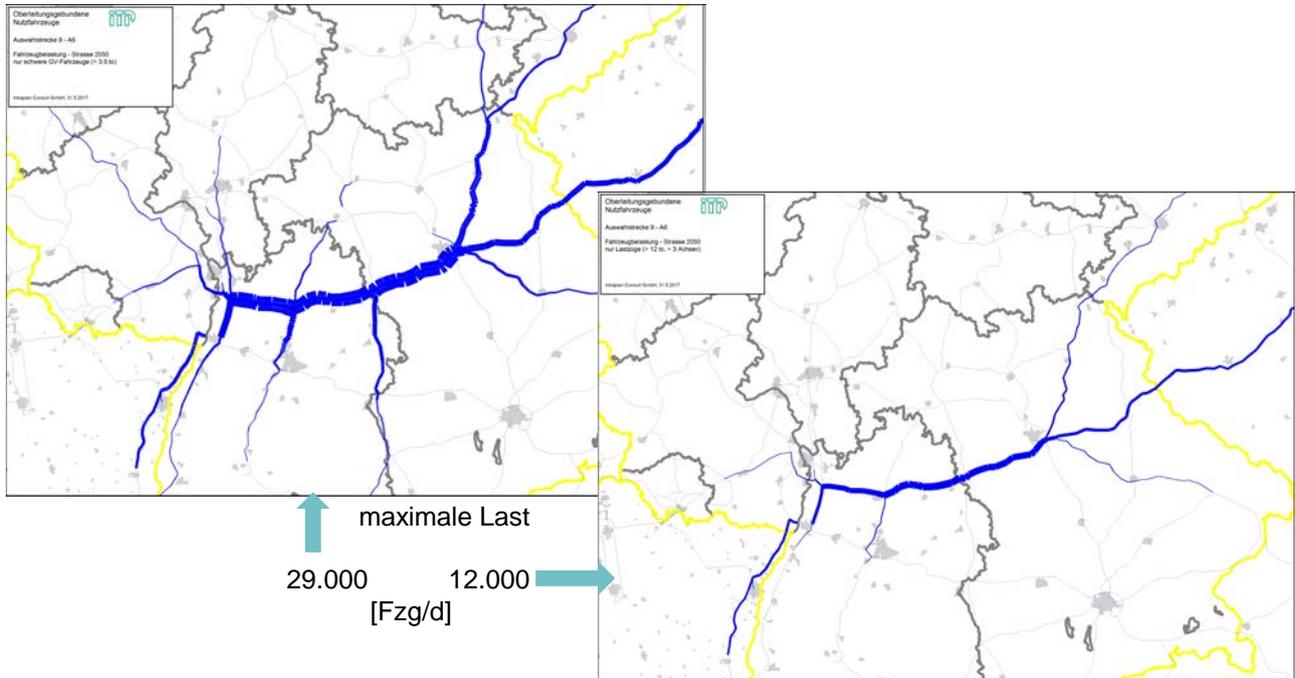
im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 219 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 178 km

**Abbildung 11-9: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 9 – A6 zwischen Heidelberg und Nürnberg - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km  
Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-9: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 9 – A6 zwischen Heidelberg und Nürnberg 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 9						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	83.756	2.048	300.156	14,3%	bis 100	88.291
bis 100	35.252	1.011	166.194	7,9%	101 - 250	160.824
bis 100	31.706	749	122.809	5,8%	251 - 500	263.154
bis 100	24.265	584	102.267	4,9%	ab 501	631.967
101 – 250	154.791	910	152.196	7,2%	bis 100	36.238
101 – 250	95.587	545	106.018	5,0%	101 - 250	95.344
101 – 250	110.659	627	123.833	5,9%	251 - 500	220.791
101 - 250	88.945	474	94.020	4,5%	ab 501	581.975
251 - 500	275.288	773	125.453	6,0%	bis 100	35.020
251 - 500	292.890	838	164.700	7,8%	101 - 250	147.737
251 - 500	91.590	273	51.298	2,4%	251 - 500	88.042
251 - 500	310.816	905	184.334	8,8%	ab 501	1.528.156
ab 501	608.214	626	104.812	5,0%	bis 100	27.018
ab 501	469.807	459	90.744	4,3%	101 - 250	82.876
ab 501	790.637	655	132.881	6,3%	251 - 500	221.814
ab 501	409.974	402	82.502	3,9%	ab 501	547.438

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

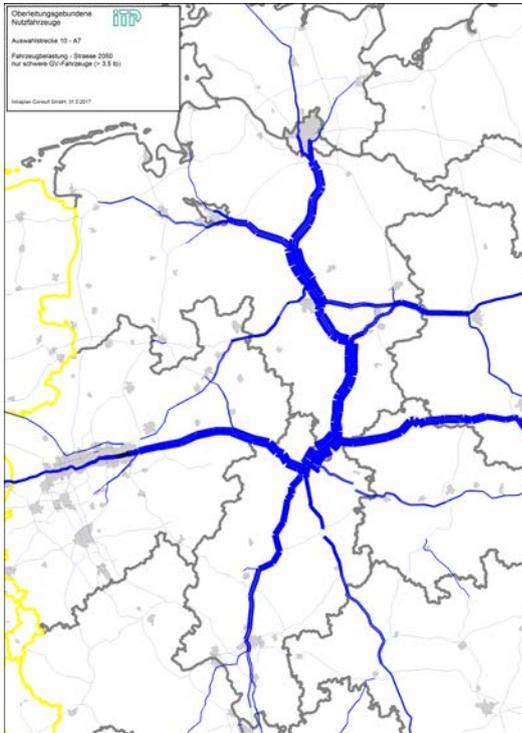
im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 177 km

im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 326 km

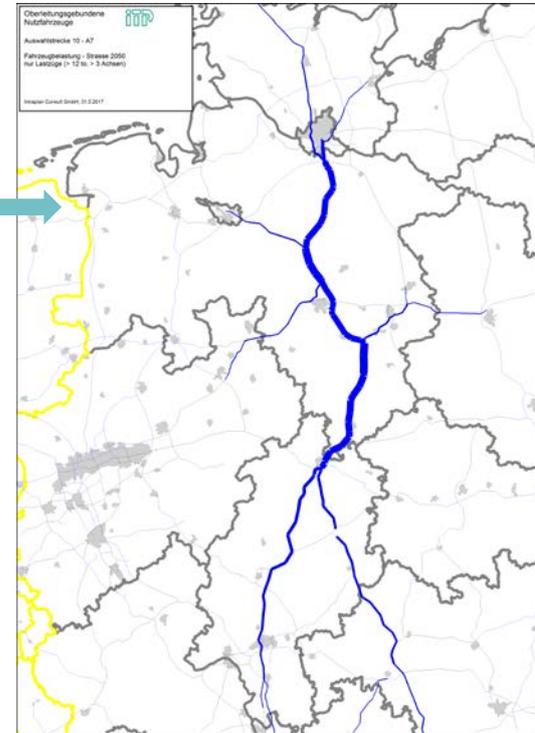
im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 400 km

**Abbildung 11-10: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 10 – A7 zwischen Hamburg und Kassel - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to



Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



maximale Last

29.000  
12.000  
[Fzg/d]

Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-10: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 10 – A7 zwischen Hamburg und Kassel 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 10						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	156.437	3.554	634.674	21,7%	bis 100	156.775
bis 100	93.059	2.335	431.414	14,8%	101 - 250	381.337
bis 100	64.790	1.478	321.112	11,0%	251 - 500	525.975
bis 100	20.189	421	84.073	2,9%	ab 501	319.483
101 – 250	352.821	2.141	395.255	13,5%	bis 100	87.589
101 – 250	169.999	1.028	153.934	5,3%	101 - 250	169.859
101 – 250	107.569	698	123.020	4,2%	251 - 500	242.043
101 - 250	39.107	247	44.881	1,5%	ab 501	180.723
251 - 500	503.484	1.421	308.106	10,5%	bis 100	61.293
251 - 500	185.852	538	88.749	3,0%	101 - 250	86.859
251 - 500	185.988	517	93.464	3,2%	251 - 500	187.904
251 - 500	91.146	256	54.110	1,9%	ab 501	187.937
ab 501	337.225	417	83.948	2,9%	bis 100	19.765
ab 501	123.516	166	30.133	1,0%	101 - 250	26.473
ab 501	153.311	198	46.771	1,6%	251 - 500	69.514
ab 501	90.622	122	27.356	0,9%	ab 501	93.648

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 188 km

im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 172 km

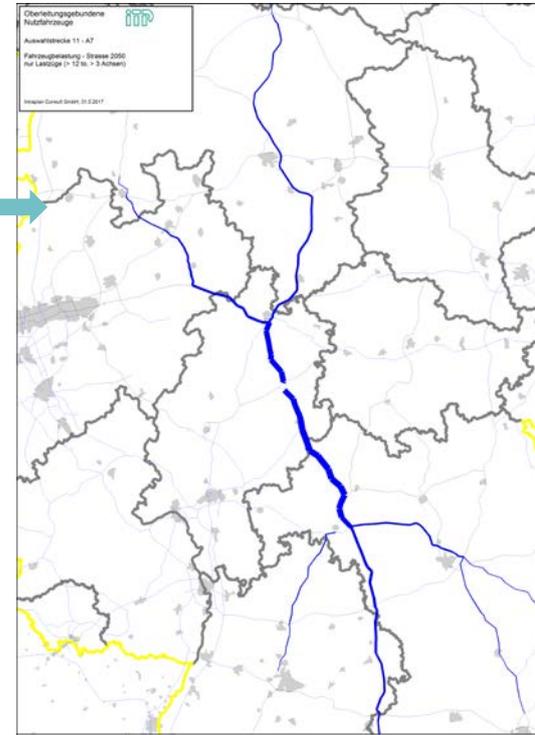
im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 180 km

**Abbildung 11-11: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 11 – A7 zwischen Kassel und Würzburg - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to



Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



maximale Last

29.000  
10.000  
[Fzg/d]

Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-11: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 11 – A7 zwischen Kassel und Würzburg in DTV-w**

Auswahlstrecke 11						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	21.718	447	51.914	4,2%	bis 100	24.941
bis 100	39.016	779	96.633	7,7%	101 - 250	142.879
bis 100	21.387	436	54.469	4,4%	251 - 500	144.535
bis 100	4.587	117	14.519	1,2%	ab 501	95.311
101 – 250	146.567	784	97.346	7,8%	bis 100	39.620
101 – 250	239.901	1.294	172.558	13,8%	101 - 250	236.608
101 – 250	218.520	1.200	161.253	12,9%	251 - 500	414.710
101 - 250	56.287	299	40.655	3,3%	ab 501	216.194
251 - 500	208.215	632	79.203	6,3%	bis 100	32.042
251 - 500	499.003	1.424	190.853	15,3%	101 - 250	258.787
251 - 500	246.247	739	100.432	8,0%	251 - 500	246.257
251 - 500	118.205	345	47.120	3,8%	ab 501	247.908
ab 501	110.495	123	15.662	1,3%	bis 100	5.202
ab 501	320.484	438	59.613	4,8%	101 - 250	80.814
ab 501	219.734	305	41.539	3,3%	251 - 500	109.198
ab 501	132.493	181	24.833	2,0%	ab 501	128.344

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 131 km

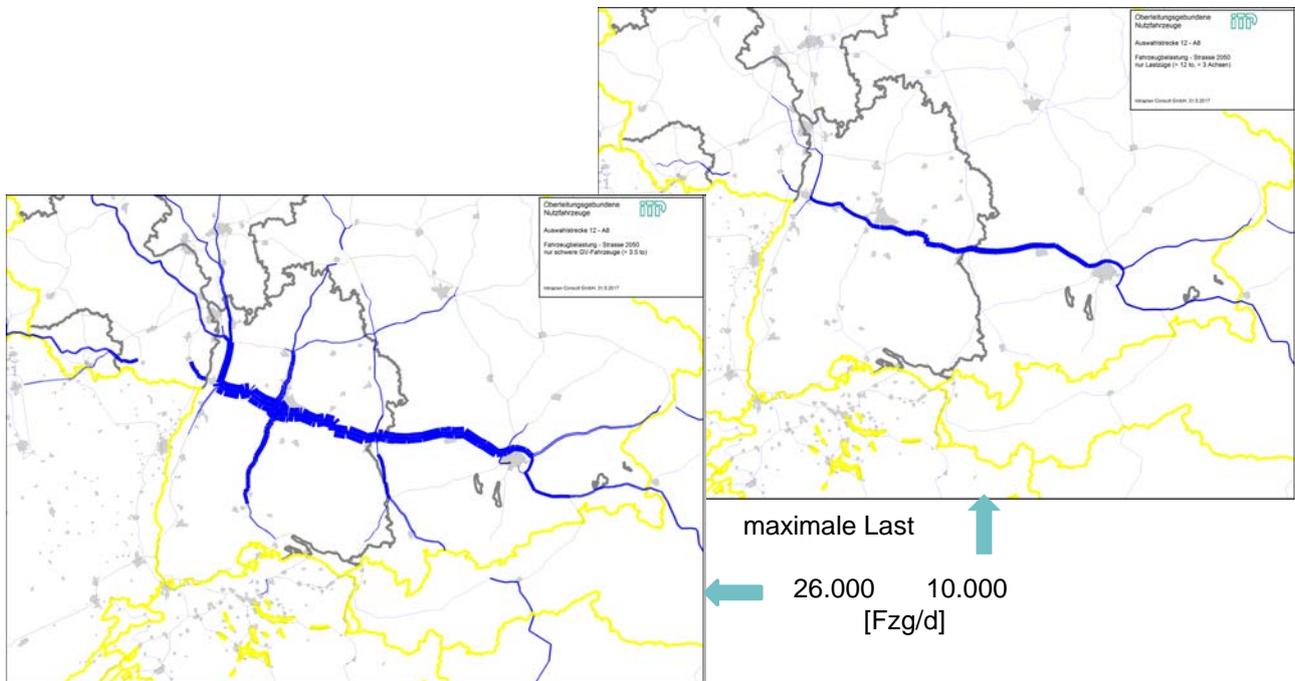
im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 273 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 254 km

**Abbildung 11-12: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 12 – A8 zwischen Stuttgart und München - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km  
Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-12: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 12 – A8 zwischen Stuttgart und München 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 12						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	97.899	2.417	387.815	22,1%	bis 100	97.764
bis 100	33.046	868	147.602	8,4%	101 - 250	126.026
bis 100	26.681	656	117.789	6,7%	251 - 500	241.423
bis 100	27.589	775	137.064	7,8%	ab 501	935.602
101 – 250	159.832	1.094	186.376	10,6%	bis 100	40.208
101 – 250	48.175	336	68.158	3,9%	101 - 250	48.589
101 – 250	28.852	194	39.332	2,2%	251 - 500	72.104
101 - 250	50.724	348	70.654	4,0%	ab 501	385.329
251 - 500	316.009	854	151.687	8,7%	bis 100	33.556
251 - 500	67.800	186	37.705	2,2%	101 - 250	27.805
251 - 500	35.105	91	18.547	1,1%	251 - 500	32.162
251 - 500	51.153	148	30.097	1,7%	ab 501	213.212
ab 501	746.580	804	145.020	8,3%	bis 100	30.616
ab 501	420.970	388	78.865	4,5%	101 - 250	56.157
ab 501	315.063	276	56.126	3,2%	251 - 500	94.273
ab 501	505.083	388	78.911	4,5%	ab 501	276.093

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

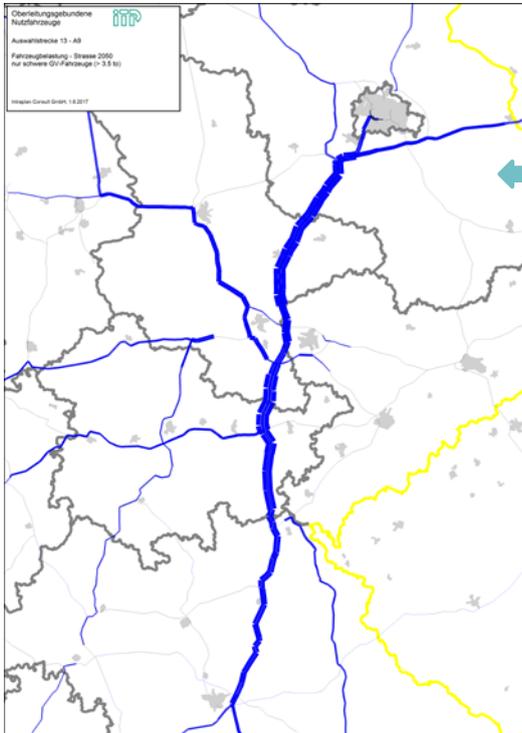
im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 178 km

im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 298 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 276 km

**Abbildung 11-13: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 13 – A9 zwischen Berlin und Hermsdorf - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to



Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-13: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 13 – A9 zwischen Berlin und Hermsdorf 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 13						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	59.028	1.392	186.318	15,7%	bis 100	56.940
bis 100	24.394	599	83.414	7,0%	101 - 250	109.105
bis 100	37.090	825	118.565	10,0%	251 - 500	310.285
bis 100	18.412	386	54.858	4,6%	ab 501	282.701
101 – 250	115.276	624	92.039	7,7%	bis 100	27.512
101 – 250	52.695	283	42.967	3,6%	101 - 250	51.540
101 – 250	58.496	320	47.833	4,0%	251 - 500	119.488
101 - 250	71.238	381	57.541	4,8%	ab 501	294.956
251 - 500	363.491	962	136.205	11,5%	bis 100	41.668
251 - 500	94.063	248	39.098	3,3%	101 - 250	46.302
251 - 500	54.899	143	25.085	2,1%	251 - 500	55.857
251 - 500	191.403	480	67.209	5,7%	ab 501	391.772
ab 501	303.579	399	56.318	4,7%	bis 100	17.469
ab 501	398.894	503	72.347	6,1%	101 - 250	95.891
ab 501	394.680	474	66.328	5,6%	251 - 500	182.328
ab 501	239.430	267	41.898	3,5%	ab 501	246.954

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

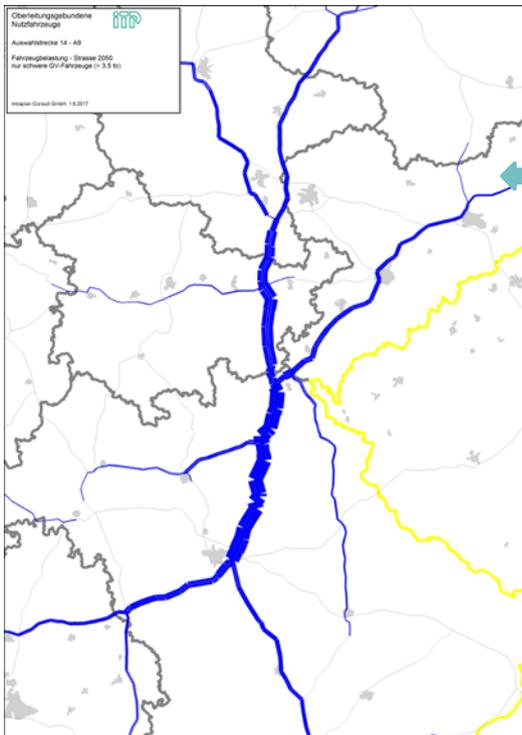
im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 143 km

im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 299 km

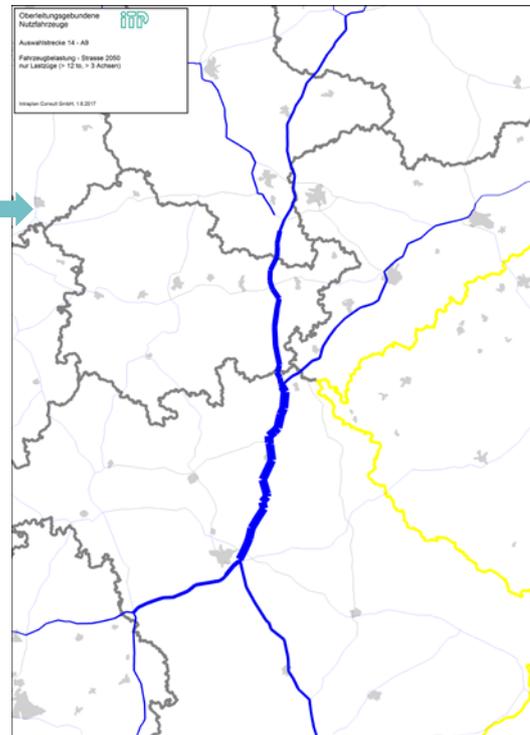
im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 281 km

**Abbildung 11-14: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 14 – A9 zwischen Hermsdorf und Nürnberg - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to



Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



maximale Last

18.000  
11.000  
[Fzg/d]

Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-14: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 14 – A9 zwischen Hermsdorf und Nürnberg 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 14						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfer- nungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfer- nungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	40.023	1.095	150.352	9,0%	bis 100	44.595
bis 100	47.035	1.111	165.622	10,0%	101 - 250	199.388
bis 100	20.615	474	69.647	4,2%	251 - 500	165.666
bis 100	8.641	163	23.945	1,4%	ab 501	166.359
101 – 250	192.032	1.075	158.602	9,5%	bis 100	44.103
101 – 250	282.147	1.581	244.340	14,7%	101 - 250	293.947
101 – 250	139.229	796	119.520	7,2%	251 - 500	278.168
101 - 250	64.596	346	53.936	3,2%	ab 501	423.247
251 - 500	214.505	593	88.941	5,4%	bis 100	22.883
251 - 500	306.645	857	129.339	7,8%	101 - 250	151.706
251 - 500	235.527	635	96.294	5,8%	251 - 500	232.080
251 - 500	208.444	563	94.323	5,7%	ab 501	569.410
ab 501	181.368	223	36.557	2,2%	bis 100	13.199
ab 501	256.658	311	49.614	3,0%	101 - 250	57.391
ab 501	562.903	594	99.679	6,0%	251 - 500	223.028
ab 501	354.608	436	80.811	4,9%	ab 501	346.202

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 153 km

im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 287 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 298 km

**Abbildung 11-15: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 15 – A9 zwischen Nürnberg und München - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to



Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-15: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 15 – A9 zwischen Nürnberg und München 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 15						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	79.841	2.346	313.613	18,1%	bis 100	69.668
bis 100	31.294	1.077	154.495	8,9%	101 - 250	176.863
bis 100	24.580	978	141.705	8,2%	251 - 500	378.147
bis 100	11.188	457	66.351	3,8%	ab 501	296.837
101 – 250	217.399	1.314	187.454	10,8%	bis 100	30.303
101 – 250	39.257	239	36.207	2,1%	101 - 250	36.392
101 – 250	45.071	291	44.129	2,6%	251 - 500	116.389
101 - 250	34.232	231	35.026	2,0%	ab 501	156.170
251 - 500	496.247	1.308	188.111	10,9%	bis 100	28.487
251 - 500	181.795	455	69.067	4,0%	101 - 250	72.204
251 - 500	208.938	534	81.144	4,7%	251 - 500	210.733
251 - 500	192.589	487	73.914	4,3%	ab 501	327.651
ab 501	425.051	697	101.645	5,9%	bis 100	18.950
ab 501	300.035	468	70.868	4,1%	101 - 250	69.226
ab 501	344.388	535	81.237	4,7%	251 - 500	204.116
ab 501	410.801	561	85.161	4,9%	ab 501	405.373

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 144 km

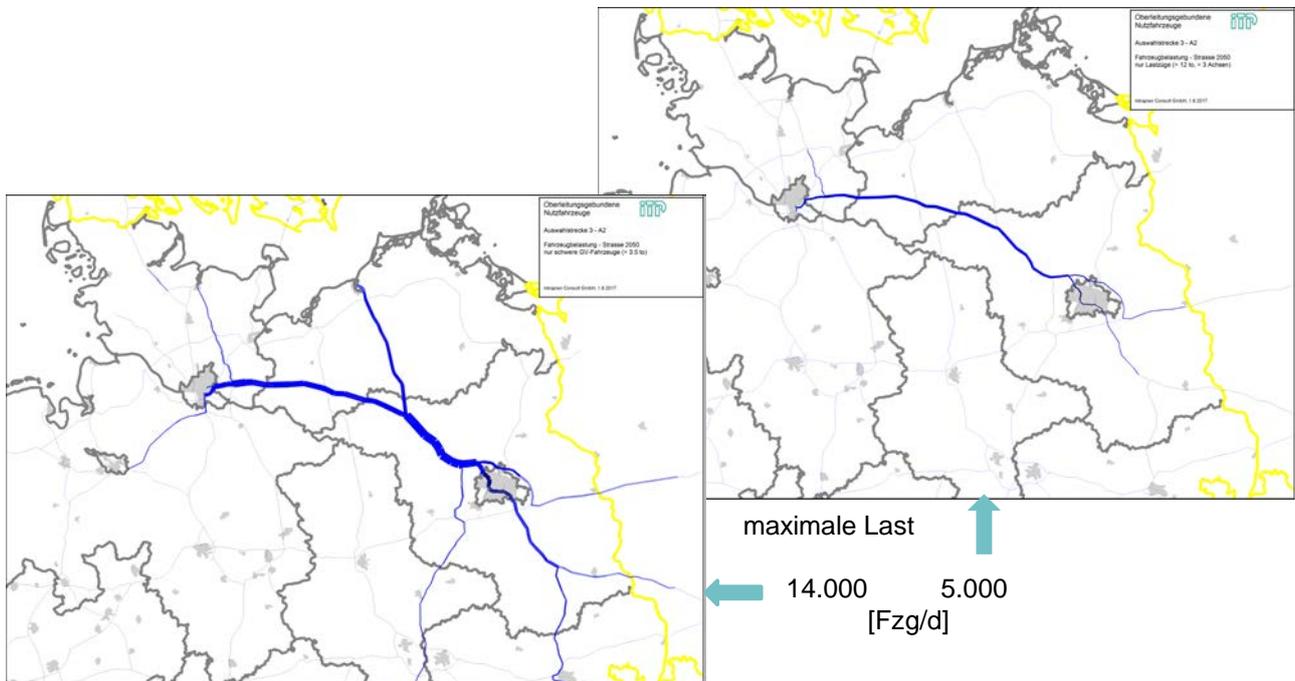
im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 254 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 217 km

**Abbildung 11-16: Ergebnisse – Beispiel Verkehre auf der Auswahlstrecke 16 – A24 zwischen Hamburg und Berlin - bezogen auf 2050**

alle Lkw > 3,5 to

Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km  
Fahrtweite auf der Auswahlstrecke



Quelle: ITP, eigene Berechnungen und Darstellungen

**Tabelle 11-16: Ergebnisse für Lkw ab 4 Achsen mit mehr als 100 km Fahrtweite auf der Auswahlstrecke 16 – A24 zwischen Hamburg und Berlin 2050 in DTV-w**

Auswahlstrecke 16						
Vorlauf		Hauptlauf auf BAB Auswahlstrecke			Nachlauf	
Entfernungsklasse im Vorlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anzahl Lkw [Fzg/d]	Lkw-km [Fzg-km/d]	Anteil an Summe Lkw-km	Entfernungsklasse im Nachlauf in km	Lkw-km [Fzg-km/d]
bis 100	87.096	2.262	428.843	41,9%	bis 100	85.792
bis 100	23.412	597	110.473	10,8%	101 - 250	99.448
bis 100	6.915	191	37.396	3,7%	251 - 500	64.934
bis 100	7.877	225	46.789	4,6%	ab 501	166.498
101 – 250	110.848	677	127.258	12,4%	bis 100	27.400
101 – 250	41.349	267	49.181	4,8%	101 - 250	44.791
101 – 250	31.294	174	34.844	3,4%	251 - 500	58.734
101 - 250	11.808	77	15.358	1,5%	ab 501	52.366
251 - 500	97.813	286	56.147	5,5%	bis 100	10.831
251 - 500	39.756	119	23.473	2,3%	101 - 250	19.653
251 - 500	40.665	115	23.943	2,3%	251 - 500	38.888
251 - 500	8.875	26	5.413	0,5%	ab 501	23.299
ab 501	161.733	186	38.318	3,7%	bis 100	7.224
ab 501	24.557	32	6.635	0,6%	101 - 250	5.009
ab 501	60.430	68	14.418	1,4%	251 - 500	22.681
ab 501	16.446	19	4.063	0,4%	ab 501	14.235

Quelle: ITP, eigene Berechnungen

mittlere Fahrtweiten:

im Hauptlauf auf der BAB-Auswahlstrecke 192 km

im Vorlauf zur BAB-Auswahlstrecke 145 km

im Nachlauf zur BAB-Auswahlstrecke 139 km

## Anhang B: Mitglieder des Projektbeirats

Jens Hilgenberg	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) e.V.
Matthias Scheffer	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Dr. Hendrik Haßheider	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Helge Pols	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Jens Pawlowski	Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung e.V.
Markus Olligschläger	Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V.
Prof. Dr.-Ing. Axel Wolfermann	Hochschule Darmstadt
Julius Jöhrens	Institut für Energie- und Umweltforschung
Dr. Felipe Rodríguez	International Council on Clean Transportation
Dr. Götz von Esebeck	MAN AG (jetzt: Traton Group)
Dr. Karoly Santa	Netze BW GmbH
Dr. Michael Lehmann	Siemens AG (jetzt: Fachhochschule Erfurt)
Kai-Jörg Bode	Spedition Bode GmbH & Co. KG
Stef Cornelis	Transport & Environment
Martin Schmied	Umweltbundesamt
Dr. Armin Sue	Volkswagen AG