

# Nullemissions- nutzfahrzeuge

Vom ökologischen Hoffnungsträger  
zur ökonomischen Alternative



# Nullemissions- nutzfahrzeuge

Vom ökologischen Hoffnungsträger  
zur ökonomischen Alternative

Herausgeber



Autoren



thinkstep

**prognos**

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	4	6	Lebenszykluskosten (TCO) .....	62
Die Kerneergebnisse auf einen Blick .....	6		6.1 Batteriepreisentwicklung .....	65
<b>1 Ausgangslage und Zielsetzung .....</b>	<b>10</b>		6.2 Kostenentwicklung der Brennstoffzelle .....	66
<b>2 Nutzfahrzeuge: Antriebsformen und Einsatzzwecke .....</b>	<b>14</b>		6.3 Investitionen .....	67
2.1 Fahrzeugsegmente .....	16		6.4 Energieträgerpreise .....	68
2.2 Fahrzeugantriebe .....	22		6.5 Kosten der Infrastruktur .....	69
<b>3 Bedeutung der Nutzfahrzeuge in Baden-Württemberg .....</b>	<b>26</b>		6.6 TCO schwerer Transporter .....	70
3.1 Fahrzeugbestand nach Segmenten .....	28		6.7 TCO schwerer LKW .....	72
3.2 Fahrleistung und Verkehrsleistung .....	32		6.8 TCO Stadtbus .....	73
3.3 Endenergieverbrauch des Verkehrs .....	36		6.9 TCO Abfallsammelfahrzeug .....	74
3.4 Verkehrsbedingte Emissionen .....	37		6.10 TCO Radlader .....	74
3.5 Ökonomische Relevanz des Nutzfahrzeugsektors für Baden-Württemberg .....	39		6.11 Exkurs: Auswirkungen der Digitalisierung auf die TCO .....	75
<b>4 Gesetze und Regulierungen .....</b>	<b>44</b>		<b>7 Ressourcen- und Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen (WtW) .....</b>	<b>78</b>
4.1 Mautpflicht .....	46		7.1 Kritische Rohstoffe .....	80
4.2 Steuerbelastung .....	47		7.2 Energieeffizienz der Antriebsstränge .....	84
4.3 Ein- und Durchfahrtsbeschränkungen .....	48		7.3 Umweltwirkungen der Energieträgerbereitstellung .....	85
4.4 Grenzwerte Fahrzeugemissionen .....	49		7.4 WtW-Betrachtung schwerer Transporter .....	89
4.5 Grenzwerte für geschlossene Räume .....	50		7.5 WtW-Betrachtung schwerer LKW .....	91
<b>5 Eignung der Antriebskonzepte für verschiedene Nutzfahrzeugsegmente .....</b>	<b>54</b>		7.6 WtW-Betrachtung Stadtbus .....	92
5.1 Reichweite/Betriebsdauer .....	57		7.7 WtW-Betrachtung Abfallsammelfahrzeug .....	94
5.2 Nutzlast .....	57		7.8 WtW-Betrachtung Radlader .....	95
5.3 Lokale Emissionsfreiheit .....	58		<b>8 Maßnahmen und Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>98</b>
5.4 Infrastruktur .....	59		Literaturverzeichnis .....	102
5.5 Lebensdauer der Flotten .....	59		Abbildungsverzeichnis .....	108
5.6 Wartung .....	60		Tabellenverzeichnis .....	111
5.7 Sicherheit .....	60		Abkürzungsverzeichnis .....	112
5.8 Auswahl besonders potenzialreicher Beispielsegmente .....	60			

## Vorwort



**Elektromobilität ist alltagstauglich – PKW mit Batterie- oder Brennstoffzellenantrieb finden durch steigende Reichweiten immer mehr Akzeptanz bei den Kunden. Die Absatzzahlen weltweit weisen nach oben. Die große Gruppe der Nutzfahrzeuge dagegen, die Güter und Waren transportieren, Personen befördern oder Wertstoffe einsammeln, scheint von der Elektrifizierung noch weit entfernt. Der Dieselmotor gilt noch auf Jahre als alternativlos – so zumindest die landläufige Meinung. Aber gibt es wirklich keine emissionsfreien Alternativen für diese Fahrzeugklassen, die im Wirtschafts- und Logistikverkehr unser tägliches Leben am Laufen halten?**

Auf diese Frage gibt es keine pauschale Antwort. Zu vielfältig, zu unterschiedlich sind die Fahrzeuge. Die Bandbreite reicht von Bussen über leichte und schwere Lieferfahrzeuge bis hin zu Arbeitsmaschinen und Traktoren, die allesamt unterschiedliche

Nutzungsprofile, Fahrleistungen, Leistungsbedarfe etc. aufweisen. Ebenso vielfältig und unterschiedlich ist folglich auch die Motivation, alternativ angetriebene Fahrzeuge zu konstruieren, aufzubauen und anzuwenden. Während bei manchen Einsatzzwecken gesetzliche Vorgaben hinsichtlich maximaler Arbeitsplatzkonzentrationen an Schadstoffen, bspw. in geschlossenen Räumen, die Triebfeder sind, gilt es z. B. in Ballungsräumen, die Feinstaub-Emissionen in den Griff zu bekommen. Bei wieder anderen Anwendungen haben die Lebenszykluskosten allerhöchste Priorität: Die laufenden Betriebskosten sollen möglichst gering gehalten werden. Diese Vorüberlegungen waren Ausgangspunkt für die zentrale Fragestellung der vorliegenden Studie, um eine faktenbasierte Diskussionsgrundlage zu schaffen: Ist es bereits möglich, dass die Total Cost of Ownership eines emissionsfreien Nutzfahrzeugs unter denen eines vergleichbaren Dieselfahrzeugs liegen? Und welche infrastrukturellen Voraussetzungen müssen dafür geschaffen werden? Denn klar ist, dass hier Entwicklungen nur erfolgreich vorangetrieben werden können, wenn neben den technologischen Möglichkeiten auch betriebswirtschaftliche Überlegungen sowie regulatorische Rahmenbedingungen in den Blick genommen werden.

Diese und weitere Fragestellungen interessieren nicht nur die heutigen Betreiber von dieselbetriebenen Nutzfahrzeu-

gen, sondern auch Hersteller, Zulieferer, Werkstättenbetreiber etc., die rechtzeitig ihr Portfolio bzw. Serviceangebot anpassen, Kompetenzen aufbauen und sich am Markt positionieren müssen. Insbesondere gilt dies für das Automobil- und Flächenland Baden-Württemberg mit einer ausgeprägten Nutzfahrzeugindustrie. Mit den Ergebnissen der Studie wollen wir einen Beitrag leisten, um zielgerichtet Perspektiven und Potenziale für die Elektrifizierung im Nutzfahrzeugsegment aufzuzeigen und den vielfältigen Akteuren hilfreiche Informationen und nützliche Anhaltspunkte für ihre Arbeit zu liefern.

Franz Loogen, Geschäftsführer  
e-mobil BW GmbH

# Die Kernergebnisse auf einen Blick

**Nullemissionsfahrzeuge mit batterieelektrischen oder Brennstoffzellenantrieben weisen im Nutzfahrzeugbereich erhebliche ökologische Vorteile gegenüber dem Einsatz von Dieselantrieben auf (Abbildung 1). Aktuell lässt sich ein Einsatz dieser Fahrzeuge im kostensensiblen Nutzfahrzeugbereich wirtschaftlich jedoch noch nicht darstellen.**

Gleichwohl zeigt sich, dass eine Nachfrage nach Nullemissionsantrieben besteht, sofern praxistaugliche und kostengünstigere Fahrzeuge am Markt verfügbar sind, da Nullemissionsfahrzeuge auch spezifische Vorteile im Einsatz aufweisen. Diese Vorteile können durch regulative und finanzielle Vorteile so weit gestärkt werden, dass Nullemissionsantriebe in absehbarer Zeit eine wirtschaftliche Alternative darstellen können. Bei der Ausgestaltung dieser Instrumente ist jedoch zwingend auf die hohe Heterogenität der Fahrzeuge und der Anwendungsanforderungen im Nutzfahrzeugsektor zu achten.

Diese sehr unterschiedlichen Anforderungen bieten jedoch gleichzeitig große Chancen für mittelständische Unternehmen, um dank ihrer hohen Flexibilität Nischenmärkte in der Entwicklung und Herstellung von Nullemissionsfahrzeugen und deren Komponenten zu besetzen. Mit ihrer traditionell wichtigen Rolle als Zulieferer und Systementwickler der Automobilindustrie verfügen die Betriebe in Baden-Württemberg dabei über eine hervorragende Ausgangsposition.

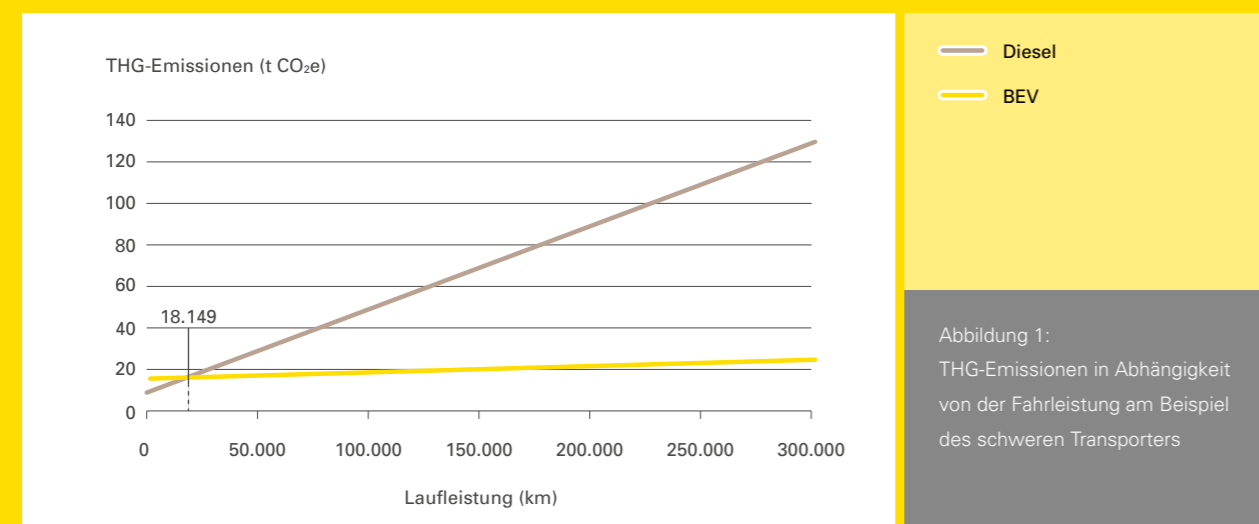


Abbildung 1:  
THG-Emissionen in Abhängigkeit von der Fahrleistung am Beispiel des schweren Transporters

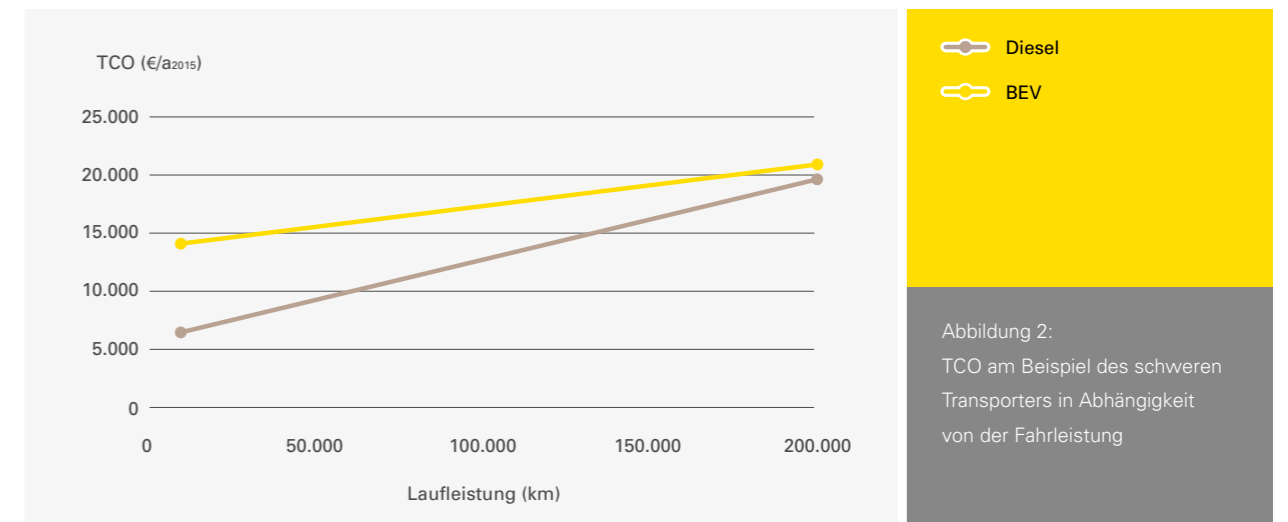


Abbildung 2:  
TCO am Beispiel des schweren Transporters in Abhängigkeit von der Fahrleistung

## Nutzfahrzeuge und ihre Relevanz für Baden-Württemberg

Unter dem Begriff der Nutzfahrzeuge sind äußerst verschiedene Segmente vereint, die sich hinsichtlich ihrer technischen Spezifikationen und ihrer Einsatzkontexte fundamental unterscheiden. Diese Heterogenität zeigt sich auch in Baden-Württemberg deutlich: Von den insgesamt 440.000 zugelassenen Nutzfahrzeugen handelt es sich lediglich bei etwa 80.000 um LKW und Sattelzugmaschinen. Nicht nur ökologisch, auch ökonomisch besitzt der Nutzfahrzeugbereich in Baden-Württemberg eine hohe Bedeutung: Fast 12.000 Arbeitsplätze im Bundesland sind allein in der direkten Produktion dieser Fahrzeuge verortet. Die bedeutendsten Segmente sind dabei nicht nur LKW, sondern auch Landmaschinen und Busse.

Der heutige Anteil alternativer Antriebe ist in nahezu allen Nutzfahrzeugsegmenten praktisch null, da Nutzfahrzeuge fast ausnahmslos mit Diesel angetrieben werden. Damit gehen erhebliche Emissionen von Luftschadstoffen einher. Allein die Nutzfahrzeuge mit Straßenzulassung sind für etwa 20.000 t NO<sub>x</sub> und 1.000 t Feinstaub pro Jahr verantwortlich.

Die anderen Nutzfahrzeugsegmente (v. a. landwirtschaftliche Maschinen und Baumaschinen) emittieren noch einmal ungefähr die gleichen Mengen an Schadstoffen. Somit handelt es sich hier um eine ausgesprochen relevante Schadstoffquelle, die bei den Bemühungen zur Senkung der Emissionen zwingend zu berücksichtigen ist. Dabei müssen für alle Nutzfahrzeugbereiche Lösungen gefunden werden, die die spezifischen Herausforderungen der einzelnen Segmente berücksichtigen.

## Ziel der Studie

Die Studie hat das Ziel, einen Überblick über die verschiedenen Nutzfahrzeugbereiche zu geben und die Voraussetzungen und Grenzen eines Einsatzes von alternativen Antrieben zu analysieren. Dabei wird bewusst der Anspruch formuliert, die lokalen Emissionen der Fahrzeuge auf null zu senken. Somit kommen lediglich batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) als Alternativen in Frage, regenerative Verbrennungskraftstoffe sind hingegen nicht Teil der Studie, da sie dem Anspruch von Nullemissionsfahrzeugen nicht gerecht werden.



© iStockphoto: Chesky\_W

Im Rahmen der Studie wird ein Gesamtbild der Rahmenbedingungen gezeichnet, die einen Einfluss darauf haben, ob und wann BEV und FCEV künftig eine Alternative zum Diesel darstellen können. Daher werden sowohl das regulatorische Umfeld als auch technische und organisatorische Einsatzgrenzen dieser Fahrzeuge beleuchtet und insbesondere die unterschiedlichen Anforderungen der einzelnen Nutzfahrzeugsegmente herausgearbeitet. Ein besonderer Fokus wird darauf gelegt, wie sich die Kosten (im Sinne von Total Cost of Ownership (TCO)) bei der Nutzung von BEV und FCEV künftig im Vergleich zum Diesel in den Segmenten entwickeln und wie sich deren Treibhausgasemissionen in einer Lebenszyklus-Perspektive darstellen.

### Kernergebnisse der Analysen

Bezogen auf die Energieeffizienz weisen die Nullemissionsantriebe in allen betrachteten Segmenten deutliche Vorteile gegenüber dem Diesel auf. Diese Vorteile sind umso höher, je unregelmäßiger die Leistung des Motors im Betrieb ist. Bei beiden Nullemissionsantriebsvarianten fallen auch in der gesamten Well-to-Wheel-Betrachtung deutlich geringere Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) an als beim

Diesel, wobei die Gesamtbilanz eng mit dem Energiemix der Stromerzeugung zusammenhängt. Insgesamt konnten im Rahmen der Analysen die großen ökologischen Vorteile von BEV und FCEV im Vergleich zum Diesel nachgewiesen werden, selbst wenn eine hohe Verbreitung dieser Technologien den Bedarf an einigen begrenzten Rohstoffen erheblich steigern wird. Somit ist deren sukzessive Marktdurchdringung aus umweltpolitischer Sicht insgesamt als sehr vorteilhaft einzuschätzen.

Aktuell sind Nullemissionsantriebe jedoch in keinem der betrachteten Segmente bezogen auf die reinen Lebenszykluskosten eine wirtschaftliche Alternative zum Diesel. Hauptgrund dafür sind die heute noch deutlich höheren Anschaffungspreise dieser Fahrzeuge. Im Jahr 2030 kann aber in manchen Segmenten unter den in der Studie getroffenen Annahmen eine Kostengleichheit durchaus erreicht werden. Dies liegt an stark fallenden Anschaffungskosten der Fahrzeuge, wenn diese nicht mehr als „Einzelstücke“ gefertigt, sondern in hohen Stückzahlen produziert werden. Beim Wasserstoff sind zudem erhebliche Kostendegressionen zu erwarten, wenn dieser im industriellen Maßstab klimaneutral mittels Elektrolyse hergestellt werden kann.

Eine entscheidende Rolle bei der Wettbewerbsfähigkeit von Nullemissionsantrieben spielt das regulatorische Umfeld, wo bislang Fahrzeuge mit Nullemissionen ungenügend berücksichtigt sind. Zwar differenziert eine Vielzahl regulatorischer Instrumente nach den Emissionen der Fahrzeuge und bietet wirtschaftliche Vorteile für Fahrzeuge mit niedrigen Emissionen (z. B. Boni bei der Maut). Allerdings werden dabei BEV und FCEV bislang von wenigen Ausnahmen abgesehen gleich behandelt wie besonders emissionsarme Dieselfahrzeuge (EURO VI). Somit fehlen hier Anreizsysteme, um BEV und FCEV im Wettbewerb mit Verbrennungsmotoren zu stärken.

Eng mit dem regulatorischen Rahmen verknüpft sind auch spezifische Vorteile für Nullemissionsnutzfahrzeuge, die in bestimmten Segmenten bei der Gesamtbewertung durchaus relevant sind (z. B. möglicher Einsatz in emissionssensib-

len Bereichen und nächtlicher Betrieb). Gleichzeitig müssen aber auch die Einsatzgrenzen der Fahrzeuge in den verschiedenen Einsatzbereichen mit einbezogen werden: Während bei BEV insbesondere höhere Fahrzeuggewichte und eine geringere Reichweite problematisch sein können, sind bei Brennstoffzellenfahrzeugen v. a. Fragen der Infrastrukturverfügbarkeit zu beachten. Insgesamt zeigt sich in diesen kritischen Punkten, dass heute verfügbare Prototypen erst sehr eingeschränkt den praktischen Anforderungen der Anwender gerecht werden.

### Handlungsempfehlungen

Aus den Analysen ergeben sich drei Handlungsfelder, die einen Markteintritt von Nullemissionsnutzfahrzeugen beschleunigen können: Durch zielgerichtete monetäre Anreize kann ihre Wirtschaftlichkeit gesteigert werden. Ein geeignetes regulatorisches Umfeld kann ihre Einsatzchancen gegenüber dem Diesel weiter stärken, indem stärker zwischen schadstoffarmen und Nullemissionsantrieben differenziert wird und Letzteren spezifische Privilegien und Vorteile (wie die Einfahrt in Umweltzonen, Nachtbetrieb etc.) eingeräumt werden. Zudem muss ein Dialog zwischen Herstellern und Nutzern initiiert werden, der die Entwicklung praxistauglicher Fahrzeuge entlang der Nutzerbedürfnisse in den entsprechenden Einsatzgebieten anstößt.



**01**

**Ausgangslage und  
Zielsetzung**

## 01

Ausgangslage und  
Zielsetzung

Der schweizerische Lebensmittelkonzern COOP setzt auf Brennstoffzellen-Lkw im Verteilerverkehr

Vor dem Hintergrund der 2015 international gefassten Beschlüsse von Paris hat sich Deutschland ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt. So definiert der Klimaschutzplan 2050 (BMUB 2016) für das Jahr 2050 eine Reduktion des Treibhausgasausstoßes um bis zu 95 % gegenüber 1990.

Schon 2013 hat das Land Baden-Württemberg das Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes verabschiedet, in dem eine Reduktion von 25 % bereits für 2020 und eine Reduktion von 90 % bis 2050 gefordert wurde. Diese weitgehende Treibhausgasneutralität ist nur zu erreichen, wenn in nahezu allen Verbrauchssektoren eine möglichst vollständige Dekarbonisierung stattfindet. Zur Umsetzung dieser ambitionierten Ziele wurde auf Landesebene das Integrierte Energie- und Klimaschutzkonzept (IEKK) erarbeitet. Es beinhaltet nicht nur einen umfangreichen Maßnahmenkatalog, sondern benennt auch für den Verkehrsbereich ein konkretes Reduktionsziel: 70 % der Treibhausgase sollen dort eingespart werden (IEKK 2014, S. 93).

Im Kontrast zu diesen ehrgeizigen Zielen muss festgestellt werden, dass der Verkehrssektor trotz hoher technologischer Fortschritte bei der Effizienz bislang keine Beiträge zur CO<sub>2</sub>-Reduktion beisteuern konnte. Der zweite Monitoring-Kurzbericht der Klimaschutzziele und der Umsetzung des IEKK von 2015 weist nach, dass in Baden-Württemberg die Emissionen des Verkehrs in den letzten Jahren sogar wieder angestiegen sind (LMUKE 2016). Eine Erreichung der Ziele für 2020 erscheint somit unrealistisch; angesichts auch künftig hoher prognostizierter Wachstumsraten im Verkehr ist das Ziel für 2050 nur unter großen Anstrengungen zu erreichen.

Offenbar sind also die bisherigen Fortschritte bei der Reduktion der Emissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren keineswegs ausreichend, um die gesteckten Ziele zu erreichen. Nur eine möglichst weitgehende Dekarbonisierung des Verkehrs durch eine zügige Einführung alternativer Antriebstechnologien entfaltet genug Wirkung auf

dem Weg zur Klimaneutralität. Dies gilt umso mehr, da Treibhausgase nur eine der Herausforderungen fossiler Antriebe darstellen. Gerade in Baden-Württemberg rücken auch von Verbrennungsmotoren emittierte Luftschadstoffe (v. a. Feinstaub und Stickoxide) vermehrt in den Fokus politischer und gesellschaftlicher Debatten. Die überdurchschnittlich hohe Anzahl sogenannter „Umweltzonen“ ist in Baden-Württemberg ein deutliches Zeichen dafür, dass es nicht nur um die Vermeidung von Treibhausgasen geht, sondern dass vielmehr ein „Nullemissionsziel“ des Verkehrs angestrebt werden sollte.

In den Emissionsdebatten stehen PKW im besonderen Fokus. Dies ist insofern auch gerechtfertigt, als sie für 61 % der Emissionen des Verkehrs verantwortlich sind (UBA 2016). Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass auf den Nutzfahrzeugsektor mehr als ein Drittel der Emissionen entfällt. Technische Entwicklungen zur Dekarbonisierung von Nutzfahrzeugen adressieren zumeist den Bereich der LKW, die fraglos schon allein aufgrund ihrer sehr hohen kumulierten Fahrleistung den überwiegenden Anteil der Emissionen der Nutzfahrzeuge verursachen. Dennoch darf nicht verkannt werden, dass der Nutzfahrzeugbereich eine höchst heterogene Gruppe von Fahrzeugen unterschiedlichster technischer Spezifika und Anwendungsbereiche umfasst: Baugeräte, Traktoren, Flurförderzeuge und kommunale Fahrzeuge wie Busse und Müllfahrzeuge – sie alle sind dieser Gruppe zuzurechnen. Zwar weisen diese Segmente in Summe deutlich geringere Fahrleistungen bzw. Betriebsstunden auf als LKW, aber auch sie sind einzubeziehen, wenn der Nutzfahrzeugbereich seine Emissionen Richtung null verringern soll. Zudem ist zu beachten, dass z. B. Baumaschinen und Flurförderzeuge in ihrem unmittelbaren Einsatzbereich durchaus relevante Emissionen im Rahmen ihrer Betriebsstunden verursachen.

Vor dem Hintergrund dieser Ausgangssituation setzt sich die vorliegende Studie das Ziel, den gesamten Bereich der Nutzfahrzeuge näher zu beleuchten und Optionen aufzuzeigen, wie der Anteil von Dieselantrieben in den verschiedenen Segmenten zugunsten emissionsfreier Antriebe gesenkt werden kann. Dazu sollen zunächst eine Bestandsaufnahme des gesamten Nutzfahrzeugbereichs erarbeitet und die verfügbaren Nullemissionsantriebe vorgestellt werden. Im Anschluss wird der Blick auf die Bedeutung des Nutzfahrzeugbereichs für Baden-Württemberg geworfen. Dabei soll sowohl seine ökonomische als auch seine ökologische Relevanz aufgezeigt werden. Im Kapitel 4

erfolgt ein Überblick über den gesetzlichen und regulatorischen Rahmen, der bei der Zulassung und dem Einsatz von Nutzfahrzeugen zu beachten ist. Empirischer Kern der Studie sind die Kapitel 5 und 6, in denen vergleichende Betrachtungen von Diesel- und Nullemissionsantrieben bezogen auf Lebenszykluskosten sowie Ressourcen- und Energieverbrauch für fünf Beispielsegmente vorgenommen werden. Im letzten Abschnitt werden aus einer Gesamtschau der Ergebnisse Handlungsempfehlungen für eine beschleunigte Verbreitung von Nullemissionsantrieben abgeleitet.



Unter Tage sind emissionsarme Fahrzeuge gefragt





# 02

**Nutzfahrzeuge:  
Antriebsformen und  
Einsatzzwecke**

# 02

Nutzfahrzeuge:  
Antriebsformen und  
Einsatzzwecke



Der Sektor der Nutzfahrzeuge umfasst eine Vielzahl ausgesprochen verschiedener Fahrzeugtypen. Nicht nur bezüglich ihrer technischen Kennwerte unterscheiden sich die Nutzfahrzeugsegmente deutlich, auch die Einsatzorte und -zwecke sind vielfältig und die Intensität, mit der die Fahrzeuge eingesetzt werden, weist eine große Spannweite auf. Um einen prägnanten Überblick über das heterogene Feld der Nutzfahrzeuge zu erhalten, wird eine Klassifizierung des Gesamtmarktes in einzelne Untergruppen vorgenommen. Diese Einteilung erfolgt zunächst anhand grundlegender Eigenschaften der Fahrzeuge (Kapitel 2.1), bevor die prinzipiell denkbaren alternativen Antriebe der Segmente vorgestellt werden (Kapitel 2.2).

## 2.1 Fahrzeugsegmente

Zur Einteilung des Gesamtmarktes in möglichst gut voneinander abgrenzbare Segmente bietet es sich an, die Fahrzeuge sowohl hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften

(Größe, Gewicht) als auch bezüglich ihrer Einsatzbereiche voneinander abzugrenzen. Insbesondere beim sehr großen Segment der LKW ist diese Differenzierung zur Abbildung technoökonomischer Charakteristika unerlässlich. Durch diese Gesamtschau wird sowohl technischen als auch einseitigen Spezifika der Nutzfahrzeuge Rechnung getragen, die für die Verwendung verschiedener alternativer Technologien von Bedeutung sind. Im Folgenden sollen diese Segmente unterschieden werden:

- schwere Transporter
- mittlere LKW
- schwere LKW
- Sattelzugmaschinen (SZM)
- Busse
- Bagger, Baugeräte und sonstige Arbeitsmaschinen
- Flurförderzeuge
- Abfallsammelfahrzeuge
- Reinigungsfahrzeuge
- Landmaschinen und Traktoren

Im Rahmen dieser Studie werden die leichten Nutzfahrzeuge <3,5 t zGG (kleine und mittlere Transporter) nicht betrachtet, obwohl dieses Segment mit einem Bestand von rund 2,1 Mio. Fahrzeugen sehr groß ist. Fahrzeuge des Transportersegments werden häufig im (dynamisch wachsenden) Kurier-, Express- und Paketmarkt (KEP) eingesetzt, sodass dieses Segment in Zukunft zahlenmäßig weiter an Bedeutung gewinnen wird. In dieser Studie werden sie trotzdem nicht betrachtet, da dieses Segment bereits zahlreiche Praxisversuche mit alternativen Antrieben verzeichnet und von der Technologie eher dem PKW-Massenmarkt zuzuordnen ist als dem sehr diversen sonstigen LKW- und Nutzfahrzeugbereich. Die technischen und ökonomischen Herausforderun-

gen zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs sind damit deutlich geringer als für die vergleichsweise spezifischen Anwendungen, in denen die hier betrachteten Nutzfahrzeuge (in deutlich kleineren Stückzahlen) eingesetzt werden.

Bei der Einteilung ist zu beachten, dass es sich nicht in allen Segmenten um Straßenfahrzeuge im engeren Sinne handelt. Im Rahmen der Studie werden auch mobile Maschinen und nicht zulassungspflichtige Fahrzeuge betrachtet, die bezüglich der gesetzlichen Bestimmungen zum Teil grundlegend anderen Rahmenbedingungen als Straßenfahrzeuge unterliegen. Die Angaben der nachfolgenden Steckbriefe beziehen sich, sofern nicht anders angegeben, auf Deutschland.

Tabelle 1: Definition der Fahrzeugsegmente

Schwere Transporter	
Definition	3,5–7,5 t zGG
Einsatzbereiche	Nahverkehr, insbesondere städtischer Lieferverkehr
Halter	Zumeist privatwirtschaftlich
Bestand 2016	246.000
Davon BEV oder Wasserstoff	400 (0,2 %)*
Jahresfahrleistung	Je nach Einsatzkontext hohe Spreizung, laut KBA im Schnitt 19.000 km pro Jahr
Verbrauch auf 100 km	Je nach Einsatzkontext, Ladung und Fahrweise große Unterschiede, im Schnitt 12 l Diesel
Haltedauer	10 Jahre



Quelle: KBA (mehrere) und HBEFA 2017 \* ohne Umrüstungen

**Mittlere LKW**



Definition	7,5–12 t zGG
Einsatzbereiche	Nahverkehr, regionaler Lieferverkehr
Halter	Zumeist privatwirtschaftlich
Bestand 2016	79.000
Davon BEV oder Wasserstoff	0*
Jahresfahrleistung	Je nach Einsatzkontext hohe Spreizung, laut KBA im Schnitt 39.000 km pro Jahr
Verbrauch auf 100 km	Je nach Einsatzkontext, Ladung und Fahrweise große Unterschiede, im Schnitt 19 l Diesel
Haltedauer	10 Jahre

Quelle: KBA (mehrere) und HBEFA 2017 \* ohne Umrüstungen

**Schwere LKW**



Definition	Ab 12 t zGG
Einsatzbereiche	Fernverkehr, schwerer Verteilverkehr
Halter	Zumeist privatwirtschaftlich
Bestand 2016	200.000
Davon BEV oder Wasserstoff	0*
Jahresfahrleistung	Je nach Einsatzkontext hohe Spreizung, laut KBA im Schnitt 100.000 km pro Jahr
Verbrauch auf 100 km	Je nach Einsatzkontext, Ladung, Aufbauart und Fahrweise große Unterschiede, im Schnitt 27 l Diesel
Haltedauer	6–8 Jahre

Quelle: KBA (mehrere) und HBEFA 2017 \* ohne Umrüstungen

**Sattelzugmaschinen**



Definition	Gespann aus Zugmaschine und Auflieger
Einsatzbereiche	Fernverkehr
Halter	Zumeist privatwirtschaftlich
Bestand 2016	194.000
Davon BEV oder Wasserstoff	0*
Jahresfahrleistung	Je nach Einsatzkontext hohe Spreizung, laut KBA im Schnitt 100.000 km pro Jahr
Verbrauch auf 100 km	Je nach Einsatzkontext, Ladung, Aufbauart und Fahrweise große Unterschiede, im Schnitt 30 l Diesel
Haltedauer	4–6 Jahre; in der Regel werden die SZM danach im Werkverkehr mit deutlich geringeren Laufleistungen weiterverwendet oder weiterverkauft

Quelle: KBA (mehrere) und Prognos/Thinkstep (interne Daten) \* ohne Umrüstungen

**Busse**



Definition	Personenbeförderung mit >8 Plätzen
Einsatzbereiche	Zumeist im Stadt- und Regionalverkehr, zunehmend auch Fernverkehr
Halter	Zumeist öffentlich, Fernverkehr privatwirtschaftlich
Bestand 2016	78.000
Davon BEV oder Wasserstoff	500 (0,6%)*
Jahresfahrleistung	Je nach Einsatzkontext hohe Spreizung, laut KBA im Schnitt 60.000 km pro Jahr
Verbrauch auf 100 km	Je nach Einsatzkontext und Fahrweise große Unterschiede, im Schnitt 30–40 l Diesel
Haltedauer	9 Jahre

Quelle: KBA (mehrere) und Branchenberichte \* ohne Umrüstungen

**Bagger, Baugeräte und sonstige Arbeitsmaschinen**



Definition	Spezialfahrzeuge für bestimmte Einsatzbereiche
Einsatzbereiche	Auf Baustellen und im Tagebau; in Bergwerken auch in geschlossenen Räumen
Halter	Zumeist privatwirtschaftlich
Bestand 2016	11.000 mit Straßenzulassung, weitere ca. 350.000 ohne
Davon BEV oder Wasserstoff	Alternative Antriebe quasi nicht vorhanden; in einzelnen Anwendungsnischen elektrische Antriebe mithilfe von Kabeln*
Jahresarbeitsleistung	Sehr heterogen von etwa 800 bis über 2.000 h pro Jahr
Verbrauch pro Stunde	Abhängig von Größe und Leistung der Maschine, Bagger z.B. etwa 15 l Diesel/h, Radlader bis zu 45 l Diesel/h
Haltedauer	5–15 Jahre, abhängig vom Gerät (Abschreibungsdauer, Nutzungsdauer sehr unterschiedlich und oft deutlich länger)

Quelle: KBA (mehrere) und eigene Schätzungen auf Basis von Branchenberichten \* ohne Umrüstungen

**Flurförderzeuge**



Definition	Fahrzeuge für lokale (horizontale) Güterbeförderung, zumeist Gabelstapler verschiedener Größen, aber auch Schlepper und Loren
Einsatzbereiche	Industrie, Logistik und Lagerei, sehr häufig in geschlossenen Räumen
Halter	Zumeist privatwirtschaftlich
Bestand 2016	Insgesamt ca. 600.000
Davon BEV oder Wasserstoff	Über 80 % fahren bereits elektrisch, nur besonders schwere oder Geräte in speziellen Umfeldern sind nicht elektrifiziert, hier existieren bereits etwa 1.000 Hz-Antriebe*
Jahresarbeitsleistung	Je nach Einsatzkontext etwa 1.000 h pro Jahr
Verbrauch pro Stunde	Abhängig von Größe und Leistung, im Schnitt etwa 3 l Diesel/h
Haltedauer	8 Jahre

Quelle: VDMA \* ohne Umrüstungen

**Abfallsammelfahrzeuge**



Definition	Fahrzeug zur Abfallsammlung
Einsatzbereiche	Siedlungsbereich und öffentliches Straßennetz
Halter	Öffentlich und privatwirtschaftlich
Bestand 2016	13.000
Davon BEV oder Wasserstoff	0*
Jahresfahrleistung	Abhängig vom Einsatzgebiet etwa 10.000 km pro Jahr
Verbrauch auf 100 km	Je nach Sammelrevier stark unterschiedlich, 50–120 l Diesel
Haltedauer	8 Jahre (Abschreibungsdauer)

Quelle: KBA und Branchenberichte \* ohne Umrüstungen

**Reinigungsfahrzeuge**



Definition	Fahrzeuge zur Reinigung von Straßen, Gehwegen und Kanalisation
Einsatzbereiche	Öffentlicher Raum
Halter	Zumeist öffentlich
Bestand 2016	Ca. 16.000
Davon BEV oder Wasserstoff	Kleine Fahrzeuge in Einzelfällen elektrisch*
Jahresarbeitsleistung	1.000–1.500 h pro Jahr
Verbrauch pro Stunde	Abhängig von Größe und Leistung, im Schnitt 4–5 l Diesel/h
Haltedauer	10 Jahre

Quelle: KBA, Bucher Kommunalfahrzeuge, eigene Berechnungen nach Uni Stuttgart \* ohne Umrüstungen

**Landmaschinen und Traktoren**



Definition	Hauptsächlich Traktoren, aber auch alle anderen mobilen land- und forstwirtschaftlichen Maschinen
Einsatzbereiche	Landwirtschaftliche Flächen, öffentliches/privates Straßennetz
Halter	Zumeist privat
Bestand 2016	1,4 Mio. Traktoren, etwa 100.000 Mähdrescher und Sonstige
Davon BEV oder Wasserstoff	0*
Jahresarbeitsleistung	Je nach Einsatzgebiet 700–900 h pro Jahr
Verbrauch pro Stunde	Abhängig von Größe und Leistung bis zu 10 l Diesel
Haltedauer	8–12 Jahre

Quelle: KBA, Branchenberichte, eigene Schätzungen nach VDMA \* ohne Umrüstungen

Die vorgenommene Segmentierung zeigt die enorme Vielfalt der Fahrzeuge, die im Nutzfahrzeugmarkt zu berücksichtigen sind. Größen, technische Spezifikationen und Einsatzgebiete sind derart vielfältig, dass eine pauschale Betrachtung über alle Nutzfahrzeugklassen keine verwertbaren Aussagen liefern kann. Daher werden beispielhaft fünf Anwendungsfälle für verschiedene Nutzfahrzeugklassen in einem spezifischen Einsatzbereich ausgewählt und vertieft analysiert. Vorab wird die (theoretische) Verfügbarkeit alternativer Antriebe bei verschiedenen Nutzfahrzeugen diskutiert.

**2.2 Fahrzeugantriebe**

In den verschiedenen Nutzfahrzeugsegmenten können unterschiedliche Antriebstechnologien einzeln oder in Kombination (Hybridtechnologien) verwendet werden. Im Folgenden werden die untersuchten Antriebskonzepte eingegrenzt. Die Verwendung von komprimiertem und flüssigem Erdgas (CNG und LNG) in Verbrennungsmotoren kann zu einer deutlichen Reduktion der emittierten Luftschadstoffe führen. Da derartige Fahrzeuge aber die Nullemissionsbedingung nicht gänzlich

erfüllen, werden sie im Weiteren nicht näher betrachtet. Auch die Verwendung von synthetischen und Bio-Kraftstoffen, sowohl für Otto- als auch für Dieselmotoren, verursacht lokale Schadstoffemissionen, insbesondere Stickoxide und Feinstaub, weshalb sie an dieser Stelle nicht näher erläutert werden.

Da der Wasserdampf, der von einem Fahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb emittiert wird, keinen Schadstoff darstellt, sind derartige Fahrzeuge ebenso wie die batterieelektrischen Antriebe den Nullemissionsfahrzeugen zuzuordnen. Die Kategorisierung „Nullemissionsfahrzeug“ bezieht sich dabei ausschließlich auf den lokalen Schadstoffausstoß während der Fahrt. Bei der ökologischen Lebenszyklusbetrachtung sind jedoch auch die Emissionen bei der Herstellung der Energieträger zu berücksichtigen (siehe Kapitel 7).

Ein batterieelektrisches Fahrzeug (Abbildung 3, links) nutzt eine Traktionsbatterie, die von einer externen Energiequelle aufgeladen wird. In aller Regel weist die Batterie eine hohe Spannung auf, um die insbesondere bei hohen Leistungen

notwendige elektrische Stromstärke zu gewährleisten und die damit verbundenen Energieverluste gering zu halten. Der aus der Traktionsbatterie stammende Gleichstrom wird in einem Umrichter zu Wechselstrom umgewandelt, der wiederum im Elektromotor für den geforderten Vortrieb sorgt. Wird ein solches Fahrzeug z. B. bei Bergabfahrten abgebremst, kann eine Energierückgewinnung durch Rekuperation erfolgen. Dabei dient der Elektromotor als Generator, der die Bremsenergie nutzt, um Strom zu erzeugen und damit die Batterie aufzuladen.

Auch ein Brennstoffzellenfahrzeug (Abbildung 3, rechts) nutzt einen Elektromotor als Antrieb. Der Strom wird in einer im Fahrzeug integrierten Brennstoffzelle erzeugt, wobei ein Energieträger (in der Regel Wasserstoff) verbraucht wird, der in einem Tank mitgeführt wird. Zwischen Brennstoffzelle und Elektromotor wird in der Regel eine Batterie zur Pufferung vorgesehen, sodass auch Brennstoffzellenfahrzeuge Bremsenergie rekuperieren können.

Elektromotoren, die in beiden Fahrzeugkonzepten eingesetzt werden, zeichnen sich im Unterschied zu konventionellen Verbrennungsmotoren insbesondere durch ein hohes Drehmoment bei geringen Drehzahlen aus. Dadurch entfällt häu-

fig die Notwendigkeit eines Schaltgetriebes oder zumindest bedarf dieses weniger Übersetzungsstufen als bei konventionellen Fahrzeugen. Für Traktionsbatterien finden Zellen unterschiedlicher Form und Zellchemie Anwendung. Allen ist jedoch gemein, dass sie in der Regel große Volumina und Gewichte mit sich bringen, die zu berücksichtigen sind (siehe Abbildung 4).

Der Wasserstoff kann in unterschiedlichen Formen gespeichert werden. Heutzutage sind Hochdruckspeicher (350 bar für Nutzfahrzeuge wie Busse, 700 bar für PKW) üblich. Die dafür benötigten Wasserstoffbehälter sind ebenfalls schwerer und größer als Tanks für konventionelle Kraftstoffe, jedoch in geringerem Maße als Batterien. Insbesondere hinsichtlich der Energiespeicherung ergeben sich damit wesentliche Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Nullemissionsantrieben. Um eine bestimmte Menge an Energie zu speichern, benötigen Batterien in der Regel deutlich mehr Volumen und Gewicht als ein gefüllter Wasserstofftank (siehe Abbildung 4). Das zusätzliche Volumen und Gewicht schränkt die Nutzung batterieelektrischer Antriebe bei einigen Nutzfahrzeuganwendungen insbesondere bei größeren Entfernungen (>200 km) deutlich ein.

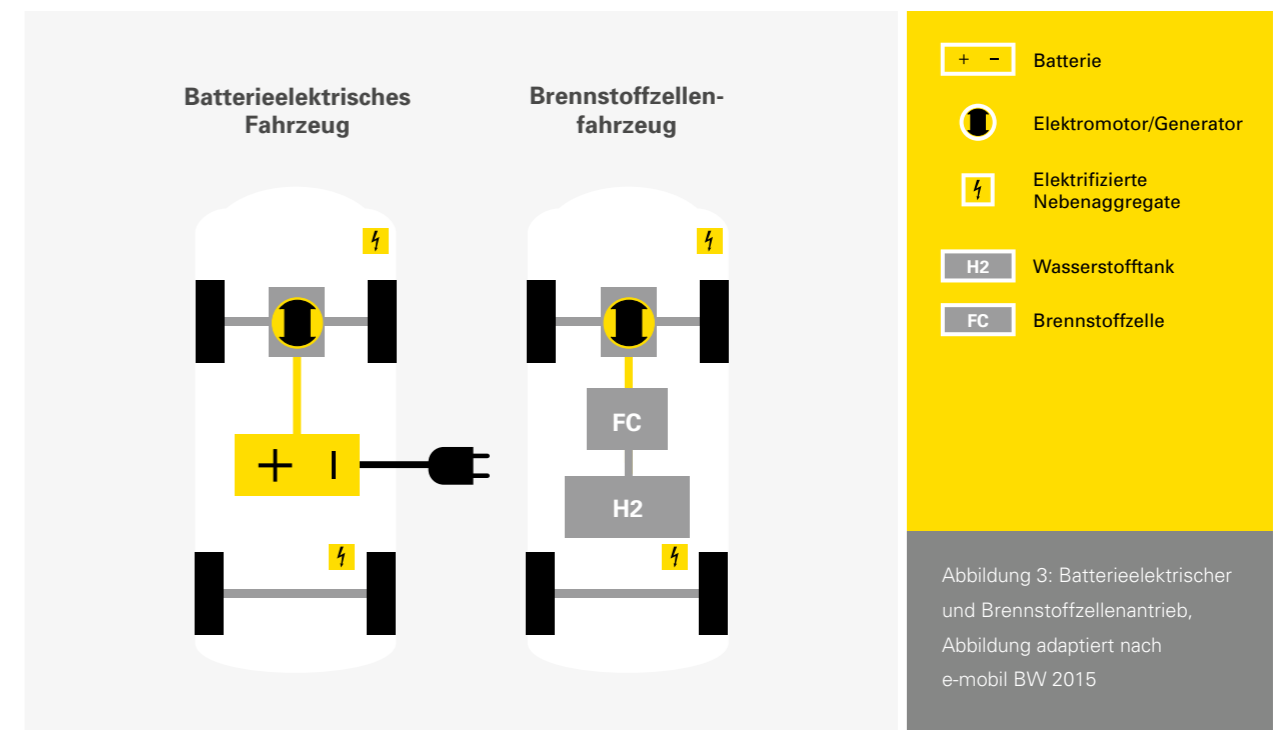


Abbildung 3: Batterieelektrischer und Brennstoffzellenantrieb, Abbildung adaptiert nach e-mobil BW 2015



Ein weiterer Unterschied betrifft die Energieverfügbarkeit zum Befüllen der Hochvolt-Batterie (HV-Batterie) bzw. des Wasserstoffspeichers: Für die Batterie existieren verschiedene Ladekonzepte mit unterschiedlichen Ladeleistungen, die entsprechende Ladezeiten mit sich bringen. Die Ladeinfrastruktur benötigt lediglich einen Anschluss an das Stromnetz, das in Deutschland prinzipiell gut ausgebaut ist. Für die angestrebte flächendeckende Versorgung mit Ladestationen sind jedoch auch erhebliche Investitionen in Netzverstärkungs- und Ausbaumaßnahmen erforderlich (NPE 2015).

Die Versorgung mit Wasserstoff hingegen ist aktuell auf wenige Versorgungspunkte beschränkt, was den Einsatz dieser Fahrzeuge erschwert. Für die Zukunft ist ein zunehmender Ausbau mit einer Basisabdeckung von ca. 100 Wasserstoff-tankstellen in Deutschland bis 2020 und einer weiteren Verdichtung der Versorgungsstruktur bis hin zu 1.000 Tankstellen im Jahr 2030 geplant (H2Mobility 2017). Diese Planung bezieht sich jedoch ausschließlich auf die 700-bar-Drucktechnologie für PKW, während für Busse und LKW die 350-bar-Technologie bevorzugt wird. Während diese für Stadtbusse auch zukünftig als Stand der Technik angesehen werden kann (e-mobil BW 2013), wird derzeit evaluiert, inwieweit für LKW im Fernverkehr ebenfalls das 700-bar-Druckniveau er-

forderlich ist, um eine entsprechende Reichweite zu gewährleisten.<sup>1</sup> In diesem Fall wäre eine flächendeckende Wasserstoffversorgung ohne zusätzliche Infrastrukturinvestitionen auch für LKW sichergestellt.

Tabelle 2 zeigt eine Auswahl an batterieelektrischen und Brennstoffzellennutzfahrzeugen für verschiedene Nutzfahrzeugsegmente im Straßenverkehr. In der Regel ermöglicht die Verwendung einer Brennstoffzelle und eines Wasserstofftanks höhere Reichweiten als die Verwendung einer Traktionsbatterie. Für die leichteren LKW, die gewöhnlich im Verteilerverkehr eingesetzt werden und somit auch geringere Anforderungen hinsichtlich der zurückzulegenden Reichweite mit sich bringen, liegt der Entwicklungsfokus bislang auf rein batterieelektrischen Antrieben.

Tabelle 3 zeigt eine Auswahl von batterieelektrischen und Brennstoffzellennutzfahrzeugen, die abseits des öffentlichen Straßennetzes oder nur auf kurzen Strecken eingesetzt werden. Prinzipiell sind beide Antriebstechnologien in allen Segmenten einsetzbar. Wie bei den LKW werden auch hier bei Anwendungen mit geringeren Reichweitenanforderungen batterieelektrische Antriebe bevorzugt.

<sup>1</sup> Im Fernverkehr stellt das zusätzliche Volumen der Wasserstofftanks einen begrenzenden Faktor dar. Mit 350-bar-Speichern wird aktuell eine Reichweite von bis zu 400 km als realistisch erachtet, wobei mit einer Kompression auf 700 bar die Reichweite um etwa 60 % gesteigert werden kann (EMCEL 2017).

Fahrzeugkategorie	Batterieelektrisch	Brennstoffzelle
Schwere Transporter	<b>Fuso eCarter</b> ■ Kleinserie ■ Reichweite: 100 km	-
Mittlere LKW	<b>Smith Newton</b> ■ Auf dem Markt ■ Nutzlast: 7 t ■ Reichweite: 160 km	<b>UPS Brennstoffzellenhybrid-Lieferfahrzeug</b> ■ Prototyp ■ Nutzlast: 4,5 t ■ Reichweite: 200 km
Schwere LKW	<b>Mercedes-Benz Urban eTruck</b> ■ Prototyp ■ Gesamtgewicht: 26 t ■ Reichweite: max. 200 km	<b>Scania (Asko)</b> ■ Prototyp ■ Gesamtgewicht: 27 t ■ Reichweite: max. 500 km
Sattelzugmaschinen	<b>Terberg YT202-EV</b> ■ Kleinserie ■ Gesamtgewicht: 40 t	<b>Toyota „Project Portal“</b> ■ Prototyp ■ Gesamtgewicht: 36 t ■ Reichweite: 320 km
Busse	<b>Sileo S12/18</b> ■ Auf dem Markt ■ Reichweite: 150 bis 250 km	<b>Van Hool A 330 hybrid FC</b> ■ Auf dem Markt ■ Reichweite: 300 km
Abfallsammelfahrzeuge	<b>BYD 8R</b> ■ Auf dem Markt ■ 10 t Nutzlast ■ Reichweite: 120 km	<b>FAUN Rotopress BZ-REX</b> ■ Konzept ■ Reichweite: 50 bis 100 km
Reinigungsfahrzeuge	<b>Bucher municipal CityCat 2020e</b> ■ Auf dem Markt	<b>Bucher Schörling CityCat H2</b> ■ Prototyp

Tabelle 2: Auswahl an batterieelektrischen und Brennstoffzellennutzfahrzeugen mit Straßenzulassung

Fahrzeugkategorie	Batterieelektrisch	Brennstoffzelle
Baugeräte und Bagger	<b>Kramer 5055e</b> ■ Auf dem Markt	-
Flurförderzeuge	<b>Still RX 60-25</b> ■ Auf dem Markt	<b>Still R 60-25 Fuel Cell</b> ■ Kleinserie, auf dem Markt
Landmaschinen und Traktoren	<b>John Deere, SESAM (Traktor)</b> ■ Prototyp ■ Reichweite: 55 km	<b>New Holland, NH<sub>2</sub> (Traktor)</b> ■ Verfügbar

Tabelle 3: Auswahl an batterieelektrischen und Brennstoffzellennutzfahrzeugen abseits öffentlicher Straßen

## Kernaussagen Kapitel 2

Unter dem Begriff der Nutzfahrzeuge sind äußerst verschiedene Segmente gefasst, die sich hinsichtlich ihrer technischen Spezifikationen und Einsatzkontexte fundamental unterscheiden. Damit einher gehen auch vielfältige zu beachtende technische und betriebliche Anforderungen. Diesen Unterschieden muss bei dem Einsatz von Nullemissionsantrieben Rechnung getragen werden.

Als Alternativen kommen batterieelektrische und Brennstoffzellennutzfahrzeuge infrage, die beide dem Anspruch einer lokalen Emissionsfreiheit gerecht werden. Beide Antriebe sind für einen Einsatz prinzipiell technologisch ausgereift, es zeigt sich aber, dass in vielen Segmenten entsprechende Fahrzeuge bislang allenfalls als Prototypen zu nicht marktauglichen Preisen verfügbar sind.



# 03

## Bedeutung der Nutzfahrzeuge in Baden-Württemberg

# 03

Bedeutung der Nutzfahrzeuge in Baden-Württemberg

Landmaschinen machen einen Großteil des Nutzfahrzeugbestandes im Südwesten aus



Im Folgenden wird der Nutzfahrzeugsektor (Anbieter und Nachfrager) nach Segmenten und umweltrelevanten Merkmalen analysiert. Dazu werden der Bestand, die Fahrleistung und die Energieverbräuche sowie die damit verbundenen Emissionen von Nutzfahrzeugen betrachtet. Nach Möglichkeit werden die Daten bezogen auf Baden-Württemberg dargestellt.

(KBA). Die Daten umfassen ausschließlich Fahrzeuge, denen nach der Fahrzeug-Zulassungsverordnung in Deutschland ein Kennzeichen zugeteilt wurde. Das bedeutet, dass ein Großteil der Nutzfahrzeuge in diesen amtlichen Statistiken nicht erfasst wird. Hier können nur Aussagen von Branchenverbänden und Schätzungen auf Basis von Absatzzahlen herangezogen werden.

### 3.1 Fahrzeugbestand nach Segmenten

Basis der Auswertungen zu Fahrzeugzulassungen und -bestand bilden die Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes

#### Fahrzeugbestand

Die nachfolgende Tabelle zeigt den Bestand nach Nutzfahrzeugsegmenten am 1. Januar 2016 in Baden-Württemberg. Rund 30.000 schwere Transporter mit einer zulässigen Ge-

Fahrzeugkategorie	Bestand 2016
Schwere Transporter	29.111
Mittlere LKW	9.394
Schwere LKW	23.712
Sattelzugmaschinen	23.040
Busse	8.664
Land- und forstwirtschaftliche Maschinen	Ca. 230.000
Baugeräte	Ca. 45.000
Abfallsammelfahrzeuge	Ca. 2.000
Flurförderzeuge	Ca. 70.000
Reinigungsfahrzeuge	Ca. 2.000

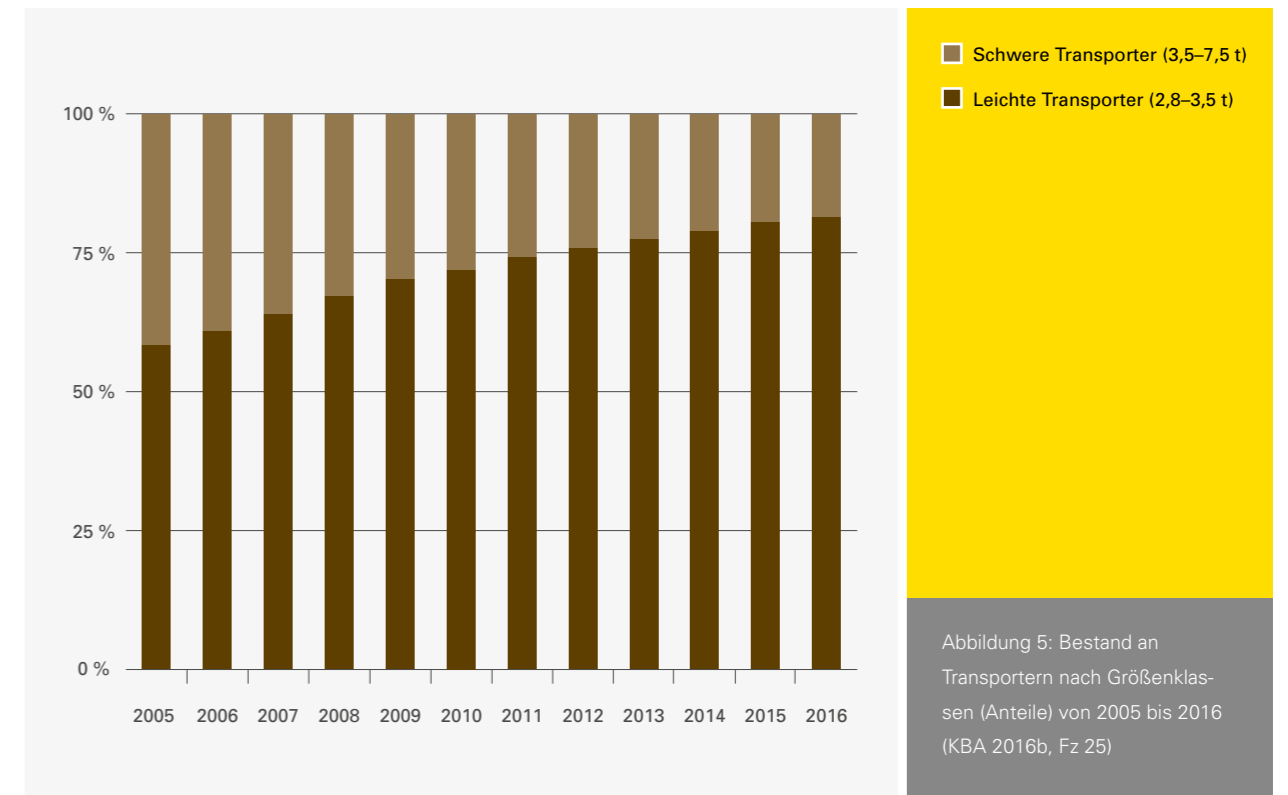
Tabelle 4: Fahrzeugbestand zum 01.01.2016 nach Nutzfahrzeugsegment in Baden-Württemberg (KBA, mehrere Reihen, und eigene Schätzungen)

samtmasse von 3,5–7,5 t sind in Baden-Württemberg eingetragen. Dieses Segment hat damit unter den hier betrachteten Nutzfahrzeugen den größten Bestandsanteil. Betrachtet man jedoch die Entwicklung bei den leichten Transportern (Größenklassen <3,5 t), erkennt man deutliche Verschiebungen hin zu kleineren Fahrzeugen (vgl. Abbildung 5).

Das Fahrzeugsegment der leichten Nutzfahrzeuge wird in dieser Studie nicht genauer betrachtet (siehe Kapitel 2.1), dennoch werden die Gründe für die Verschiebungen zu kleineren Fahrzeugen an dieser Stelle kurz wiedergegeben: Der Bestand an schweren Transportern hat seit 2005 in Deutschland um 13 % abgenommen, während der Bestand der Transporter zwischen 2,8 und 3,5 t im gleichen Zeitraum um 58 % auf mittlerweile über 1,1 Mio. Fahrzeuge zugenommen hat. Diese Verschiebungen lassen sich über die rechtlichen Rahmenbedingungen für leichte Nutzfahrzeuge (<3,5 t) erklären. Wer nach dem 1. Januar 1999 seinen Führerschein erworben hat, benötigt den LKW-Führerschein Klasse C, um ein Fahrzeug mit mehr als 3,5 t zGG zu lenken. Ein weiterer Vorteil von Kraftfahrzeugen <3,5 t zGG besteht darin, dass für sie die besonderen Geschwindigkeitsbegrenzungen für

schwere Nutzfahrzeuge nicht gelten. Rund 23.000 Nutzfahrzeuge mit mehr als 12 t zGG sind im Fahrzeugbestand Baden-Württembergs vertreten. Sie teilen sich je hälftig auf in Sattelzugmaschinen und schwere LKW. Die Anzahl an Flurförderzeugen in Baden-Württemberg wird auf rund 72.000 geschätzt; damit ordnen sie sich von der Anzahl her an zweiter Stelle ein, hinter den land- und forstwirtschaftlichen Zugmaschinen.

Gemäß KBA sind in Baden-Württemberg ca. 220.000 land- und forstwirtschaftlich genutzte Zugmaschinen gemeldet, hinzu dürften etwa 10.000 sonstige Landmaschinen kommen. Damit bilden diese Fahrzeuge zahlenmäßig das relevanteste Nutzfahrzeugsegment, das in dieser Untersuchung betrachtet wird. Die landwirtschaftlichen Zugmaschinen haben allerdings eine vergleichsweise geringe Fahrleistung, sodass der Energieverbrauch dieser Fahrzeuggattung relativ gering ist. Eine Auswertung der KBA-Daten nach Motorleistung der Traktoren zeigt zudem, dass in Baden-Württemberg eher kleine Zugmaschinen im Einsatz sind. Diese Tendenz ist insofern plausibel, als es in Baden-Württemberg überdurchschnittlich viele landwirtschaftliche Kleinbetriebe gibt.





Abfallsammel- und Reinigungsfahrzeuge weisen mit jeweils etwa 2.000 Fahrzeugen die geringsten Bestandszahlen unter den betrachteten Fahrzeugkategorien auf. Sie sind jedoch häufig in dichtbesiedelten Gebieten unterwegs und stehen daher auch unter besonderem Druck, Emissionen zu reduzieren.

Seit dem 31. Dezember 2013 gilt die Abgasnorm Euro VI. Mit Euro VI werden die Grenzwerte für LKW für den Ausstoß von Partikeln um etwa 67 % und von Stickstoffoxiden sogar um 80 % gegenüber Euro V gesenkt. Damit bedeutet die Einführung der Abgasnorm Euro VI eine wesentliche Verschärfung gegenüber der vorherigen Stufe. Die Abgase werden erstmals nicht nur im Labor geprüft, sondern mittels PEMS<sup>2</sup> auch im realen Verkehr gemessen. Seit 2014 ist die Schadstoffnorm Euro VI verpflichtend für die Zulassung der meisten Nutzfahrzeuge. Die folgende Abbildung 6 zeigt die Bestands-

anteile von Fahrzeugen mit der Abgasnorm Euro VI je Fahrzeugkategorie am 1. Januar 2016.

Da für LKW, Sattelzugmaschinen und Omnibusse die Euro-VI-Norm seit 2014 verpflichtend ist, lassen sich an den Bestandsanteilen der Fahrzeuge mit Euro-VI-Norm gewissermaßen Neufahrzeuganteile erkennen. Anfang 2016 haben bereits fast 40 % der Sattelzugmaschinen im Fahrzeugbestand von Baden-Württemberg die Abgasnorm Euro VI erfüllt. Die Anzahl der Neuzulassungen je Fahrzeugkategorie ist einerseits abhängig von der absoluten Anzahl im Bestand und andererseits von den Investitionszyklen der Nutzfahrzeuge. Je höher der Neuzulassungsanteil, desto eher kann sich der Fahrzeugbestand modernisieren. Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt die Neuzulassungsanteile je Nutzfahrzeugsegment in Baden-Württemberg.

Wie die Betrachtung des Fahrzeugbestandes nach der Abgasnorm Euro VI zeigt, haben Sattelzugmaschinen jährlich hohe Anteile an der Anzahl der Neufahrzeuge. Im Jahr 2015 waren fast 20 % der Sattelzugmaschinen jünger als ein Jahr. Bei hohen Neuzulassungsanteilen wirken entsprechende Maßnahmen (z. B. Abgasgrenzwerte) schneller auf die Fahrzeugflotte. Auch Flurförderzeuge weisen mit einem Anteil von 14 % der Neuzulassungen am Bestand eine hohe Durchdringungsrate von Neufahrzeugen auf. Reinigungsfahrzeuge und schwere Transporter erzielen mit 6 % Neuzulassungsanteil die geringsten Werte.

Die Durchdringung von alternativen Antrieben beim heutigen Nutzfahrzeugbestand ist praktisch null. Einzig die Gabelstapler sind bereits heute größtenteils elektrisch betrieben (Anteil E-Antriebe liegt bei 83 %). Bei den klassischen Nutzfahr-

gen zur Güterbeförderung hat kein Nutzfahrzeugsegment elektrische Anteile über 1 %. Bei den Omnibussen sind es immerhin 0,6 % in Baden-Württemberg (Stand: 1. Januar 2016).

Ein Blick auf den Bestand der Fahrzeugsegmente LKW >3,5 t und Kraftomnibusse, kategorisiert nach verwendeten Kraftstoffarten, zum 1. Januar 2016 in Abbildung 8 zeigt, dass nahezu ausschließlich Diesel im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge verwendet wird.

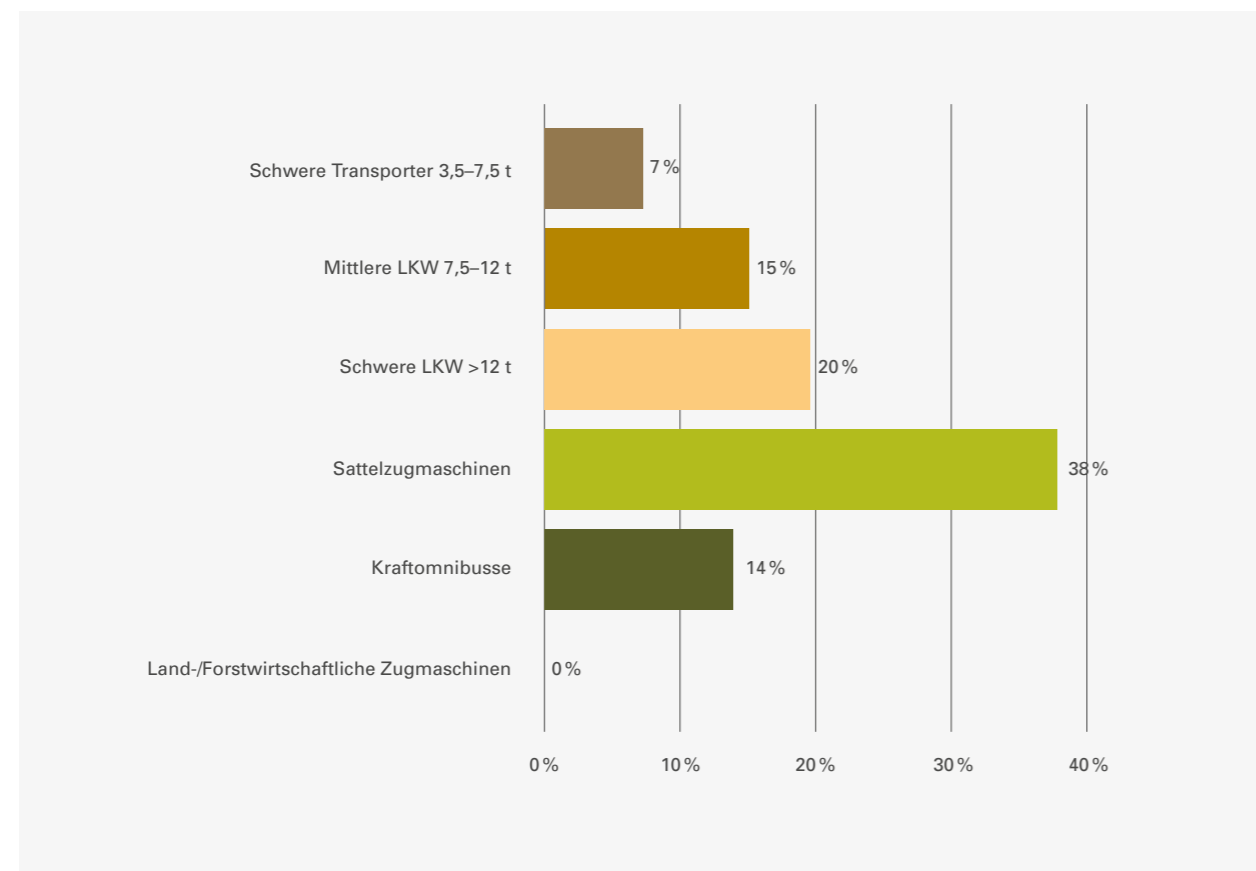


Abbildung 6: Anteil der Fahrzeuge mit Abgasnorm Euro VI nach Nutzfahrzeugsegment in Baden-Württemberg am 01.01.2016

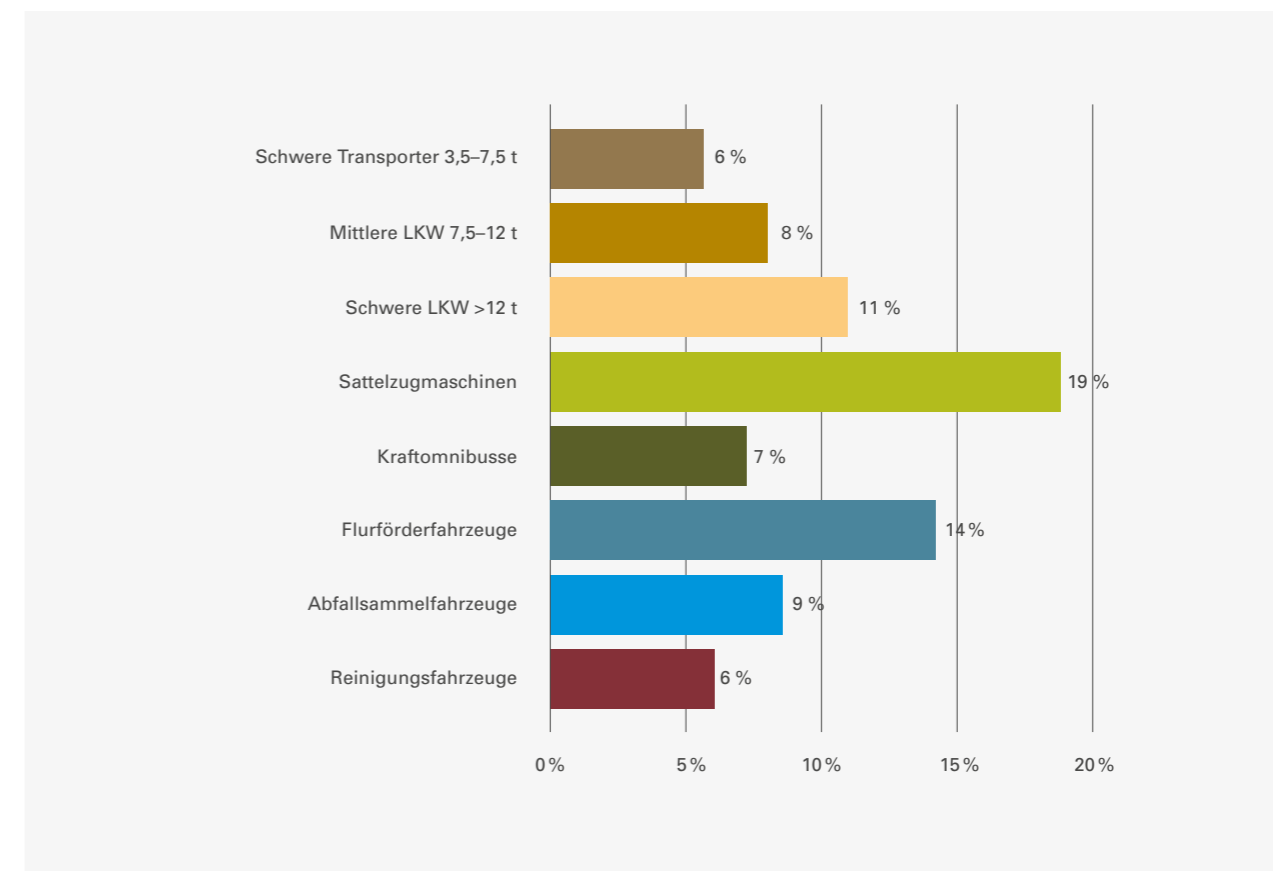
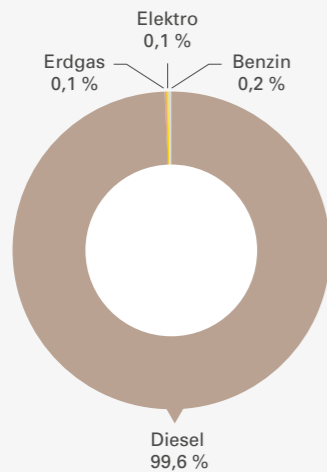


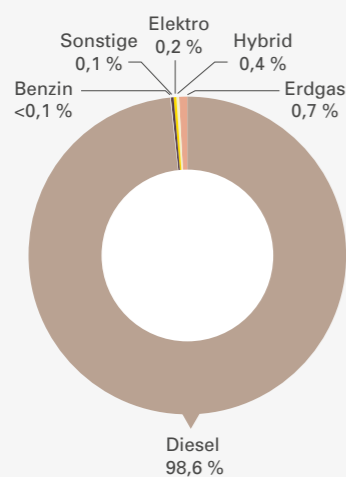
Abbildung 7: Anteil der Fahrzeugneuzulassungen am Fahrzeugbestand im Jahr 2015

<sup>2</sup> | Ein mobiles Emissionsmessgerät (engl.: Portable Emissions Measurement System; PEMS) kann die Abgasemissionen von Kraftfahrzeugen während einer realen Straßenfahrt analysieren.

**LKW mit Nutzlast >2 t**



**Kraftomnibusse**



Differenzen in den Summen durch Rundungen

Abbildung 8: Fahrzeugbestand schwerer Nutzfahrzeuge und Kraftomnibusse in Baden-Württemberg zum 01.01.2016 (Datengrundlage: (KBA 2016c))

Im Bereich der fahrenden Maschinen in den Sektoren Landwirtschaft, Bauwirtschaft und Industrie ist Diesel ebenfalls der bei weitem relevanteste Kraftstoff (siehe Abbildung 9). Zusätzlich hat Flüssiggas (LPG) für den Einsatz in Flurförderzeugen, vor allem in Gabelstaplern, mit einem errechneten Anteil von 8 % im Jahr 2010 einen erwähnenswerten Anteil.

### 3.2 Fahrleistung und Verkehrsleistung

Für das Jahr 2013 berechnete das KBA erstmals ein differenziertes Fahrleistungsgerüst nach Fahrzeug- und Kraftstoffarten sowie nach Fahrzeugalter (KBA 2015). Diese Berechnungen basieren auf den festgestellten Kilometerständen aller im Rahmen der Hauptuntersuchung vorgeführten Fahrzeuge. Für das Jahr 2013 umfasst die Stichprobe 26,5 Mio. Fahrzeuge. Damit stellt diese Fahrleistungsquelle bezüglich der Inländerfahrleistung nach Fahrzeugkategorie die umfangreichste Erhebung dar.

**Endenergieverbrauch mobiler Maschinen in Baden-Württemberg 2010**

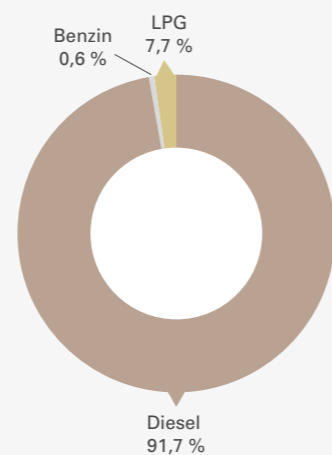


Abbildung 9: Berechneter Kraftstoffverbrauch mobiler Maschinen in Baden-Württemberg im Jahr 2010 (Datengrundlage: (ifeu 2014b))

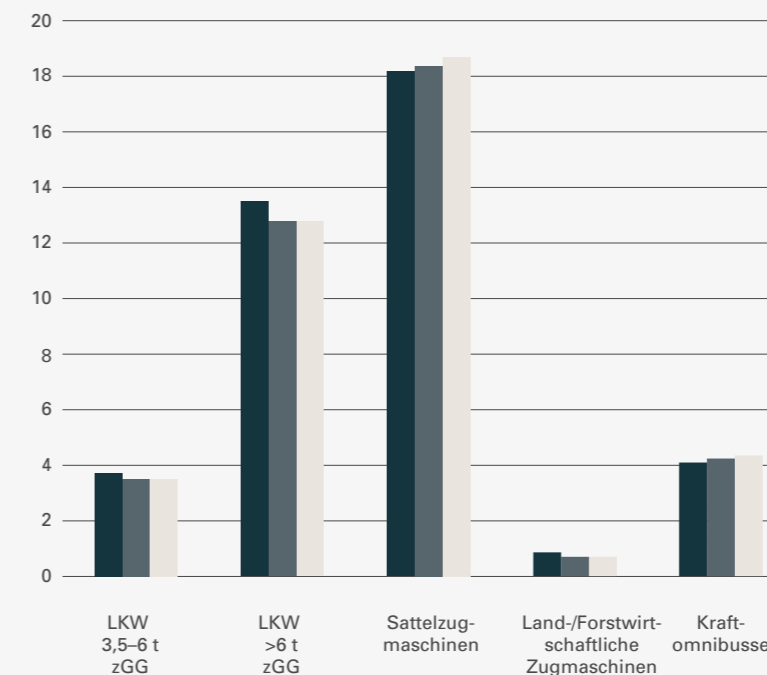
Die Fahrzeugkategorie LKW wird in der Veröffentlichung „Verkehr in Kilometern“ (KBA 2016a) nach zulässiger Gesamtmasse und Kraftstoffarten abgegrenzt. Die LKW werden in drei Größenklassen unterschieden (<3,5 t, 3,5–6 t, >6 t). Die Abgrenzung bei den LKW erfolgt damit nicht analog zu dieser Untersuchung, weshalb die Angaben nicht direkt vergleichbar sind. Trotzdem erkennt man die Größenordnungen bei den Fahrleistungen nach Fahrzeugsegmenten. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt die Inländerfahrleistung für drei Jahre gemäß der KBA-Statistik „Verkehr in Kilometern“.

In Deutschland gemeldete schwere LKW über 6 t zulässiger Gesamtmasse weisen gemäß KBA im Jahr 2015 eine Laufleistung von insgesamt über 12,8 Mrd. Kilometer auf. Das sind 5 % weniger als im Jahr 2013. Die Fahrleistung von Sattelzugmaschinen ist im gleichen Zeitraum um 3 % auf 18,7 Mrd. Fahrzeugkilometer im Jahr 2015 angestiegen. Omnibusse und kleinere LKW zwischen 3,5 und 6 t erreichen je

rund 4 Mrd. Fahrzeugkilometer, bei Omnibussen mit steigender und bei kleineren LKW mit sinkender Tendenz. Entgegen der großen Anzahl im Bestand sind Fahrleistungen bei landwirtschaftlich genutzten Zugmaschinen sehr gering. Die relevante Größe zur Bestimmung von Energieverbrauch und Emissionen sind deshalb bei diesem Segment die Betriebsstunden.

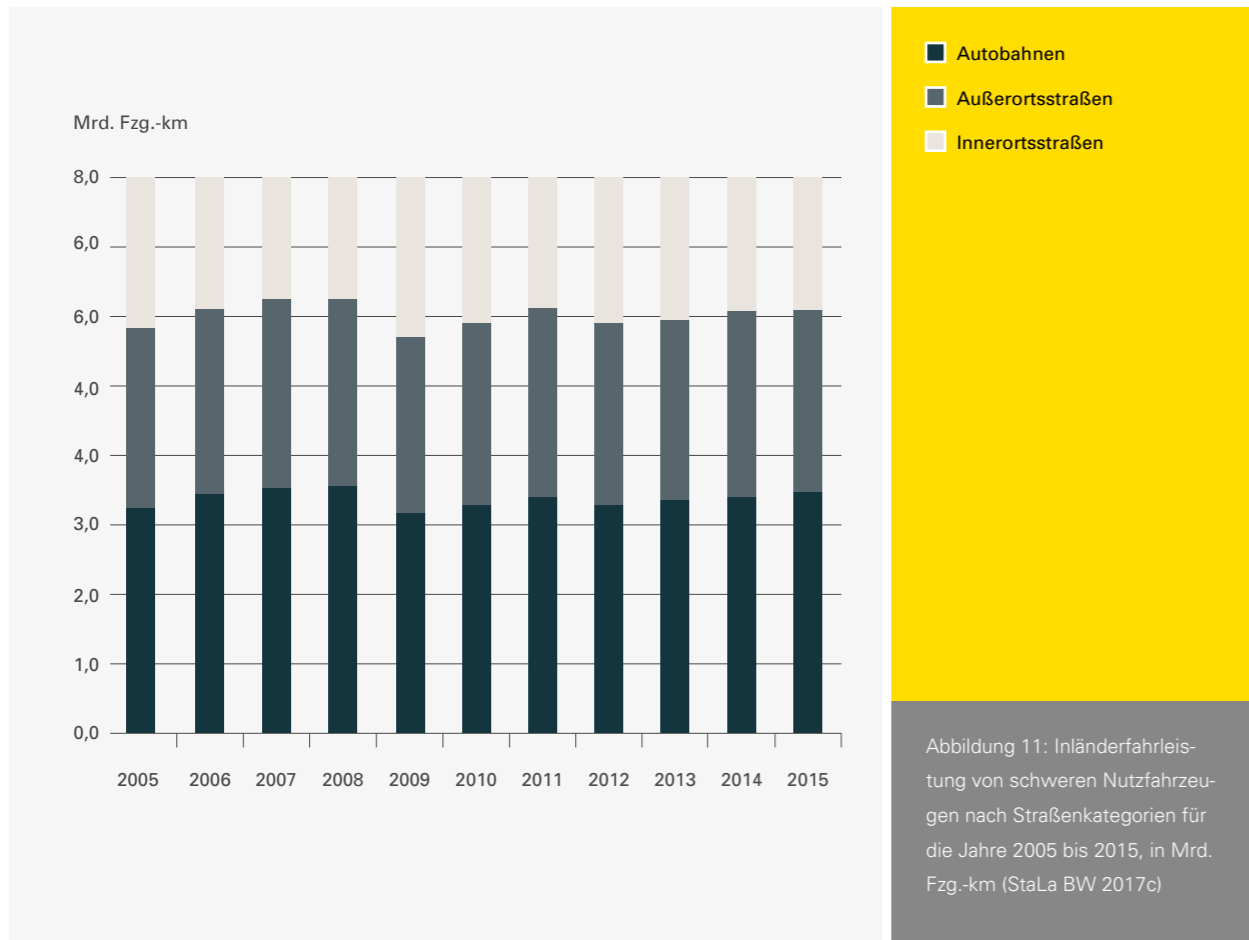
Für Baden-Württemberg sind Fahrleistungsdaten für schwere Nutzfahrzeuge (inkl. Busse) nach Straßenkategorie verfügbar. Die Fahrleistungsdaten beziehen sich auf die in Baden-Württemberg (territorial) geleistete Fahrleistung. Für die anderen Fahrzeugsegmente sind keine Fahrleistungsdaten vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg verfügbar (StaLa BW 2017c).

Mrd. Fzg.-km



■ 2013  
■ 2014  
■ 2015

Abbildung 10: Inländerfahrleistung nach Nutzfahrzeugkategorie für die Jahre 2013–2015, in Mrd. Fzg.-km (KBA, mehrere Jahre)

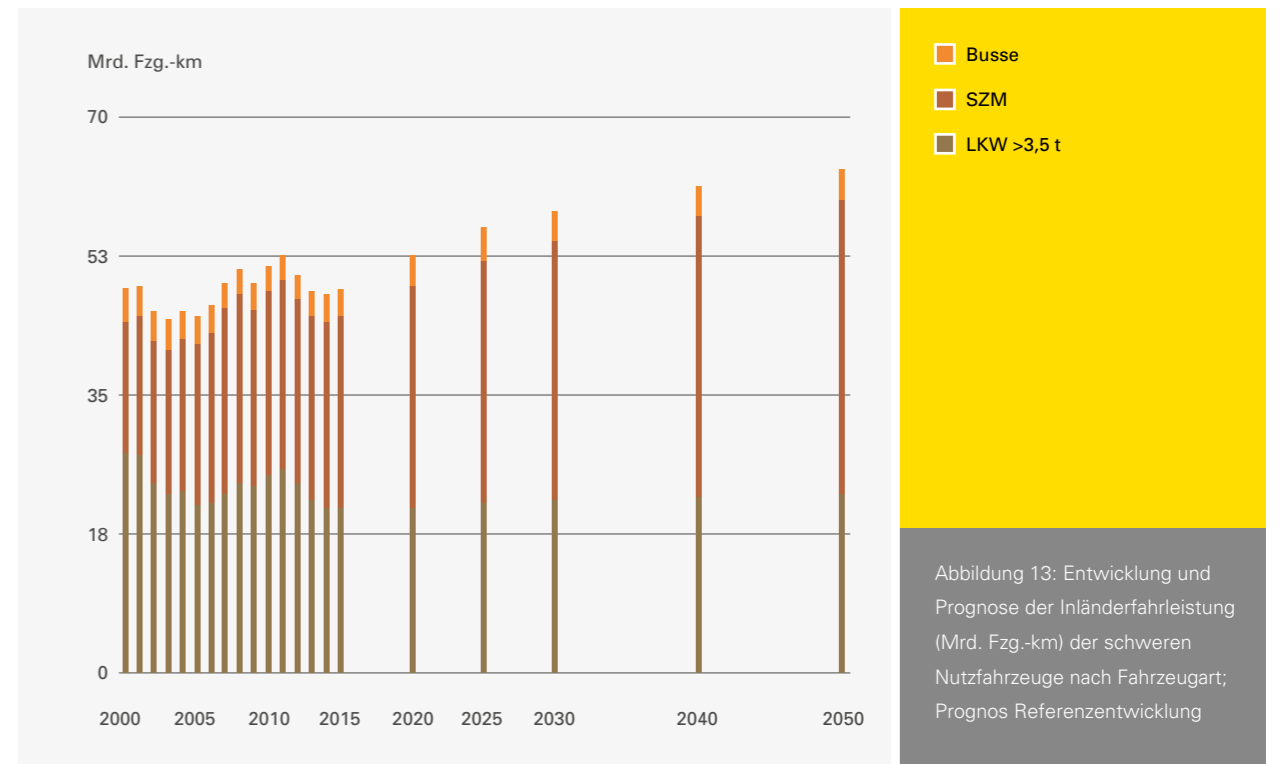
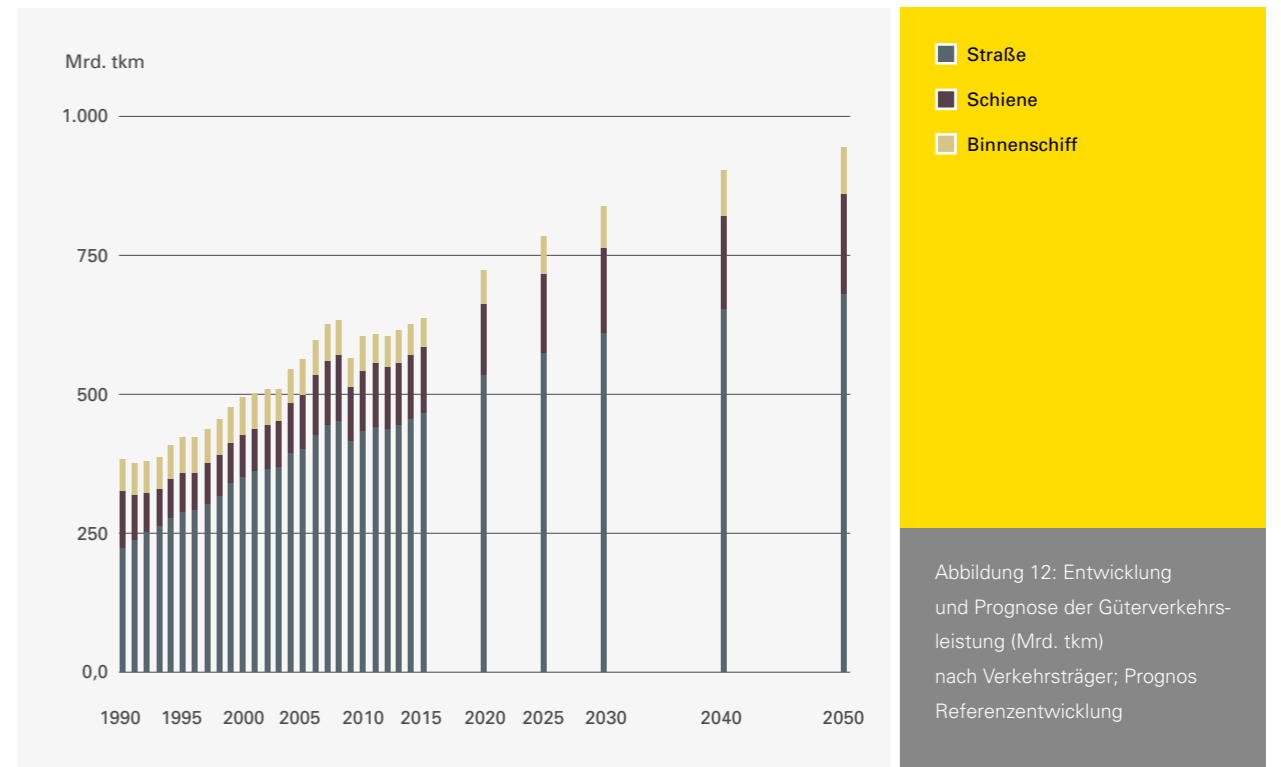


Die jährliche Fahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen in Baden-Württemberg liegt bei ungefähr 7 Mrd. Fahrzeugkilometern und ist im Zeitraum von 2005 bis 2015 um 4,5 % angestiegen. Rund 48 % der Fahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen werden auf der Autobahn erbracht, weitere 36 % auf Außerortsstraßen und die restlichen 16 % auf Innerortsstraßen in Baden-Württemberg.

Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung gehen alle Prognosen von einer deutlichen Zunahme der Güterverkehrsleistung in Deutschland aus. Während die prozentuale Zunahme des Straßengüterverkehrs im Vergleich zu Schiene und Binnenschiffahrt niedriger ausfällt, ist sein Wachstum in absoluten Zahlen aufgrund seiner dominierenden Stellung bei weitem am stärksten (die prognostizierte Zunahme des Straßengüterverkehrs ist höher als die aktuelle Güterverkehrsleistung für Schiene und Binnenschiffahrt zusammen; vgl. Abbildung 12). Die weitaus stärkste Zunahme der Fahr-

leistungen wird dabei für die Sattelzugmaschinen prognostiziert, deren Fahrleistung bis 2050 um 54 % zunehmen wird, wie in Abbildung 13 dargestellt ist.

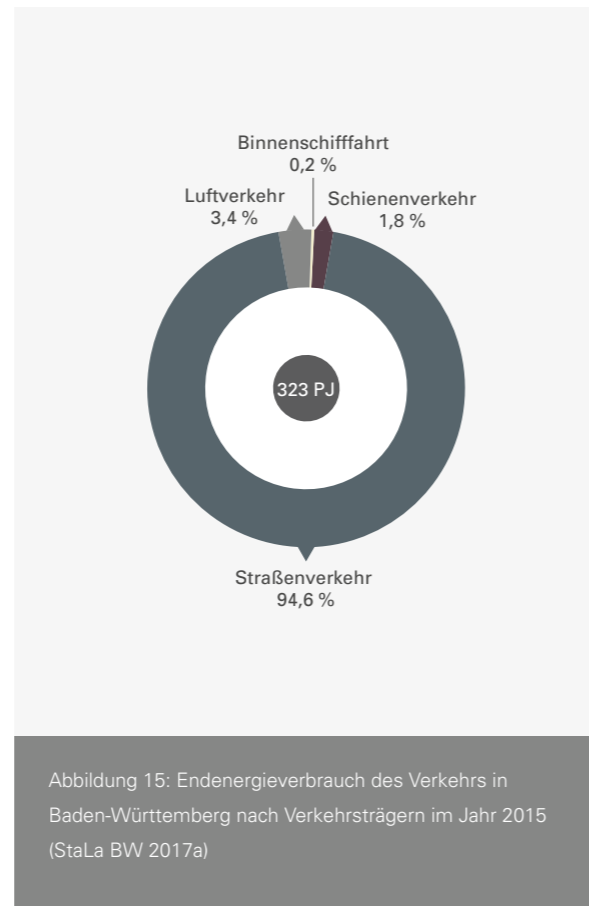
Die prognostizierten Wachstumsraten der Fahrleistung haben eine direkte Auswirkung auf den Energieverbrauch des Straßenverkehrs. Die Entwicklung des Energieverbrauchs des Verkehrs in Deutschland und Baden-Württemberg wird im folgenden Unterkapitel beschrieben.



### 3.3 Endenergieverbrauch des Verkehrs

Im Jahr 2015 belief sich der Endenergieverbrauch des Verkehrs<sup>3</sup> in Deutschland auf 2.621 PJ (entsprechend 728 TWh) und lag damit in einer vergleichbaren Größenordnung wie der Endenergieverbrauch der Industrie mit 2.548 PJ. Nach (UBA 2017) entfiel 2015 rund ein Viertel des Endenergieverbrauchs des Verkehrs auf den Güterverkehr. Während der Endenergieverbrauch des Personenverkehrs von 2005–2014 um 2,4 % sank, nahm der des Güterverkehrs um 7,2 % zu. Insgesamt entsprach dies einer Minderung um 0,2 %. Der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch pro Verkehrsaufwand<sup>4</sup> sank von 1995–2014 in allen Bereichen, z. B. bei LKW um 25 % (s. Abbildung 14) und bei Reisebussen um 6 %, was vor allem auf technische Verbesserungen an den Fahrzeugen zurückzuführen ist.

Der Endenergieverbrauch des Verkehrs in Baden-Württemberg 2015 betrug 323 PJ und wird deutlich vom Straßenverkehr mit einem Anteil von 95 % bestimmt. Die restlichen 5 % teilen sich entsprechend Abbildung 15 zwischen dem Luft- und Schienenverkehr sowie der Binnenschifffahrt auf. Der Anteil des Straßenverkehrs war auch im zeitlichen Verlauf stabil: So lag sein durchschnittlicher Anteil am Energieverbrauch des Verkehrs in den Jahren 2008–2015 im Mittel praktisch unverändert bei 95 %.

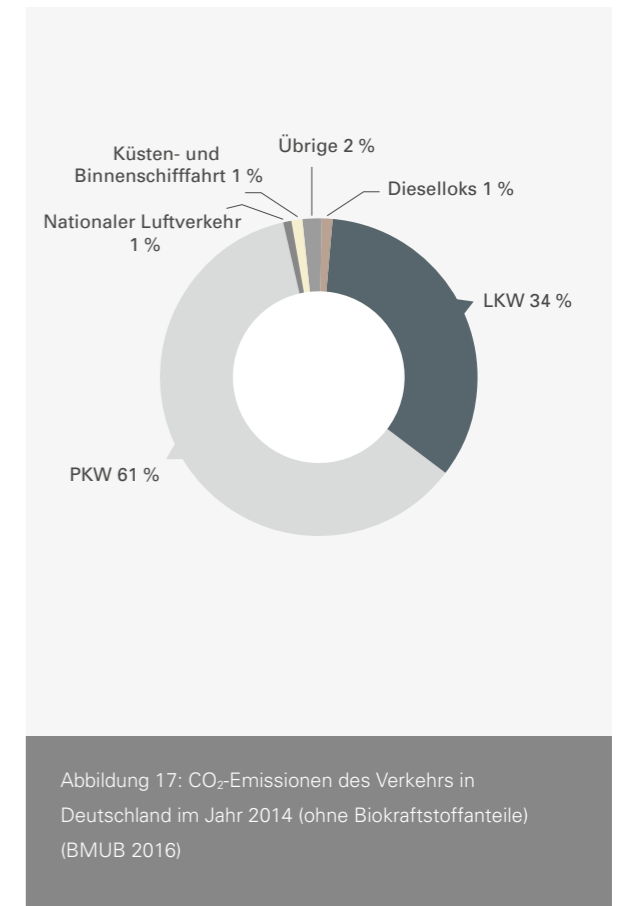


Betrachtet man den Endenergieverbrauch des Verkehrs in Baden-Württemberg nach Energieträgern, so ergibt sich eine klare Dominanz der mineralölbasierten Otto- und Dieselmotoren (Abbildung 16). Der Anteil des Dieselmotors ist dabei in den letzten zehn Jahren kontinuierlich gestiegen und lag 2015 bei 58 %, während die Ottomotoren im selben Jahr einen Anteil von 32 % hatten. Während diese zusammen 90 % des Endenergieverbrauchs von Otto- und Dieselmotoren zu mehr als 99 % in den Straßenverkehr flossen,<sup>5</sup> wurde der bei 2 % des Endenergieverbrauchs liegende Stromanteil fast ausschließlich im Schienenverkehr genutzt. Analog flossen die Flugzeugkraftstoffe (Kerosin) in den Luftverkehr.

Die sonstigen Kraftstoffe mit ihrem Anteil von rund 5 % im Jahr 2015 umfassen mehrheitlich (>80 %) den im Otto- und Dieselmotoren enthaltenen Biokraftstoffanteil. Weitere Bestandteile sind die vor allem im Straßenverkehr eingesetzten Kraftstoffe Flüssiggas (LPG) und Erdgas.

### 3.4 Verkehrsbedingte Emissionen

Der Anteil des Straßenverkehrs an den verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland liegt analog zum Anteil am Primärenergiebedarf ebenfalls bei 95 %. Hauptverursacher sind mit gut 60 % der Personenverkehr und mit 34 % der Straßengüterverkehr (siehe Abbildung 17).



Spez. Endenergieverbrauch (MJ/tkm)

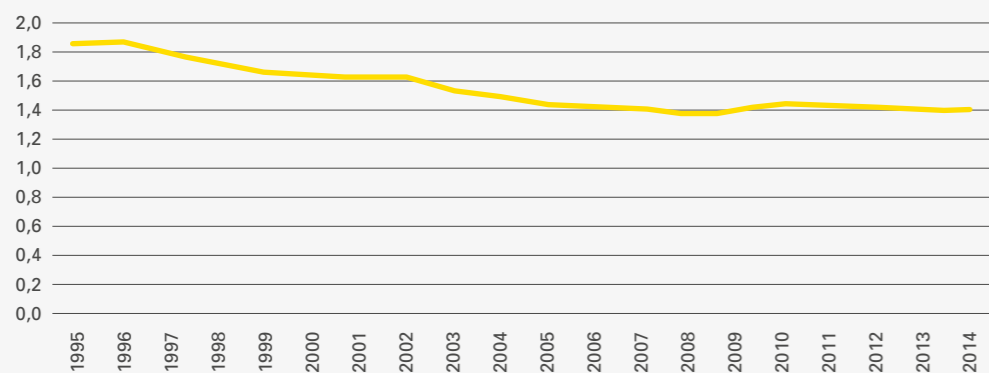
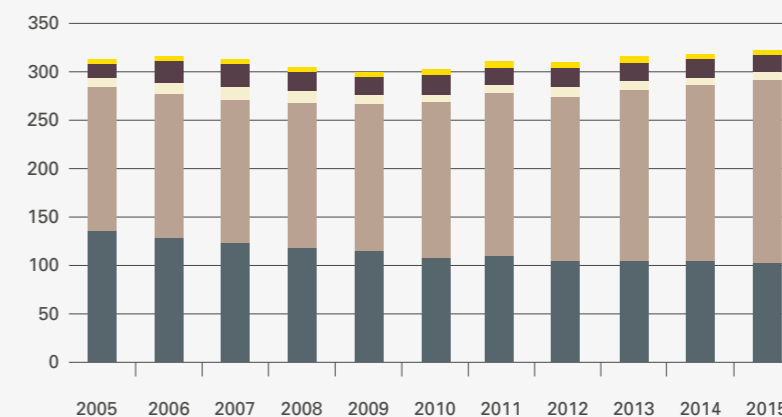


Abbildung 14: Spezifischer Endenergieverbrauch im LKW-Güterverkehr 1995–2014 (Datenbasis: (UBA 2017))

Endenergieverbrauch (PJ)



- Ottokraftstoffe
- Dieselmotoren
- Flugzeugkraftstoffe
- Sonstige
- Strom

Abbildung 16: Endenergieverbrauch des Verkehrs in Baden-Württemberg nach Energieträgern von 2005 bis 2015 (Datenbasis: (StaLa BW 2017a))

3 | Schienenverkehr, Straßenverkehr, Luftverkehr und Küsten- und Binnenschifffahrt.

4 | Der spezifische Energiebedarf pro Verkehrsaufwand im Güterverkehr beschreibt den Energiebedarf für den Transport von Gütern und wird als Energieaufwand pro Tonnenkilometer (tkm) ausgedrückt. Entsprechend wird der Energieverbrauch im Personenverkehr als Energieaufwand pro Personenkilometer (Pkm) angegeben.

5 | Der Verbrauch an Otto- und Dieselmotoren entsprach deutschlandweit einer Absatzmenge von insgesamt rund 100 Mio. t.

Die spezifischen Emissionen insbesondere auch des LKW-Verkehrs sind seit 1995 durch bessere Motoren, Abgastech- nologie und eine bessere Kraftstoffqualität signifikant gesunken

(siehe Abbildung 18), wobei die technisch bedingten Senkungen je tkm aufgrund des gestiegenen Verkehrsaufwands zum Teil wieder ausgeglichen wurden.

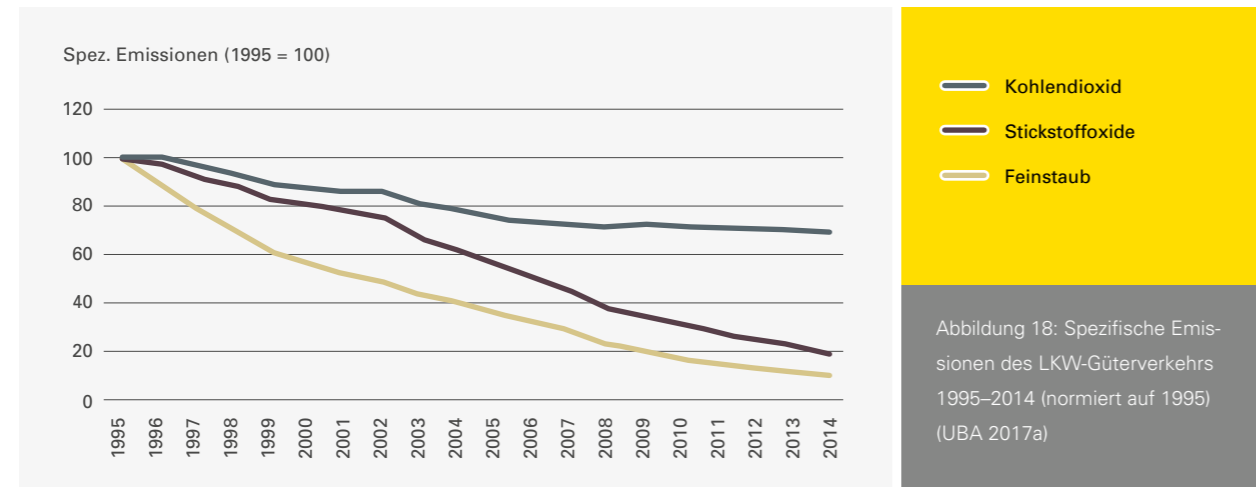


Abbildung 18: Spezifische Emissionen des LKW-Güterverkehrs 1995–2014 (normiert auf 1995) (UBA 2017a)

An den NO<sub>x</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg hatten Nutzfahrzeuge im Jahr 2015 einen Anteil von 41 %, an den PM<sub>10</sub>-Emissionen von 37 % (entsprechend 21,1 kt NO<sub>x</sub> und 0,8 kt PM<sub>10</sub>). Ihr Beitrag lag damit jeweils unter dem

der Diesel-PKW, die 47 % der NO<sub>x</sub>- und 39 % der PM<sub>10</sub>-Emissionen verursachten. Die Anteile der einzelnen Verkehrsträger an den Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs sind für NO<sub>x</sub> in Abbildung 19 und für PM<sub>10</sub> in Abbildung 20 dargestellt.

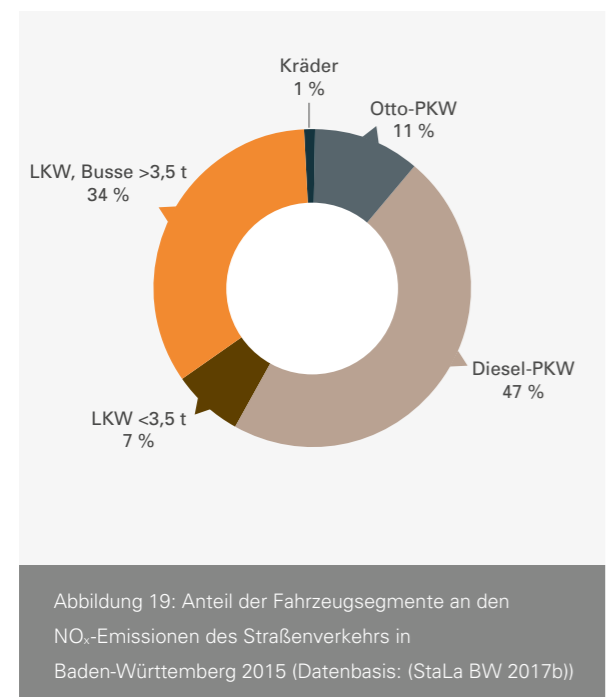


Abbildung 19: Anteil der Fahrzeugsegmente an den NO<sub>x</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg 2015 (Datenbasis: (StaLa BW 2017b))

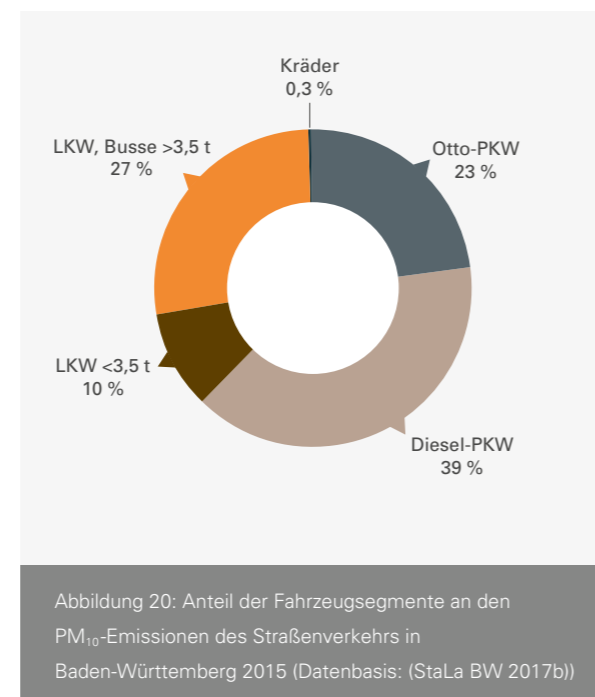


Abbildung 20: Anteil der Fahrzeugsegmente an den PM<sub>10</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg 2015 (Datenbasis: (StaLa BW 2017b))

Neben den straßenzugelassenen Fahrzeugen tragen mobile Maschinen (non-road mobile machinery; NRMM<sup>6</sup>) erheblich zu den Schadstoffemissionen von Nutzfahrzeugen bei. So emittierte dieser sehr heterogene Sektor, der Fahrzeuge und Maschinen aus den Bereichen Land-, Forst- und Bauwirtschaft, Industrie, Gartenbau, aber auch Hobbybedarf umfasst,<sup>7</sup> im Jahr 2010 in Deutschland etwa die gleiche Menge an Abgaspartikeln und etwa ein Viertel der Stickoxid-Emissionen des Straßenverkehrs (ifeu 2014a).

In (ifeu 2014a) wurde bezüglich der Emissionen mobiler Maschinen in Deutschland die Landwirtschaft als emissionsrelevantester Sektor identifiziert, gefolgt von der Bauwirtschaft und der Industrie. Beim Sektor Landwirtschaft können weiterhin verschiedene Maschinenkategorien unterschieden werden. Die wichtigste Kategorie bezüglich Fahrzeuganzahl und Emissionen sind die landwirtschaftlichen Zugmaschinen, Mähdrescher und Lader (z. B. Rad- und Teleskoplader).

Insbesondere Baumaschinen können jedoch trotz ihrer verhältnismäßig geringeren Stückzahlen aufgrund ihrer langen Nutzungsdauer, der hohen Zahl an Einsatzstunden an einem Ort und den im Vergleich zu straßenzugelassenen Fahrzeugen deutlich geringeren Anforderungen an die Abgaswerte lokal zu einer erheblichen Zusatzbelastung führen. Dadurch sind sie insbesondere in Ballungsräumen von hoher Relevanz: So werden 25 % der innerstädtischen verkehrsbedingten Rußemissionen auf Baumaschinen zurückgeführt (Diegmann et al. 2007) und sie werden für 15 % der gesamten Partikel- und 12 % der NO<sub>x</sub>-Emissionen Londons verantwortlich gemacht (TE 2015). Um die lokalen Emissionen von Baumaschinen zu begrenzen, wurde von einigen Städten wie Berlin und Bremen bei öffentlichen Bauvorhaben der Einsatz von Baumaschinen mit Partikelfiltereinrichtungen generell vorgeschrieben. Die Ende 2015 für Baden-Württemberg verabschiedete Luftqualitätsverordnung-Baumaschinen gilt hingegen für sämtliche Baumaßnahmen, jedoch nur für den Betrieb von Baumaschinen von 19 bis 560 kW in Luftreinhaltegebieten. Für die Großbaustelle Stuttgart 21 setzte die Deutsche Umwelthilfe den Einsatz von Partikelfiltern bei etwa 300 Baumaschinen und -fahrzeugen gerichtlich durch (DUH 2013).

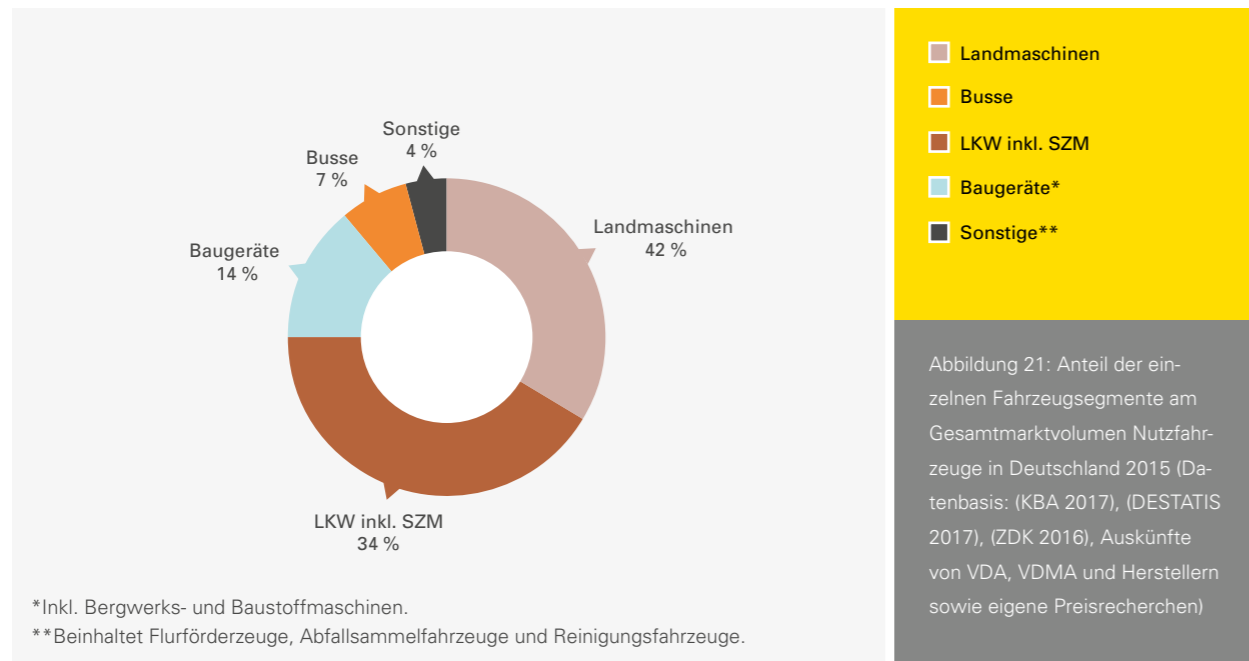
### 3.5 Ökonomische Relevanz des Nutzfahrzeugsektors für Baden-Württemberg

Der Fahrzeugbau ist von außerordentlicher Bedeutung für Baden-Württemberg (BW 2016a, b). In der Automobilindustrie waren in Baden-Württemberg am 30. September 2016 insgesamt 225.262 Menschen in 290 Betrieben beschäftigt; damit war der Sektor der zweitgrößte Arbeitgeber nach dem Maschinenbau und beschäftigte insgesamt 17,9 % aller Arbeitnehmer. Die wirtschaftliche Bedeutung ist sogar noch größer, da die Branche mit 104,7 Mrd. € für 30 % des Gesamtumsatzes der baden-württembergischen Industrie verantwortlich zeichnet und im Vergleich zu anderen Branchen den höchsten Umsatz pro Beschäftigtem aufweist. Die Exportquote ist mit 72 % sehr hoch.

Die Eingrenzung, welchen Anteil an diesen Zahlen die Nutzfahrzeugindustrie hat, ist schwierig, da keine regelmäßig aktualisierten statistischen Zusammenstellungen öffentlicher Stellen oder des VDA zu diesem Segment vorliegen. Dies liegt einerseits daran, dass insbesondere Zulieferer oft sowohl PKW- als auch Nutzfahrzeughersteller beliefern, sodass nicht trennscharf ermittelt werden kann, welcher Anteil ihres Umsatzes welchem Segment zuzuordnen ist. Andererseits werden nicht alle Nutzfahrzeuge als Kraftwagen definiert, sodass sich die entsprechenden Hersteller gar nicht als Teil der Automobilindustrie, sondern als Maschinenbauer verstehen. So sind beispielsweise die Hersteller von Flurförder- oder Reinigungsfahrzeugen, aber auch etwa die Landmaschinenhersteller im VDMA organisiert. Dies erschwert die Ermittlung belastbarer Zahlen. Ausgehend von den, für die einzelnen Fahrzeugsegmente durch das Zusammentragen von Hersteller- und Verbandsinformationen sowie vereinzelter statistischer Veröffentlichungen, ermittelten Umsatzzahlen, kann für alle hier betrachteten Nutzfahrzeugsegmente für 2015 ein Marktvolumen von ca. 20 Mrd. € in Deutschland ermittelt werden (siehe Abbildung 21).

6 | Untersucht wurden die Emissionen von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und Partikeln (PM).

7 | Weithin fallen unter NRMM auch Motoren für Schiffe und Bahnen oder Generatoren, die hier nicht weiter betrachtet werden.



Zwar wirkt die Nutzfahrzeugindustrie damit auf den ersten Blick im Vergleich zum gesamten Automobilssektor, als wäre sie von eher untergeordneter Bedeutung, da dieser allein in Baden-Württemberg das Fünffache umsetzt. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die 20 Mrd. € allein das Endkundengeschäft widerspiegeln und die Umsätze der Zulieferer nicht berücksichtigt sind.

Tabelle 5 gibt eine Übersicht über wichtige Firmen mit Sitz oder großen Produktionsstandorten in Baden-Württemberg, die im Nutzfahrzeugsegment aktiv sind. Die Angaben wurden dabei aus der ORBIS-Unternehmensdatenbank gezogen und durch zusätzliche Angaben von den Unternehmenswebseiten sowie aus Geschäftsberichten und (IHK 2013) ergänzt. Die Zahlen spiegeln dabei jeweils die aktuellsten verfügbaren Angaben wider.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit beschränken sich die Analysen ausschließlich auf den Bereich der Produktion, da dieser zweifelsfrei recherchiert werden konnte. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Liste keinesfalls vollständig ist, sondern nur eine Auswahl darstellt, da eine Vielzahl von spezialisierten kleinen und mittelständischen Zuliefererbetrieben existiert, die nicht Teil dieser Analyse sind. Zudem weisen große Zulieferer, die in Baden-Württemberg über Werke verfügen, oft keine Kennzahlen für das Nutzfahrzeugsegment

aus, obwohl erkennbar ist, dass es substanziiell zum Umsatz beiträgt. Beispiele dafür sind Eaton oder MS Powertrain. Außerdem fehlen teilweise Angaben zu Arbeitsplätzen, die unmittelbar von der Herstellung von Nutzfahrzeugen abhängen (z. B. in der Forschung und Entwicklung oder im Bereich der Administration). Daher kann davon ausgegangen werden, dass z. B. die Zahl der Daimler-Angestellten in Baden-Württemberg, die dem Nutzfahrzeugsektor zugeordnet werden müssen, deutlich höher liegt als die in der Tabelle veranschlagten 3.800 Mitarbeiter aus den Werken in Mannheim und Gaggenau.

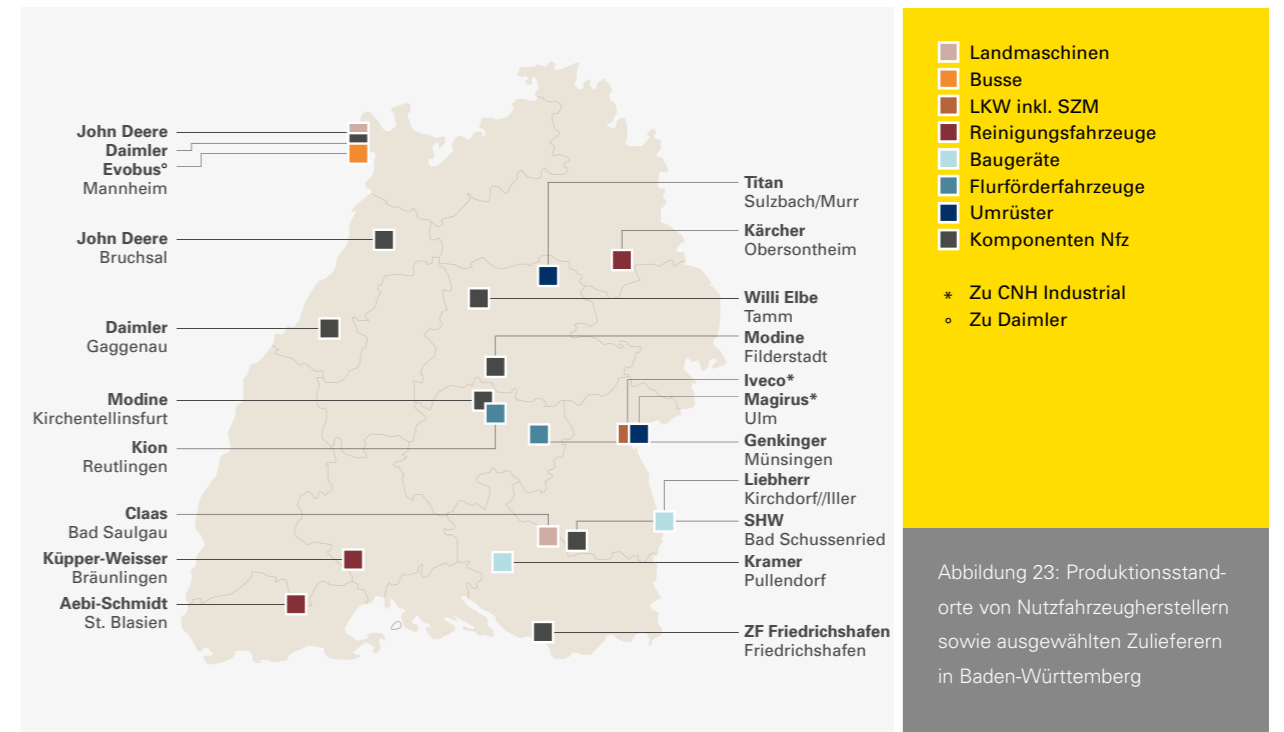
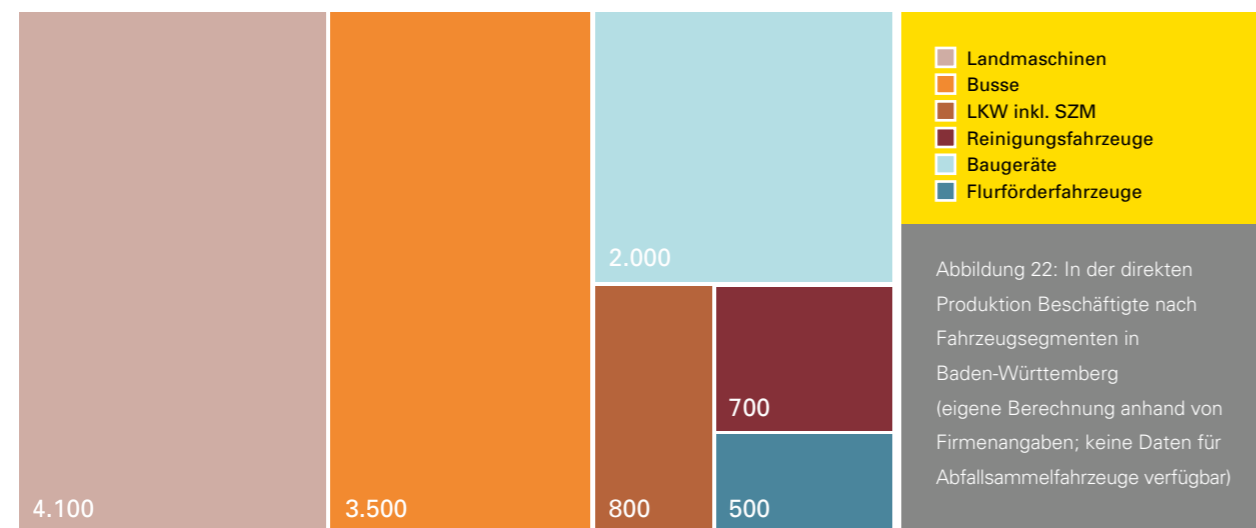
Unternehmen	Tätigkeitsfeld	Segmente	Umsatz in Mio. €		Mitarbeiter		Marken
			Weitweit	Davon Nutzfahrzeuge	Insgesamt	Davon BW	
ZF Friedrichshafen	Zulieferer	Sonstige	29.200	3.000	138.300	59 %	-
Deere	Umrüster	Flurförderzeuge	21.400	16.900	56.800	100 %	John Deere
Daimler AG	Hersteller	Baugeräte	153.300	37.400	282.500	4 %	Daimler Trucks, Evobus
CNH Industrial	Hersteller	Reinigungs-Fzg.	25.900	25.900	64.400	100 %	Iveco, Magirus
Liebherr	Hersteller	Landmasch./Trakt.	9.000	4.800	42.300	13 %	Liebherr
Claas Group	Hersteller	Busse	3.800	3.800	11.500	100 %	Claas
Wacker Neuson Group	Hersteller	LKW/SZM	1.400	1.100	4.600	90 %	Kramer, Weidemann
ASH Group	Hersteller	Sonstige	300	300	1.600	100 %	Aebi, Schmidt
Kion Group	Hersteller	Flurförderzeuge	5.600	5.200	30.500	100 %	Kion
Alfred Kärcher GmbH	Hersteller	Reinigungs-Fzg.	2.300	k.A.	11.900	3 %	Kärcher
Robert Bosch GmbH	Zulieferer	Landmasch./Trakt.	70.600	30.000	374.800	n.a.	-
Mahle Group	Zulieferer	Busse	12.300	<2.700	76.600	n.a.	-
Freudenberg Gruppe	Zulieferer	Reinigungs-Fzg.	6.400	<2.000	34.300	n.a.	-
EirringKlinger	Zulieferer	Landmasch./Trakt.	1.600	<1.300	8.600	n.a.	-
Modine	Zulieferer	Busse	1.200	400	7.100	n.a.	-

Tabelle 5: Bedeutende Firmen der Nutzfahrzeugproduktion in Baden-Württemberg (ORBIS-Datenbank; IHK und Unternehmensangaben)

Direkt mit der Herstellung der betrachteten Fahrzeugsegmente sind in Baden-Württemberg mehr als 11.600 Personen beschäftigt; das ist ca. jeder zwanzigste Arbeitnehmer in der Automobilindustrie in Baden-Württemberg. Hinzu kommt noch die Vielzahl von Beschäftigten bei Zulieferern – allein z. B. bei Bosch oder ZF Friedrichshafen mehrere Tausend Personen – und in verwandten Segmenten wie etwa in der Hauptverwaltung von Daimler oder bei Händlern und Werkstätten. Geht man beispielsweise davon aus, dass das Verhältnis von PKW zu LKW sich auch im Verhältnis der Kraftfahrzeugtechniker, die auf PKW bzw. LKW spezialisiert sind, widerspiegelt, so ist für Baden-Württemberg von etwa 500 weiteren Beschäftigten in LKW-Werkstätten auszugehen, wobei die dadurch zusätzlich generierten Arbeitsplätze in der Verwaltung oder bei verwandten Dienstleistungen noch gar nicht eingerechnet sind (ZDK 2016). Somit dürfte die Zahl der im Nutzfahrzeugsegment Beschäftigten insgesamt deutlich höher liegen. Außerdem schafft die Nutzfahrzeugindustrie in Bayern und Rheinland-Pfalz durch ihre unmittelbare Nähe zu Baden-Württemberg ebenfalls Arbeitsplätze für baden-württembergische Arbeitnehmer. So sind z. B. in den Daimler-Werken in Würth bzw. Neu-Ulm insgesamt ca. 10.800 Personen in der Herstellung von LKW und ca. 3.900 Personen in der Herstellung von Bussen beschäftigt, darunter auch Arbeitnehmer mit Wohnsitz in Baden-Württemberg. Die direkt in der Produktion in Baden-Württemberg Beschäftigten teilen sich wie in der Abbildung 22 dargestellt auf die einzelnen Segmente auf.

LKW inkl. SZM sind nur für ca. 7 % der direkt der Produktion von Fahrzeugen zugeordneten Arbeitsplätze in der baden-

württembergischen Nutzfahrzeugindustrie verantwortlich, da mit Daimler Trucks zwar der weltweit größte LKW-Hersteller seinen Hauptsitz sowie seine wichtigste Forschungseinrichtung in Baden-Württemberg hat, der bedeutendste Produktionsstandort jedoch in Rheinland-Pfalz liegt. Der Anteil des Segments LKW an der gesamten Wertschöpfung dürfte daher deutlich über 7 % liegen. Andere Segmente haben hingegen deutlich höhere Anteile an den in Baden-Württemberg direkt in der Produktion beschäftigten Mitarbeitern: So weisen die Herstellung von Bussen (ca. 30 % aller Beschäftigten), Reinigungsfahrzeugen (ca. 6 % aller Beschäftigten) und Flurförderzeugen (ca. 4 % aller Beschäftigten) höhere Beschäftigtenzahlen auf, als die Umsatzzahlen dieser Segmente für Deutschland erwarten lassen. Dies kann ein Zeichen der besonderen Kompetitivität des Standorts Baden-Württemberg in diesen Segmenten sein. Ebenfalls interessant ist, dass in der Herstellung von Landmaschinen ca. 36 % aller Beschäftigten in der Nutzfahrzeugherstellung in Baden-Württemberg arbeiten, was nur geringfügig weniger ist als der Anteil von Landmaschinen und Traktoren am Gesamtumsatz in Deutschland erwarten lässt. Dies ist bemerkenswert, da kein deutscher Traktorenhersteller seinen Stammsitz in Baden-Württemberg hat. Betrachtet man die Verteilung der wichtigsten Produktionsstandorte für Nutzfahrzeuge und -komponenten in Abbildung 23, so zeigt sich, dass die Schwerpunkte der baden-württembergischen Nutzfahrzeugindustrie im Regierungsbezirk Tübingen sowie in Mannheim liegen. Im Regierungsbezirk Stuttgart finden sich nur wenige Produktionsstätten, im Regierungsbezirk Freiburg nur zwei Hersteller von Reinigungsfahrzeugen.



Im Ergebnis ist der Nutzfahrzeugmarkt ein im Vergleich zum gesamten Fahrzeugmarkt zwar eher kleiner, aber durchaus relevanter ökonomischer Faktor für Baden-Württemberg. Dabei gibt es sowohl regionale Cluster, in denen Nutzfahrzeuge

eine überproportionale Bedeutung haben, als auch bestimmte Segmente, die in Baden-Württemberg stark vertreten sind (beispielsweise Reinigungsfahrzeuge). Die Herstellung von LKW spielt eine eher untergeordnete Rolle für das Land.

### Kernaussagen Kapitel 3

Die Heterogenität des Nutzfahrzeugsektors zeigt sich in Baden-Württemberg deutlich: Von den insgesamt 440.000 Nutzfahrzeugen handelt es sich lediglich bei etwa 80.000 um LKW und Sattelzugmaschinen. Der heutige Anteil alternativer Antriebe ist in nahezu allen Segmenten praktisch null. Lediglich Gabelstapler sind eine Ausnahme: Von ihnen sind bereits über 80 % elektrifiziert.

Bei der Fahrleistung sind LKW und Sattelzüge wenig überraschend das dominierende Nutzfahrzeugsegment. Bei der Mehrzahl der anderen Segmente existieren keine amtlichen Statistiken zu ihrer Fahrleistung; diese dürfte jedoch aufgrund der kurzen Fahrstrecken gering sein. Dies darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass selbst in einem quasi stationären

Betrieb aufgrund langer Betriebsdauern durchaus relevante Verbräuche und Emissionen entstehen.

95 % des Energieverbrauchs im Verkehrssektor basieren auf Erdöl. Damit einher gehen erhebliche Emissionen von Luftschadstoffen. Allein die Nutzfahrzeuge mit Straßenzulassung sind für etwa 20.000 t NO<sub>x</sub> und 1.000 t Feinstaub pro Jahr verantwortlich. Die anderen Nutzfahrzeugsegmente emittieren noch einmal ungefähr die gleichen Mengen an Schadstoffen. Nicht nur ökologisch, auch ökonomisch hat der Nutzfahrzeugbereich in Baden-Württemberg eine große Bedeutung: Allein in der direkten Produktion seiner Fahrzeuge sind fast 12.000 Arbeitsplätze im Bundesland verortet. Die bedeutendsten Segmente sind dabei neben LKW auch Landmaschinen und Busse.



**04**

**Gesetze und Regulierungen**



# 04

## Gesetze und Regulierungen



Auf die Frage, welche Antriebstechnologien in den jeweiligen Segmenten eingesetzt werden, hat neben der Verfügbarkeit und den Kosten auch der regulatorische Rahmen einen erheblichen Einfluss. Beim Betrieb von Fahrzeugen und Maschinen sind unterschiedliche Regelwerke zu beachten. Ziel der Studie ist es, die Unterschiede zwischen herkömmlichen Verbrennungsmotoren und alternativen Antrieben bei Gesetzen und Regulierungen zu betrachten. Daher werden all jene Rechtsbereiche, die unabhängig von der Antriebsart gültig sind (z. B. Führerscheinpflicht), nicht weiter betrachtet.

Emissionsbedingte Unterschiede bei den rechtlichen Rahmenbedingungen bestehen in folgenden Bereichen:

- Mautpflicht
- Steuerbelastung
- Ein- („Umweltzonen“) und Durchfahrtsbeschränkungen
- Grenzwerte Fahrzeugemissionen
- Lokale Grenzwerte am Arbeitsplatz und in geschlossenen Räumen

### 4.1 Mautpflicht

Seit der letzten Novelle im Jahr 2015 sind alle LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 7,5 t auf allen Bundesautobahnen und einzelnen Bundesstraßen mautpflichtig. Das letztlich zu zahlende Entgelt pro Kilometer wird jedoch nicht pauschal erhoben, sondern richtet sich nach Größe (= Achszahl) und Schadstoffklasse des Fahrzeugs, da in den Mautsätzen auch Kosten für Luftverschmutzung integriert sind (vgl. Tabelle 6). Dieser ökologische Aufschlag bleibt über die weitere Differenzierung nach Fahrzeuggröße konstant. Die Mautkategorie A entspricht der Euro-VI-Norm und beinhaltet daher auch elektrische und Brennstoffzellenantriebe. Eine explizite Begünstigung von Nullemissionsantrieben findet somit nicht statt.

So ist für einen LKW der höchsten Schadstoffklasse ungefähr ein doppelt so hoher Mautsatz wie für ein vergleichbares Fahrzeug der niedrigsten Klasse zu zahlen. Im Vergleich zu

Schadstoffklasse	Mautanteil für Luftverschmutzung	Gesamtmautsatz je Kilometer (2 Achsen)
A (Euro VI)	0,00 €	0,081 €
B (Euro V)	0,021 €	0,102 €
...	...	...
F (Euro I und 0)	0,083 €	0,164 €

Tabelle 6: Mautsätze (eigene Darstellung nach BMVI)

anderen europäischen Ländern mit streckenbezogener Maut sind die Tarife insgesamt als eher niedrig einzuschätzen. Die Begünstigung von Euro-VI-Fahrzeugen hingegen ist mit einem Mautsatz von weniger als 50 % des höchsten Tarifes in Deutschland vergleichsweise hoch. Eine besonders weitgehende explizite Begünstigung von Nullemissionsfahrzeugen findet sich in der Schweiz, wo diese Fahrzeuge von der ansonsten hohen „Leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe“ (LSVA) komplett ausgenommen sind.

Ab 2018 soll die Mautpflicht auf alle Bundesstraßen ausgeweitet werden. Eine weitere Anhebung der Tarife für emissionsintensive Fahrzeuge ist bislang nicht konkret vorgesehen, ist aber mittelfristig sehr wahrscheinlich. Zudem wird die Einführung einer PKW-Maut diskutiert, die auch Nutzfahrzeuge unter 7,5 t zGG betreffen würde. Diese Maut ist im Gegensatz zur LKW-Maut nicht fahrleistungsabhängig geplant, sondern als zeitliche Vignette vorgesehen. Interessant ist dabei, dass im § 2 des entsprechenden Infrastrukturabgabengesetzes (InfrAG 2017) all jene Fahrzeuge als Ausnahmen von der Maut befreit werden, die nicht Kfz-Steuerpflichtig sind (vgl. folgendes Kapitel). Dies würde neben Nutzfahrzeugen bestimmter Segmente auch alle rein elektrisch betriebenen Fahrzeuge umfassen. Der Einführungszeitpunkt der PKW-Maut ist aufgrund der anhängigen EU-Vertragsverletzungsverfahren derzeit noch nicht abzusehen.

### 4.2 Steuerbelastung

Nicht nur bei der Maut, auch bei der Kfz-Steuer werden schadstoffarme Fahrzeuge begünstigt. Die Kfz-Steuer ist für alle zulassungspflichtigen Fahrzeuge zu entrichten und bemisst sich bei LKW über 3,5 t zGG nach Gewicht und Schad-

stoffklasse (in Kombination mit der Geräuschkategorie). Zu beachten ist, dass mehrere Nutzfahrzeugsegmente generell von der Kfz-Steuer befreit sind, völlig unabhängig von ihrer Antriebsart. Dies betrifft insbesondere Linienbusse, Fahrzeuge in Straßenbau und -reinigung sowie land- und forstwirtschaftlich genutzte Fahrzeuge (vgl. § 3 Kraftfahrzeugsteuergesetz).

Die Begünstigung emissionsarmer Fahrzeuge fällt bei der Kfz-Steuer vergleichsweise gering aus. Nur besonders emissionsintensive Fahrzeuge (Euro 0) sind von massiven Aufschlägen von je nach Gewicht 100–300 % betroffen. Eine weitere Differenzierung zwischen Euro I und allen übrigen, besseren Emissionsklassen findet nur noch bei Fahrzeugen ab 14 t statt. Die Regelungen haben somit eher den Charakter einer Sanktionierung besonders emissionsstarker Fahrzeuge als einer „Begünstigung besonders sparsamer“. Reine Elektrofahrzeuge sind allerdings ab Erstzulassung generell für zehn Jahre von der Kfz-Steuer befreit. Nach Ablauf dieser Frist werden sie mit lediglich 50 % des Normsatzes besteuert. Diese Regelung gilt mittlerweile auch für Umrüstungen.

Die für 2018 vorgesehene De-facto-Verschärfung des Kfz-Steuergesetzes durch die Anwendung eines strengeren CO<sub>2</sub>-Prüfverfahrens betrifft in erster Linie PKW und ist für Nutzfahrzeuge kaum relevant. Weitere Änderungen der Kfz-Steuer sind aktuell nicht abzusehen. An dieser Stelle soll ebenfalls erwähnt werden, dass mit den Energiesteuer-Komponenten der Treibstoffe ein weiteres staatliches Instrument vorliegt, mit dem Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe genommen werden kann. Derzeit sind Diesel mit 47 ct/l und Benzin mit 65 ct/l besteuert. Gasförmige Kraftstoffe sind bislang von der Energiesteuer befreit, bei ihnen soll die Befreiung jedoch ab 2021 degressiv zurückgenommen werden.

Elektrischer Strom beinhaltet neben diversen regulatorischen Komponenten (EEG) auch die Stromsteuer von 2 ct/kWh.

### 4.3 Ein- und Durchfahrtsbeschränkungen

Neben monetären Steuerungsinstrumenten existieren auch restriktive Ansätze, die alternative Antriebe begünstigen. Ein insbesondere auch in Baden-Württemberg gängiges Instru-

ment sind die Umweltzonen, in denen Einfahrtsbeschränkungen für Fahrzeuge gelten, die nicht über eine Mindestabgasnorm und deren entsprechende Plakette verfügen. Grundlage der Zuteilung von Plaketten ist das Bundesimmissionschutzgesetz (BImSchG).

Nach Angaben des Umweltbundesamtes existierten Ende 2016 in Deutschland 54 Umweltzonen, eine weitere befindet sich in

Planung. Mit 21 (plus der geplanten in Balingen) ist fast die Hälfte davon in Baden-Württemberg verortet (vgl. Abbildung 24). Auch wenn die Kommunen selbst über die genaue Ausgestaltung der Einfahrtsbeschränkung entscheiden können, gilt in fast allen Umweltzonen die Stufe 3, die ausschließlich Fahrzeugen mit grüner Plakette die Einfahrt gestattet. Grüne Plaketten sind insbesondere bei konventionellen dieselbetriebenen Nutzfahrzeugen deutlich seltener als bei PKW, so dass die geltenden Regelungen schon heute vielen LKW die Einfahrt in die Städte verbieten.

schutzgesetz ersetzt. Dort ist die Nachtruhe von 22–6 Uhr definiert. In dieser Zeitspanne sind Ruhestörungen in Wohngebieten generell zu vermeiden. Dies bedeutet im Umkehrschluss jedoch, dass Vorgänge, die nicht als Lärmbelästigung wahrgenommen werden, nicht per se untersagt sind. Der Einsatz leiser Fahrzeuge bietet somit die Chance, z. B. auch während der Nachtruhe Lieferungen durchzuführen. Das Gleiche gilt im Prinzip auch für Müll- und Reinigungsfahrzeuge, sofern der Arbeitsvorgang ebenso leise gestaltet werden kann wie das Fahren selbst.

### 4.4 Grenzwerte Fahrzeugemissionen

Bei der Frage, welche Fahrzeuge überhaupt aktuell und künftig zugelassen werden dürfen, spielt die Festlegung der Obergrenzen für Fahrzeugemissionen durch die EU eine besondere Rolle. So ist seit 2014 Euro VI bei Neuzulassungen verpflichtend. Diese derzeit strengste Abgasnorm umfasst aber nicht nur alternative und damit lokal emissionsfreie Antriebe, sondern auch solche, die lediglich besonders schadstoffarm sind. Ab wann an dieser Stelle zumindest mittelfristig mit einer weiteren und somit strengeren Differenzierung in schadstoffarme und schadstoffneutrale Antriebe zu rechnen ist, lässt sich aus heutiger Sicht schwer einschätzen. Für „nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte“ ist die EU-Verordnung 2016/1628 relevant. Sie gibt die einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte für all jene motorgetriebenen Anwendungen vor, die nicht dem Verkehrszulassungsrecht unterliegen. Die dort definierte Klasse NRE umfasst „Motoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, die dazu bestimmt sind und dafür geeignet sind, sich – auf der Straße oder auf andere Weise – zu bewegen oder bewegt zu werden“. Somit erstreckt sie sich u. a. auf Bau- und Landmaschinen. Werden die definierten Grenzwerte von den Herstellern nicht eingehalten, so wird keine Typgenehmigung für den europäischen Binnenmarkt erteilt, die Voraussetzung für das Inverkehrbringen ist. Die seit 1. Januar 2017 gültigen Grenzwerte nehmen somit unmittelbaren Einfluss auf die am Markt verfügbaren Typen. Auch wenn hier eine schwächere Dynamik als bei den Straßenfahrzeugen festzustellen ist, ist mittelfristig dennoch mit weiteren sukzessiven Verschärfungen bis hin zu Nullemissionen zu rechnen. Durch die höhere Persistenz des Bestands der mobilen Maschinen werden sich diese Verschärfungen jedoch deutlich langsamer bemerkbar machen als bei den Straßenfahrzeugen.

Die baden-württembergische Landesregierung unterstützt die Einführung der blauen Umweltplakette (VM BW 2016). Diese Plakette wäre besonders emissionsarmen Fahrzeugen (Euro VI) vorbehalten und würde Kommunen in die Lage versetzen, die Einfahrtsbeschränkungen in ihre Umweltzonen noch erheblich zu verschärfen. Bezogen auf den aktuellen Fahrzeugbestand würde dies nahezu einem Einfahrtverbot für Nutzfahrzeuge gleichkommen. Gemäß KBA sind in Deutschland zum 1. Januar 2016 rund 81.000 LKW mit Euro-Klasse VI gemeldet; dies entspricht einem Anteil von weniger als 3 %. Auch wenn die Einführung einer blauen Plakette aktuell nicht abzusehen ist, werden lokale Einfahrtsbeschränkungen für Dieselfahrzeuge von einigen Städten aufgrund der anhaltenden Überschreitungen der NO<sub>x</sub>-Grenzwerte in Erwägung gezogen. Diese Überschreitungen haben in einigen Städten bereits zu EU-Vertragsverletzungsverfahren geführt, deren Konsequenzen heute noch nicht absehbar sind.

In einer zunehmenden Anzahl an Städten (in Baden-Württemberg aktuell fünf) bestehen darüber hinaus generelle Durchfahrtsverbote für Fahrzeuge über 3,5 t zGG. Da diese Restriktionen unabhängig von Emissionsklassen gelten, werden sie hier nicht weiter betrachtet.

Gerade im Bereich der städtischen Lieferverkehre werden aktuell besondere Begünstigungen für emissionsarme Nutzfahrzeuge diskutiert. Diese können z. B. spezielle reservierte Haltezonen oder die Nutzung reservierter Fahrspuren umfassen. Auch wenn bislang nur sehr vereinzelte Maßnahmen in der Erprobung sind, könnte hier in Zukunft ein auch ökonomisch relevanter Vorteil in bestimmten Nutzungssegmenten entstehen.

Ein weiterer regulativer Bereich des Stadtverkehrs ist in den nächtlichen Lärmschutzbestimmungen der Landesimmissionschutzgesetze geregelt. In Baden-Württemberg wird das Landesgesetz vollumfänglich durch das Bundesimmissions-

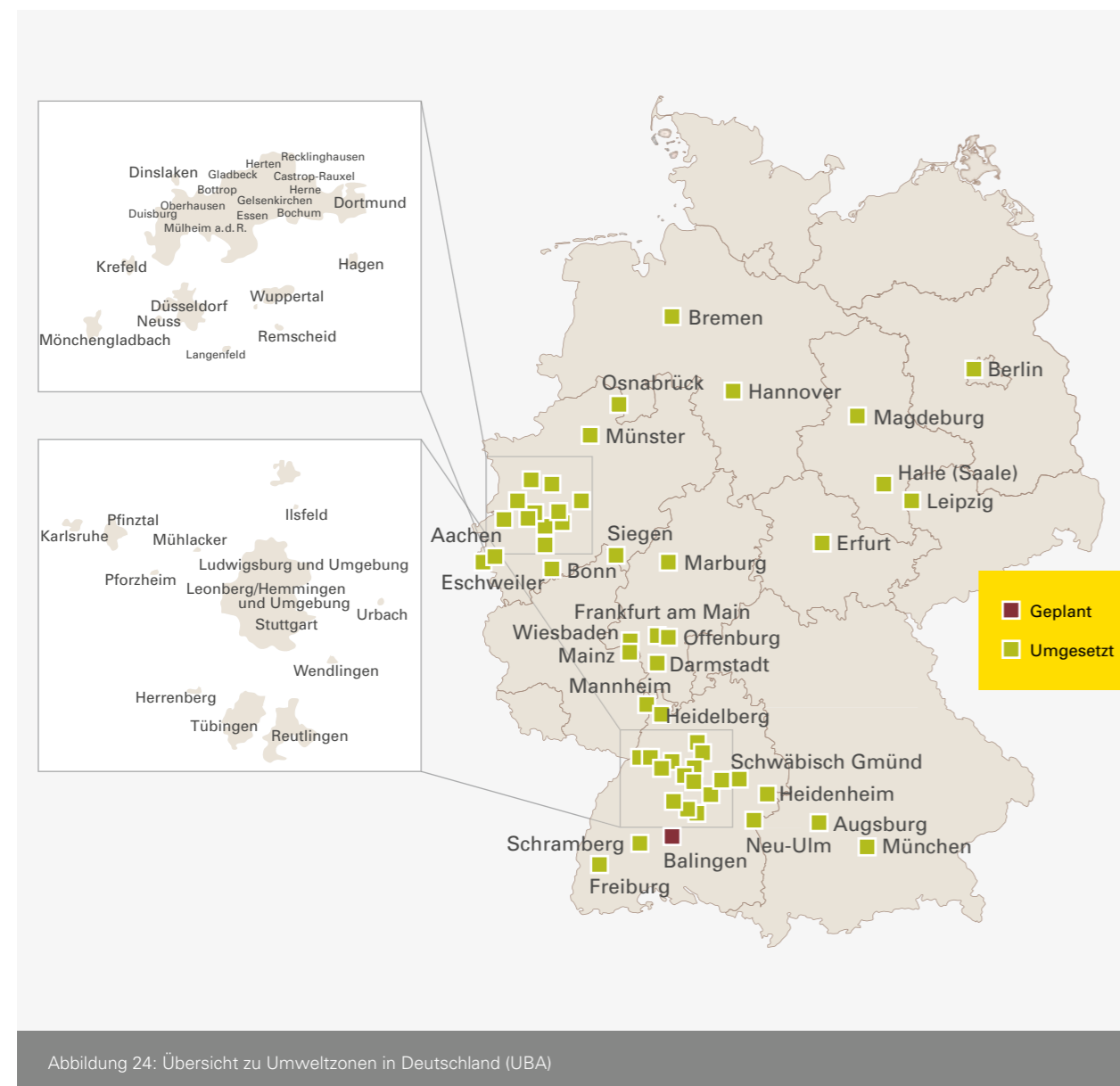


Abbildung 24: Übersicht zu Umweltzonen in Deutschland (UBA)

#### 4.5 Grenzwerte für geschlossene Räume

Eine unmittelbare Gefährdung durch Motorabgase beim Betrieb von Nutzfahrzeugen oder Arbeitsmaschinen mit Verbrennungsmotor besteht vor allem in ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereichen, in denen Arbeitskräfte berufsbedingt einer permanenten Abgasbelastung ausgesetzt sind. Die Gefährdung geht bei Dieselmotoren im Wesentlichen von den krebserzeugenden Dieselmotoremissionen und bei Benzinmotoren von den giftigen Kohlenmonoxid-(CO-)Emissionen aus.

Die hierbei maßgeblichen Regelungen zu Emissionsbegrenzungen ergeben sich aus Arbeitsschutzvorschriften zur Sicherstellung der Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten. Die Folge sind in der Regel deutlich strengere Anforderungen als die des Umweltschutzes. Die Reduzierung der Abgasemissionen von Fahrzeugen und Maschinen bis hin zum Ersatz durch emissionsfreie Antriebsalternativen ist in geschlossenen Arbeitsbereichen daher von besonderer Bedeutung. Die weite Verbreitung elektrischer Flurförderzeuge (siehe Kapitel 3.1) zeugt von der hohen Relevanz alternativer Antriebe in diesem Bereich. Wesentliche Rechtsgrundlage der Arbeitsschutzregelungen ist die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), die als grundlegende Anforderung ein Minimie-

rungsgebot enthält, wonach Maschinen und Geräte so auszuwählen und zu betreiben sind, dass möglichst wenige Emissionen freigesetzt werden. Die Konkretisierung der allgemeinen Vorschriften der GefStoffV und ihre Umsetzung in die betriebliche Praxis erfolgt durch „Technische Regeln für Gefahrstoffe“ (TRGS). Relevant sind hier insbesondere die TRGS 554 „Abgase von Dieselmotoren“ und die TRGS 900 „Arbeitsplatzgrenzwerte“.

In der TRGS 554 werden u. a. Schutzmaßnahmen und Einsatzbeschränkungen für den Betrieb dieselbetriebener Fahrzeuge in geschlossenen Arbeitsbereichen aufgeführt. Darunter fallen neben Hallen auch Tunnel oder Bergwerke sowie Betriebsbereiche wie Laderampen. Soweit möglich, sind in diesen Bereichen dieselgetriebene Fahrzeuge oder Flurförderzeuge durch schadstofffreie Antriebstechniken wie Elektroantriebe zu ersetzen. Entstehende Dieselmotoremissionen sind durch die Verwendung von schadstoffarmen Motoren bzw. modernen Dieselpartikelfiltern (Abscheiderate >90 %) und/oder die Erfassung und Absaugung der Abgase zu vermindern. Ausgenommen hiervon sind lediglich Fahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse bis 3,5 t, die mindestens der Abgasnorm Euro 5 entsprechen. Die konkret anzuwendenden Maßnahmen richten sich jeweils nach der vorzunehmenden Gefährdungsbeurteilung.

Für untertägige Arbeitsbereiche sind zudem Mindestanforderungen an die Frischluftzufuhr (erforderliche Wettermenge) festgelegt. Für Bauarbeiten unter Tage beträgt diese z. B. 4 m<sup>3</sup>/min je eingesetztem kW Nennleistung. Zudem müssen alle mit Dieselmotor betriebenen Geräte mit einem Dieselpartikelfilter (DPF) ausgestattet sein.

Dies gilt ebenfalls für in Hallen eingesetzte dieselbetriebene Geräte (z. B. Stapler, Radlader). Auch hier ist für eine ausreichende Lüftung zu sorgen, wobei Ladehallen mit installierter raumlufttechnischer Anlage den Stand der Technik darstellen (BGL 5138). Bei Neubauten sind die Ladestellen so zu gestalten, dass die Abgasemissionen der Lieferfahrzeuge im Bereich der Auspufföffnungen erfasst und abgeführt werden.

Als problematisch erweisen sich kleine dieselbetriebene Maschinen unter 19 kW, für deren Einsatz im Außenbereich bislang keine Abgasgrenzwerte gelten. Bei ihrem Einsatz in geschlossenen Räumen sind jedoch auch bei diesen die Arbeitsschutzvorschriften der TRGS 554 zur Minimierung der Dieselmotoremissionen zu beachten, die in der Regel nur mit Dieselpartikelfiltern eingehalten werden können (Ziegler et al. 2015). Diese sehr unterschiedlichen Anforderungen werden mit der neuen Stufe V der EU-Verordnung 2016/1628 (siehe vorheriger Abschnitt) angeglichen, da gemäß dieser bei der Neuzulassung auch solcher kleiner Motoren ab 2019 entsprechende Grenzwerte einzuhalten sind.

Während für Dieselmotoremissionen aufgrund ihrer krebserzeugenden Wirkung kein toxikologisch unbedenklicher Grenzwert festgelegt werden kann, werden in der TRGS 900 Arbeitsplatzgrenzwerte für zahlreiche Stoffe festgelegt. Hinsichtlich der Abgase aus Verbrennungsmotoren sind hier Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Kohlenwasserstoffverbindungen (HC) relevant. Dabei sind insbesondere die CO-Emissionen von benzinbetriebenen Maschinen problematisch, da diese immer wieder zu CO-Vergiftungen mit teilweise tödlichem Ausgang führen (BG Bau 2015). Bei Arbeiten in geschlossenen Räumen sind daher Gas- oder Elektroantriebe zu verwenden oder die Geräte zwingend mit einem Katalysator auszurüsten (Ziegler et al. 2015). Analog zu Dieselmotoremissionen können weitere Schutzmaßnahmen wie die Absaugung der Motorabgase am Auspuff oder die technische Belüftung des Arbeitsbereiches erforderlich sein.

Im Mai 2016 wurde durch den Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) eine deutliche Reduzierung der Arbeitsplatzgrenzwerte



für Stickoxide beschlossen und die TRGS 900 entsprechend angepasst. Besonders im Untertagebau, wo Sprengemissionen zusätzlich zur NO<sub>x</sub>-Belastung beitragen, ist die Einhaltung der neuen Grenzwerte aktuell nicht möglich und erfordert eine umfassende Emissionsreduktion beim Maschinenpark; hier wurde eine Übergangsfrist bis zum 31. Oktober 2021 eingeräumt. Allein mit Abgasnachbehandlungstechnologien und Belüftungsverfahren entsprechend dem verfügbaren Stand der Technik sind die verschärften Vorgaben evtl. nicht zu erreichen (Spod 2015). Neben besonders schadstoffarmen Dieselmotoren wird daher der Einsatz batterieelektrischer Antriebe für verschiedene Fahrzeugtypen geprüft und z. B. bei einem Befahrungsfahrzeug erprobt (Kübler et al. 2016). In Tunnelbaustellen werden vergleichbare NO<sub>x</sub>-Expositionen wie in Bergwerken gemessen (Spod 2015). Dies kann dazu führen, dass auch bei neu zugelassenen Fahrzeugen mit EURO VI die neuen TRGS-Grenzwerte nur mit direkt angeschlossener Abgasabsauganlage eingehalten werden können (asp 2017). Für die Bereiche konventioneller Tunnelbau und geschlossene Arbeitsbereiche Bau endet die Übergangsfrist am 31. Oktober 2017.

Der Einsatz von emissionsfreien Antrieben in geschlossenen Räumen kann zu deutlichen Kosteneinsparungen führen. Insbesondere wird der Belüftungsbedarf erheblich reduziert, da der Frischluftbedarf beim Einsatz dieselbetriebener Motoren wesentlich durch die notwendige Abführung der Dieselmotor-emissionen bestimmt wird. So belüftet sich beim Bau des Steinbühltunnels als Teil der ICE-Neubaustrecke Stuttgart–Ulm der Frischluftbedarf für eine Tunnelröhre bei 20 Arbeitern auf knapp 0,7 m³/s und damit auf unter 1 % des Gesamtlüftungsbedarfs von 92 m³/s, der durch acht Maschinen mit insgesamt 1.374 kW Nennleistung bestimmt wird (Esslinger et al. 2015). Zur Belüftung werden hier fünf Ventilatoren mit insgesamt 960 kW Leistung eingesetzt.<sup>8</sup> Für die Bauarbeiten, die rund um die Uhr laufen, werden insgesamt 5,5 Jahre veranschlagt (Steibadler 2013). Bei einem Strompreis von 4 ct/kWh lassen sich überschlägig Kosten von bis zu 336.000 €/a für die Belüftung abschätzen, die sich im Wesentlichen durch den Einsatz dieselbetriebener Baumaschinen ergeben.

Bei emissionsfreien Antrieben entfallen auch die Kosten für die Nachrüstung und Regeneration von Partikelfiltern. Die Investition zur Nachrüstung beläuft sich je nach Leistungsklasse und Anwendungsbereich auf 3.000–15.000 € pro Maschine.

Hinzu kommen rund 300–800 € für die Filterregeneration, die systemabhängig etwa alle 1.000–3.000 Betriebsstunden durchgeführt werden muss (HDB et al. 2013; Lüddemann 2011; GREENCAR 2017).

Auch sind die Betriebskosten der elektrischen Antriebe selbst in der Regel geringer, da die aufwändige Wartung und Überprüfung der Dieselmotoren entfällt und im Fall der batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeuge ihre Energiekosten bereits heute niedriger sind. Im Falle des Wasserstoffes hängen die Kosten von der Herstellungsrouten ab. Bereits heute kann Wasserstoff so günstig bereitgestellt werden, z. B. als Nebenprodukt aus der großtechnischen Chlor-Alkali-Elektrolyse, dass die Energiekosten zumindest vergleichbar mit dieselangetriebenen Nutzfahrzeugen sind bzw. schon heute niedriger ausfallen können (EA.NRW 2013; HyCologne/RVK 2016).

Ein weiterer positiver Zusatzeffekt ist, dass die elektrischen Motoren deutlich leiser sind, was besonders in geschlossenen Räumen das Arbeitsklima stark verbessert. Außerdem entsteht kaum Motorabwärme, die unter Umständen ebenfalls abgeführt werden muss.

#### Kernaussagen Kapitel 4

Eine Vielzahl regulatorischer Instrumente differenziert nach den Emissionen der Fahrzeuge und bietet somit Vorteile für Fahrzeuge mit niedrigen Emissionen. Diese Vorteile sind monetäre Boni bei Steuern und Maut sowie Ausnahmen von Restriktionen (Einfahrverboten). Weiterhin bestehen bei Zulassung und Betrieb von Nutzfahrzeugen Grenzwerte beim Schadstoff-

ausstoß. Allerdings werden BEV und FCEV von fast allen diesen Instrumenten bislang ebenso behandelt wie besonders emissionsarme Dieselfahrzeuge (EURO VI). Somit fehlen hier Anreizsysteme, um BEV und FCEV im Wettbewerb mit Verbrennungsmotoren zu stärken.

<sup>8</sup> | Nicht berücksichtigt sind hierbei zwei Ventilatoren zur Absaugung von Sprenggasen.

# Publikationen der e-mobil BW



Wissenstransfer leicht gemacht – alle unsere Studien rund um die Themen Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie sowie Broschüren, Flyer und weitere Veröffentlichungen stellen wir kostenlos als PDF oder als E-Paper zur Verfügung. [www.e-mobilbw.de](http://www.e-mobilbw.de) (Service/Publikationen)





**05**

**Eignung der Antriebskonzepte  
für verschiedene  
Nutzfahrzeugsegmente**

# 05

Eignung der Antriebskonzepte für verschiedene Nutzfahrzeugsegmente



Brennstoffzellen-Antrieb



Elektrischer Antriebsstrang aus Batterie und E-Maschine

Bevor konkrete Beispielrechnungen für Lebenszykluskosten (Kapitel 6) und den Energie- und Ressourcenverbrauch (Kapitel 7) verschiedener Varianten vorgenommen werden, sind zunächst auch all jene Faktoren zu beleuchten, die sich einer reinen Kostenbetrachtung entziehen und dennoch einen großen Einfluss auf die Einsatzfelder und Akzeptanz von Nullemissionsantrieben aufweisen. Dabei handelt es sich um Fragen zur Praxistauglichkeit und zu positiven wie negativen Effekten von Nullemissionsantrieben in ihren spezifischen Anwendungsbereichen im Vergleich zu konventionellen Dieselfahrzeugen.

Auch wenn einige Vor- und Nachteile sich unmittelbar aus den technischen Spezifikationen der Fahrzeuge ergeben, so dürfen die zum Teil sehr speziellen Anforderungen der einzelnen Einsatzbereiche nicht außer Acht gelassen werden. Um diese gebührend erfassen zu können, wurden im Projekt Expertengespräche sowohl mit Herstellern als auch mit Anwendern von Nutzfahrzeugen geführt, die die aus ihrer Sicht rele-

vantesten Chancen und Hemmnisse beim Einsatz von BEV- und FCEV-Fahrzeugen darstellen sollten. Mit Mitarbeitern folgender Institutionen konnten dazu Interviews geführt werden:

Funktion	Institutionen
Hersteller LKW	Daimler
Hersteller Traktoren	John Deere
Hersteller Busse	EvoBus
Hersteller Baumaschinen	Liebherr
Hersteller Abfallsammelfahrzeuge	FAUN
Nutzer LKW	Verband Spedition und Logistik Baden-Württemberg
Nutzer Baumaschinen	Salzbergwerk Stetten
Umrüster LKW	H2Energy

Tabelle 7: Übersicht Interviewpartner Expertengespräche

Im Rahmen der Expertengespräche konnten neben den Kosten mehrere Kernbereiche identifiziert werden, die einen hohen Einfluss darauf haben, ob und inwieweit Nullemissionsfahrzeuge als praktikable Alternative zum Diesel akzeptiert werden. Diese sollen im Folgenden schlaglichtartig diskutiert werden. Zu beachten ist dabei, dass die Aussagen die subjektiven Erfahrungen der Interviewpartner widerspiegeln und daher nicht den Anspruch auf allgemeine Gültigkeit erheben können.

## 5.1 Reichweite/Betriebsdauer

Aufgrund der bislang immer noch nicht befriedigenden Energiedichte von Batterien sind ausreichende Ladekapazitäten nur durch den Einsatz von Batterien mit großem Gewicht möglich. Da dies in vielen Anwendungsbereichen nicht akzeptabel ist (s. u.), müssen Nutzer geringere Reichweiten und kürzere Einsatzzeiten von BEV im Vergleich zu Dieselantrieben hinnehmen.

Dies führt dazu, dass sich der Einsatz batterieelektrischer Antriebe bei LKW bislang auf den Nahverkehr mit Tourenlängen <150 km beschränkt. Längere Touren erfordern in der Regel ein Nachladen der Batterie. Ein Einsatz von BEV ist theoretisch auch bei diesen Touren möglich, sofern sie feste Verläufe (Linien oder Rundtouren) darstellen, bei denen zwischen durch verlässlich auf Ladeinfrastruktur mit angemessener Ladegeschwindigkeit zurückgegriffen werden kann. Im Fern- und Schwerlastverkehr sowie bei Touren mit hoher Flexibilität und kurzen Haltephasen scheiden BEV bislang als Alternative aus.

Auch im Bereich der Müllfahrzeuge besteht die geschilderte Problematik der Reichweite, die das Einsatzgebiet der Fahrzeuge limitiert. Herkömmliche Müllfahrzeuge sind so in Touren eingebunden, dass sie pro Tour etwa 10 t Abfall sammeln und zurück zur Deponie oder Verbrennungsanlage bringen können. Die dafür zu fahrende Strecke ergibt sich aus der Siedlungsdichte und der Entfernung zur Sammelstelle. Demnach sind reine BEV bislang nur in Kernstädten und im unmittelbaren Umfeld von Sammelstellen einsetzbar, wo Tourenlängen nicht mehr als 30 km betragen. Für längere Touren kommen als Dieselalternative nur BEV-H<sub>2</sub>-Hybride infrage. Bei Bau- und Landmaschinen besteht eine sehr ähnliche Problematik, auch wenn sie sich hier nicht in der Reichweite, sondern in der möglichen Betriebszeit äußert. Bislang sind für Batterien mit einem akzeptablen Gewicht acht Stunden Betrieb am Stück kaum zu gewährleisten. Somit entsteht die

Notwendigkeit, während eines Arbeitstages eine Nachladephase zu etablieren. Diese Problematik nimmt mit Größe und Leistung der Fahrzeuge und Maschinen zu. Potenzielle Anwendungsfelder bestehen demnach heute bereits überall dort, wo die Fahrzeuge und Maschinen vergleichsweise klein sind und nur zyklisch mit ausreichenden Ladephasen eingesetzt werden.

Demnach stellt die geringe Energiedichte heutiger Batterien in vielen unterschiedlichen Nutzfahrzeugsegmenten eine erhebliche Einschränkung des Betriebs dar. Diese Problematik ist bei FCEV kaum vorhanden: Durch die höhere Energiedichte ist es möglich, Fahrzeuge über Streckenlängen und Einsatzzeiten zu betreiben, die keine Einschränkung gegenüber Dieselfahrzeugen darstellen. Zudem entfallen lange Ladezeiten der Batterien. Brennstoffzellenfahrzeuge können vergleichbar schnell aufgetankt werden wie Dieselfahrzeuge.

## 5.2 Nutzlast

Wie bereits geschildert, sind akzeptable Reichweiten und Einsatzdauern bei BEV nur durch hohe Batteriegewichte zu „erkaufen“. Bei LKW ist dies jedoch gleichbedeutend mit einer verringerten Nutzlast. Der E-Truck von Daimler weist beispielsweise 0,7 t weniger Nutzlast auf als sein Dieselpendant, was einen erheblichen wirtschaftlichen Nachteil bedeuten kann.<sup>9</sup>



<sup>9</sup> | Diesem Nachteil wird z. B. in der Schweiz Rechnung getragen, indem schwere Nutzfahrzeuge mit alternativem Antrieb bis zu einer Tonne schwerer sein dürfen, um das höhere Gewicht des alternativen Antriebs auszugleichen. Das Höchstgewicht ist jedoch weiterhin auf 40 t beschränkt, sodass Nullemissions-LKW mit 40 t zGG nicht von der Regelung profitieren.

Bei Land- und Baumaschinen ist der Nachteil der großen Batteriegewichte weniger gravierend. Zwar entstehen auch hier beim Einsatz in bestimmtem Gelände Probleme durch zu hohe Batteriegewichte, aber bis zu einer Leistung von etwa 250 PS werden die größeren Gewichte als unproblematisch angesehen. Es ist auch festzuhalten, dass in bestimmten Anwendungen, insbesondere bei Baumaschinen (z. B. mobile Kräne, Walzen) und Flurförderzeugen (Gabelstapler und Schlepper) größere Gewichte zur Stabilisierung beitragen und daher sogar von Vorteil sein können.

Ähnlich wie bei der Reichweite beziehen sich diese Einschätzungen lediglich auf BEV, da sie für FCEV nicht relevant sind.

### 5.3 Lokale Emissionsfreiheit

Die lokale Emissionsfreiheit von BEV und FCEV ist nicht nur ökologisch relevant, sondern ermöglicht auch ihren Einsatz in besonders sensiblen Umgebungen wie Innenstädten oder geschlossenen Räumen (siehe Kapitel 4.5), was bei einer Gesamtbetrachtung durchaus relevant sein kann.

In den letzten Jahren zeigt sich, dass Kommunen (insbesondere in Baden-Württemberg) zunehmend restriktive Maßnahmen gegen Fahrzeuge mit hohen Emissionswerten ergreifen. Beste Beispiele dafür sind die Umweltzonen und die örtlichen Durchfahrtsbeschränkungen (s. Kapitel 4.3). Für LKW mit hohen Emissionswerten sind diese Restriktionen gleichbedeutend mit geografisch begrenzten Verbotszonen, die in Umwegen oder gar einer Unerreichbarkeit von Zielen resultieren. Beide Effekte können so schwer wiegen, dass der Einsatz alternativer Antriebe quasi zwingend wird. Einen deutlichen Hinweis darauf liefern die Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP), die ihre vergleichsweise leichten Fahrzeuge in großen Stückzahlen auf elektrische Antriebe umrüsten, da sie offenbar damit rechnen, dass Innenstadtbereiche für Dieselfahrzeuge künftig nicht mehr befahrbar sein werden.

Nicht zu unterschätzen ist zudem die Möglichkeit, dass Nullemissionsantriebe künftig auch nächtliche Lieferkonzepte in Innenstädten ermöglichen könnten: Anwohner wären deutlich weniger Lärm ausgesetzt, sofern auch Be- und Entladung geräuscharm vollzogen werden können. Nachtlieferungen sind wirtschaftlich deshalb interessant, weil sie außerhalb der Verkehrsspitzen sehr effizient und zügig abgewickelt werden können. Hintergrund der geschilderten kommunalen restriktiven Maßnahmen sind u. a. die drohenden EU-Vertragsverletzungsverfahren. In diesem Kontext ist auch damit zu

rechnen, dass Kommunen ihre eigenen Flotten sukzessive auf Nullemissionen umstellen werden. Dies betrifft insbesondere Reinigungs- und Müllfahrzeuge sowie Fahrzeuge und Maschinen zur Grünpflege. Auch im kommunalen Umfeld werden dadurch Potenziale für nächtliche Prozesse eröffnet, die insbesondere im Bereich der Müllfahrzeuge erhebliche Entlastungen im Betriebsablauf erwarten lassen.

Zuletzt lohnt sich ein Blick auf die Baumaschinen. Generell sollte damit gerechnet werden, dass schon allein aus Gründen des Arbeitsschutzes die zulässigen Grenzwerte sukzessive gegen null gesenkt werden. Betreiber der Fahrzeuge und Maschinen werden dadurch zunehmend in die Pflicht genommen, entweder durch Abgasreinigungen oder durch andere Technologien (Belüftungssysteme) für eine ausreichende Frischluftzufuhr zu sorgen. Beide Varianten funktionieren in manchen Anwendungsfeldern (v. a. in geschlossenen Räumen) nur in Kombination und stellen jeweils signifikante Kostenblöcke dar. Dies gilt in besonderem Maße für Bergwerke, da hier eine erhöhte Frischluftzufuhr zu steigender Feuchtigkeit führt, die wieder mit anderen Technologien gesenkt werden muss. Im Segment der Baumaschinen machen Nullemissionsantriebe also bestimmte kostenintensive Technologien entbehrlich und können dadurch Mehrkosten kompensieren.



Emissionsfreie Logistik ist nachgefragt

### 5.4 Infrastruktur

Sowohl BEV als auch FCEV benötigen eine eigene Infrastruktur zum Laden bzw. Tanken. Da diese öffentlich bislang nur unzureichend verfügbar ist, müssen die Betriebe sie in der Regel selber zur Verfügung stellen. Abgesehen von den Kosten entstehen dabei auch organisatorische Herausforderungen.

So sind nicht alle Betriebe unmittelbar in der Lage, die nötige Infrastruktur zu schaffen. Ist eine entsprechend hohe Anschlussleistung für die benötigte Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof vorhanden? Oder ist schlichtweg ausreichend Platz an der erforderlichen Stelle (z. B. im Busdepot) vorhanden? Schon allein diese Hindernisse können aus betriebsindividueller Sicht nur schwer überwindbar sein.

Darüber hinaus muss gewährleistet sein, dass die räumliche Verteilung der Infrastruktur mit den Einsatzgebieten der Fahrzeuge abgestimmt ist: So sind LKW-Touren und Busrouten so zu planen, dass die vorhandene Infrastruktur berücksichtigt wird. Eine besondere Herausforderung besteht bei Baumaschinen, die an örtlich wechselnden Baustellen eingesetzt werden. Hier gibt es bislang kein funktionierendes Konzept, wie diese Fahrzeuge mit mobiler Infrastruktur direkt am Einsatzort versorgt werden könnten.

### 5.5 Lebensdauer der Flotten

Selbst wenn praxistaugliche Lösungen vorhanden sind, setzen sie sich nur langsam im Bestand durch, da Nutzer in der Regel erst dann über einen Antriebswechsel nachdenken, wenn ohnehin eine Erneuerung der Flotte ansteht. Manche Segmente des Nutzfahrzeugmarktes weisen derart lange Fahrzeughaltedauern auf (v. a. Land- und Forstwirtschaft), dass sich hier eine Umstellung auf Nullemissionsantriebe nur sehr langsam vollziehen wird.

Damit verknüpft ist auch ein Problem, dem sich die „early adopter“ stellen müssen: Es existiert bislang kein funktionierender Gebrauchtmittelmarkt und dieser wird auch noch lange für seine Entwicklung brauchen. Da also ein Halter eines Nullemissionsfahrzeugs nicht damit rechnen kann, nach Außerdienststellung des Fahrzeugs einen akzeptablen Wiederverkaufspreis zu erzielen, muss er den Wertverlust deutlich gravierender bewerten als bei einem Dieselfahrzeug. Diese Tatsache stellt ein weiteres Hindernis dar, das auch dadurch verstärkt wird, dass große Teile der ausgemusterten Nutzfahrzeuge bislang ins Nicht-EU-Ausland exportiert werden, wo die Nachfrage noch deutlich geringer eingeschätzt werden muss.



Ein gutes Infrastrukturnetz ist entscheidend für den Erfolg emissionsfreier Antriebe

### 5.6 Wartung

Zwar sind BEV und FCEV in der Wartung kostengünstiger als Dieselfahrzeuge, dafür kann diese jedoch nur von geschulten Elektrofachkräften für Hochvolt-Systeme durchgeführt werden. Sofern kein eigenes entsprechend qualifiziertes Personal vorhanden ist, kann die Wartung daher (zumindest heutzutage) nur von spezialisierten Unternehmen vorgenommen werden. Damit begeben sich die Anwender in eine Abhängigkeit, die ein nicht zu unterschätzendes Risiko birgt. Diese Gefahr wird auch dadurch vergrößert, dass es sich bei den Herstellern dieser Fahrzeuge zum Teil um relativ kleine Anbieter handelt, in die gerade Anwender aus zeitkritischen Segmenten (Speditionen) offenbar nur begrenztes Vertrauen bei Wartung und Reparatur haben. Hier scheint bislang die Sorge zu überwiegen, dass bei einem Defekt Fahrzeuge auf unabsehbare Zeit ausfallen könnten.

An diesem Punkt muss jedoch kritisch entgegengehalten werden, dass es ohnehin einen starken Trend dazu gibt, Fahrzeuge von externen Dienstleistern zu beziehen, die auch für Wartung und Reparatur zuständig sind. Betriebsinterne Reparaturen verlieren dadurch an Bedeutung und werden auch bei konventionellen Antrieben bereits oftmals an spezialisierte Betriebe ausgelagert.

### 5.7 Sicherheit

In den Experteninterviews zeigte sich, dass insbesondere in sensiblen Arbeitsbereichen Sicherheitsbedenken gegenüber den Technologien bestehen. So wird Wasserstoff wegen der potenziellen Explosionsgefahr unter Tage und im Umfeld bestimmter Baustellen als Alternative ausgeschlossen. In diesen Bereichen sind auch durchaus elektrische Varianten schwerer Maschinen und Fahrzeuge mit Oberleitungen oder Kabel bekannt; hier bestehen allerdings aufgrund der hohen Spannungen subjektive Sicherheitsbedenken. Diese dürften jedoch primär der mangelnden Vertrautheit mit diesen Technologien geschuldet sein, als dass es sich hier um reale Gefahrenquellen handelt.

### 5.8 Auswahl besonders potenzialreicher Beispielsegmente

Vor dem Hintergrund dieser Diskussionen wird an dieser Stelle der Versuch unternommen, eine qualitative Übersicht zur Eignung der beiden Antriebsvarianten in den einzelnen Segmenten zu geben (Tabelle 8).

Fahrzeugkategorie	Eignung BEV	Eignung FCEV
Schwere Transporter	+	o
Mittlere LKW	+	o
Schwere LKW im Verteilerverkehr	+	+
Sattelzugmaschinen im Fernverkehr	-	+
Stadtbusse	o/+	+
Land- und forstwirtschaftliche Maschinen	-	o
Baugeräte	-/+*	-/+*
Abfallsammelfahrzeuge	o	+
Flurförderzeuge	+	+
Reinigungsfahrzeuge	+	+

Tabelle 8: Qualitative Eignung von BEV und FCEV für verschiedene Nfz-Segmente. \*Je nach Einsatzbereich

In Vorbereitung der Beispielrechnungen in den Kapiteln 6 und 7 sollten fünf Beispielfälle ausgewählt werden, in denen in einzelnen Segmenten dem herkömmlichen Dieselfahrzeug eine Nullemissionsvariante gegenübergestellt wird. Diese Beispielfälle sollten zwei Ansprüche erfüllen:

- Das Spektrum der Nutzfahrzeuge und ihrer Einsatzbereiche sollte möglichst umfassend abgebildet werden.
- Für die Beispielfahrzeuge sollte jeweils die Nullemissionsalternative gewählt werden, die am realistischsten ist.

Um diesen Ansprüchen zu genügen, wurden fünf Vergleichsfälle ausgewählt, siehe Tabelle 9.

Realitätsnahe Berechnungen der Kosten und Umwelteffekte sind nur möglich, wenn die beiden Vergleichsfahrzeuge möglichst detailliert spezifiziert werden. In Tabelle 10 sind die grundlegenden Fahrzeugdaten und Annahmen hinsichtlich Verbrauch und Reichweite der Vergleichsfahrzeuge zusammengefasst.

Fahrzeugkategorie	Konventioneller Antrieb	Emissionsfreier Antrieb
Schwere Transporter	Diesel	Batterieelektrisch
Schwere LKW	Diesel	Brennstoffzelle
Stadtbusse	Diesel	Brennstoffzellen-Range-Extender
Radlader	Diesel	Batterieelektrisch
Abfallsammelfahrzeuge	Diesel	Brennstoffzellen-Range-Extender

Tabelle 9: Beispielsegmente und betrachtete Antriebsvarianten

Nutzfahrzeugsegment	Schwerer Transporter		Schwerer LKW		Stadtbus		Abfallsammelfahrzeug		Radlader	
	Diesel	BEV	Diesel	BZ	Diesel	BZ-REX	Diesel	BZ-REX	Diesel	BEV
(Zul.) Ges.-Gew. (t)	7,5	7,5	34	35	19	19,5	26	27	6,14	6,63
Fzg.-Leergewicht (t)	3,5	3,9	17,3	19,8	11	13,2	13,3	13,8	3,8	4,1
Batteriekapazität (kWh)	-	82,8	-	120	-	250	-	85	-	39,6
Antriebstechnologie	Verbrennungsmotor (VM)	Batterieelektrisch	VM	Brennstoffzelle (BZ) + Batterie (ohne Plug-in)	VM	BZ + Batterie	VM	BZ + Batterie	VM	Batterieelektrisch
Leistung (kW)	110	115	320	100 + 195 (BZ+E-Motor)	220	30 + 160 (BZ+E-Motor)	220	30 + 170 (BZ+E-Motor)	35	15 + 22 (Fahren + Hydraulik)
Gewicht (kg)	285	201	650	614 + 340 (BZ+E-Motor)	1.000	181 + 2*210 (BZ+E-Motor)	650	181 + 455 (BZ+E-Motor)	210	84
Energiespeicher	Dieseltank	Li-NMC	Dieseltank	H <sub>2</sub> 350 bar Typ 3/ Li-NMC	Dieseltank	H <sub>2</sub> 350 bar Typ 3/ Li-NMC	Dieseltank	H <sub>2</sub> 350 bar Typ 3/ Li-NMC	Dieseltank	Blei-Säure
Kapazität	100 l	83 kWh	400 l	70 kg H <sub>2</sub> / 120 kWh	215 l	15 kg H <sub>2</sub> / 250 kWh	200 l	16 kg H <sub>2</sub> / 85 kWh	60 l	40 kWh
Gewicht Energiespeicher (kg)	20	670	48	1.630/1.320	100	330/2.110	28	350/870	30	1.120
Verbrauch 2030 (je 100 km)	12 l	40,5 kWh	23,3 l	6,0 kg H <sub>2</sub>	35,4 l	1,9 kg H <sub>2</sub>	65	5,1 kg H <sub>2</sub>	4,5 l/h	6,3 kWh/h
						86,3 kWh		77,2 kWh		
Reichweite (km)	800	200	1.700	1.000	600	400	300	150	5-7 h	3-5 h

Tabelle 10: Fahrzeugdaten für die Beispielsegmente

### Kernaussagen Kapitel 5

Aus dem geschilderten regulatorischen Rahmen entstehen spezifische Vorteile für Nullemissionsnutzfahrzeuge, die in bestimmten Segmenten bei der Gesamtbewertung durchaus relevant sind (z. B. möglicher Einsatz in emissionssensiblen Bereichen und nächtlicher Betrieb). Gleichzeitig müssen aber

auch die Einsatzgrenzen der Fahrzeuge in den verschiedenen Kontexten mit einbezogen werden: Während bei BEV insbesondere höhere Fahrzeuggewichte und eine geringere Energiedichte problematisch sein können, sind bei Brennstoffzellenfahrzeugen v. a. Fragen zur Infrastrukturverfügbarkeit zu beachten.



# 06

## Lebenszykluskosten (TCO)

our  
see

Total number of exemptions claimed  
salaries, tips, etc. Attach Form(s) W-2  
do not include on line 8a  
and local incor

# 06

## Lebenszykluskosten (TCO)



Die Batterie macht nach wie vor den Löwenanteil der Kosten aus

In diesem Kapitel werden die kostenseitigen Auswirkungen der Elektrifizierung der Antriebe je Fahrzeugsegment untersucht. Ob sich elektrisch angetriebene Fahrzeuge langfristig auf dem Nutzfahrzeugmarkt durchsetzen werden, hängt maßgeblich von der Kostenentwicklung der Antriebe bzw. den Mehrkosten gegenüber konventionell betriebenen Fahrzeugen ab. Nutzfahrzeuge werden mehrheitlich von juristischen Personen betrieben, daher sind die Fahrzeugkosten von zentraler Bedeutung. In diesem Kapitel folgt deshalb ein Wirtschaftlichkeitsvergleich für die untersuchten Fahrzeugsegmente.

Die folgende Abbildung zeigt eine Kostenaufteilung für ein beispielhaftes Dieselfahrzeug (schwerer LKW im Fernverkehr).

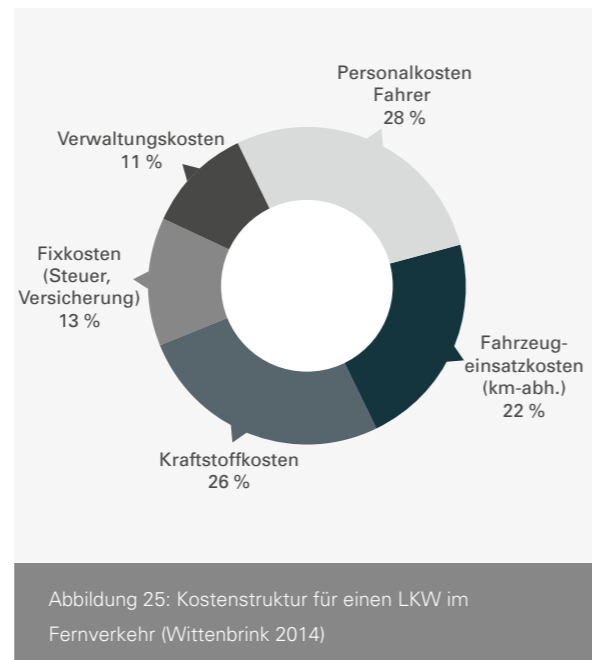


Abbildung 25: Kostenstruktur für einen LKW im Fernverkehr (Wittenbrink 2014)

Bei TCO-Betrachtungen werden die Kosten einer Investition über den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt. Dabei werden nicht nur die unmittelbaren Kosten, die mit dem Erwerb eines Investitionsgutes zusammenhängen, sondern auch die Kosten für den Betrieb, die Wartung und Instandhaltung sowie der Wert am Ende der Nutzungsdauer (Restwert) einbezogen.

Die Wirtschaftlichkeitsrechnungen in dieser Untersuchung dienen dem Vergleich zwischen den Antriebsvarianten. Deshalb werden nur die fahrzeugbezogenen Kosten berücksichtigt. Overhead- oder auch Personalkosten werden für die hier vorgenommenen TCO-Betrachtungen nicht berücksichtigt. Folgende Kostenbestandteile werden für die untersuchten Nutzfahrzeuge in Betracht gezogen:

- Investition/Anschaffungskosten
- Kraftstoff-/Energiekosten
- Service/Unterhalt
- Kfz-Steuer/Maut (für LKW)

Für die Bewertung werden Fixkosten, die unabhängig von der Fahrleistung auftreten, und Betriebskosten, in Abhängigkeit von der Fahrleistung, unterschieden. Bei Fahrzeugkategorien, die neben dem Fahrmotor zusätzlich einen hydraulischen Antrieb haben, werden die spezifischen Betriebskosten (z. B. Kraftstoffverbrauch) je Zeiteinheit definiert und in Abhängigkeit von den Betriebsstunden bewertet.

Die Anschaffungskosten werden aus Haltersicht als Investition behandelt. Beim Fahrzeugkauf wird Kapital in dem Fahrzeug gebunden. Dieses Kapital wird mit einem Zinssatz von 5 % bewertet. Die Bewertung erfolgt über die gesamte Lebensdauer der Fahrzeuge, wobei am Schluss der Haltedauer ein kalkulatorischer Restwert angesetzt wird. Die investitionsbedingten Kosten werden somit als jährliche Kosten (Annuitäten) ausgewiesen.

Detaillierte Erläuterungen bezüglich der einzelnen Kostenkomponenten und ihrer zeitlichen Entwicklung finden sich in den jeweiligen Unterkapiteln.

### 6.1 Batteriepreisentwicklung

Die Hochvolt-Batterie ist definitiv die Schlüsseltechnologie bei elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen. Sie entscheidet über Reichweite, Leistung und nicht zuletzt über die Anschaffungskosten der Fahrzeuge. Auch bei Nutzfahrzeugen

mit Brennstoffzellenantrieb kommt eine Hochvolt-Batterie zum Einsatz, die mindestens zur Speicherung der Bremsenergie genutzt wird (Rekuperation). Bei Plug-in-Varianten kann die Batterie zusätzlich an der Steckdose oder der Ladesäule geladen werden. Bei den hier untersuchten Antriebskonzepten wird der Elektromotor immer aus der Batterie betrieben.

Die Lithium-Ionen-Batterie ist aktuell die meistgenutzte Technologie in Fahrzeugen und wird es zumindest mittelfristig auch bleiben. Sie bietet eine relativ hohe Leistung bezogen auf ihr Gewicht und ihre Größe. Ein Nachteil ist die Gefahr, die Batterie zu überladen; es wird deshalb stets ein Batteriemangementsystem benötigt.

Andere Batteriekonzepte ohne Lithium, die bei Batteriefahrzeugen eingesetzt werden, sind Nickel-Metall-Hydrid (NiMH), Natrium-Nickelchlorid (Na-NiCl<sub>2</sub>), Blei-Säure (bei Gabelstaplern oder Baumaschinen) sowie nicht elektrochemische Alternativen wie Superkondensatoren, die höhere Ladeleistungen erlauben, aber eine beschränkte Energiedichte aufweisen. Aktuell wird deshalb an Batterien mit höheren Energie- und Leistungsdichten geforscht. Mögliche Lithiumverbindungen sind Lithium-Luft, Lithium-Metall oder Lithium-Schwefel (Li-S). Lithium-Luft-Batterien können theoretische Energiedichten von bis zu 11.680 Wh/kg erreichen (Imanishi, 2014); dies entspricht ungefähr dem Energiegehalt von Benzin. Diese grundsätzlich vielversprechenden Konzepte sind in der Entwicklung jedoch noch weit von einem Markthochlauf entfernt und es ist ungewiss, ob es überhaupt jemals so weit kommen wird (Cookson, 2015).

Zwar sind die Kosten für Fahrzeugbatterien in den letzten Jahren erheblich gesunken und es werden weitere Kostenreduktionen für die Zukunft erwartet, dennoch entfällt auf die Batterie zurzeit ein großer Anteil der gesamten Anschaffungskosten des Fahrzeugs. Abbildung 26 zeigt die Batteriepreisentwicklung für PKW in den vergangenen Jahren. Danach werden für Branchenführer mit entsprechend hohen Stückzahlen bereits Kosten von 250–300 €/kWh für Batteriepacks realisiert. In (ICCT 2016) wurde eine Metaanalyse über verschiedene Daten und Studien durchgeführt, um die zukünftigen Kosten der Batterieentwicklung abzuschätzen. Im PKW-Segment werden weitere Kostenreduktionen bis auf 130–180 €/kWh für den Zeitraum bis 2025 erwartet (ICCT 2016).

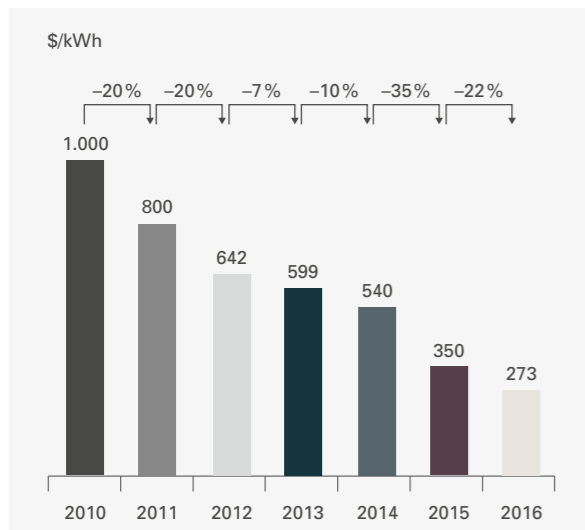


Abbildung 26: Preisentwicklung für Li-Ion-Batteriepacks für Elektro-PKW (Claire 2017)

Die Erkenntnis aus den Fachgesprächen mit Nutzfahrzeugherstellern bzw. Fahrzeugumrüstern in Deutschland ist, dass diese Preise im Nutzfahrzeugsegment derzeit nicht realisiert werden können. Aktuell handelt es sich bei Nutzfahrzeugen mit Batterie- oder Brennstoffzellenantrieb oft um Umrüstungen (Einzelanfertigung). Dies trifft insbesondere auf den untersuchten Omnibus wie auch auf das Müllfahrzeug zu, die als batterieelektrische Variante mit einer Brennstoffzelle als Range Extender (Reichweitenverlängerung) ausgerüstet werden. Die Komponenten müssen quasi als Einzelbestellung am Markt erworben werden. Dementsprechend sind die Preise heute sehr hoch.

Die höheren Anforderungen an Batterien im Nutzfahrzeugsegment werden auch in einem Bericht vom Öko-Institut aus dem Jahr 2015 genannt. In dieser Studie wird ein Batteriepreis von 1.000 €/kWh (mittleres Szenario) für das Jahr 2014 für LKW und Linienbusse angesetzt (Öko-Institut 2015). Aus den Expertengesprächen leiten wir ab, dass am Markt aktuell Batteriepreise von 800–900 €/kWh im Bereich Omnibusse realistisch sind. Für die TCO-Rechnungen in dieser Studie nehmen wir den Wert aus (Öko-Institut 2015) für den Batteriepreis 2015 von 1.000 €/kWh. Die jährliche Kostenreduktion (Lernkurve) wird aus einer Metastudie von Nikvist und Nilsson abgeleitet und beträgt jährlich 8 % (Nikvist et al. 2015). Beim Fahrzeugsegment schwerer Transporter rechnen wir mit höheren Stückzahlen und nehmen dementsprechend

niedrigere Batteriekosten an. Jedoch werden auch in diesem Fahrzeugsegment heute keine „PKW-Batteriepreise“ realisiert – dafür ist die Produktionsmenge an schweren E-Transportern heute noch viel zu gering. Bei diesem Fahrzeugsegment wird mit einem spezifischen Batteriepreis von 700 €/kWh gerechnet. Basierend auf der Lernkurve von Nikvist und Nilsson folgen für das Jahr 2030 deutliche Kostenreduktionen beim Batteriepreis. Für schwere Transporter ergibt sich ein Batteriepreis von 200 €/kWh bzw. von rund 285 €/kWh bei den anderen schweren Nutzfahrzeugen.

Beim Radlader wird eine Blei-Säure-Batterie eingesetzt mit spezifischen Kosten von 265 €/kWh (statista 2017). Bis zum Jahr 2030 rechnen wir mit einer Kostenreduktion von 13 % bei der Blei-Säure-Batterie.

### 6.2 Kostenentwicklung der Brennstoffzelle

Im Vergleich zur Batteriespeicherung sind die Kosten für Wasserstoffdruckspeicher je Energiegehalt in der Regel deutlich geringer. Allerdings sind auch die Kosten der Brennstoffzelle, die den Wasserstoff in elektrische Energie wandelt, nicht unerheblich. Für kurze Reichweiten kann somit der batterieelektrische Antrieb einen Vorteil hinsichtlich der Anschaffungskosten mit sich bringen, wohingegen ab einer gewissen Reichweite der Brennstoffzellenantrieb im Vorteil ist. Dies stellt allerdings nur eine grundsätzliche Tendenz dar, die stark von den tatsächlich in einem Fahrzeug installierten Komponenten abhängt und zudem von den sich aktuell stark verändernden Kosten- und Preisentwicklungen beeinflusst wird.

Die Entwicklung der Kosten für die Brennstoffzelle ist mit großen Unsicherheiten behaftet und hängt stark von der künftigen Nachfrage ab. Die Kosten für die Brennstoffzellen-Stacks werden deshalb häufig in Abhängigkeit von der produzierten Stückzahl angegeben. Die Nachfrage nach Brennstoffzellenantrieben im Verkehr hängt wiederum von deren Preisentwicklung ab. Es wird erwartet, dass die spezifischen Kosten (€/kW) in Zukunft stark sinken werden; aus heutiger Sicht ist jedoch der Zeitpunkt des Markthochlaufs von Brennstoffzellenfahrzeugen noch ungewiss. Mit Blick auf die Nutzung von Stückzahleffekten gibt es bei den Fahrzeugherstellern bereits mehrere Beispiele, bei denen PKW-Stacks in Nutzfahrzeugen integriert wurden, so z. B. die im Frühjahr 2017 vorgestellte Class 8 „Project Portal“ Sattelzugmaschine von Toyota mit rund 36 t zGG, bei der zwei PKW-Stacks der aktuellen Toyota Mirai Limousine kombiniert wurden (GCC 2017). Daimler Buses verfolgte mit dem 2009 vorge-



stellten Citaro FuelCELL Hybrid ein ähnliches Konzept. Hier wurden ebenfalls zwei Brennstoffzellen-Stacks aus dem PKW-Bereich, genauer aus dem auf der B-Klasse basierenden Mercedes F-Cell, verwendet (Daimler 2009).

In der aktuellen FCH/JU-Studie<sup>10</sup> von Roland Berger werden die spezifischen Stückkosten der Brennstoffzelle in Abhängigkeit von der Produktionsmenge (Brennstoffzellen pro Jahr) definiert. Gemäß dieser Quelle fallen die spezifischen Kosten auf 50 €/kW ab einer Produktion von 100.000 Stück im Jahr. Bei 10.000 Stück werden Kosten von 80 €/kW für die Brennstoffzelle angegeben. Die Angaben beziehen sich jeweils auf das Jahr 2030 und auf die Systemebene (Roland Berger 2015).

Auch in einer Metastudie von (ICCT 2016) zur Preisentwicklung bei PKW-Antrieben werden die Kosten der Brennstoffzelle in Szenarien („typical“ und „low cost“) untersucht. Bei hohen Produktionsmengen (>100.000) sinken die Systemkosten danach unter 60 €/kW (ICCT 2016). Andere Studien beziffern die Kosten für das Brennstoffzellensystem aktuell auf 600 €/kW und für 2030 auf 100 €/kW (Kochan et al. 2014). Eine Studie aus dem Jahr 2014 beziffert die Kosten für ein 80-kW-System auf 6.400 € (Systemkosten von 80 €/kW) bei einer jährlichen Produktion von 30.000 Stück (emobilitaetonline 2014). Gemäß (IEA 2015) kostet ein 80-kW-Brennstoffzellen-System im Jahr 2030 (bei einer jährlichen Produktion von 100.000 Stück) sogar nur ca. 3.900 € (Systemkosten von unter 50 €/kW).

Die Fachgespräche haben gezeigt, dass diese Preise den Nutzfahrzeugherstellern aus heutiger Sicht utopisch erscheinen. Nach Expertenschätzung liegt der Marktpreis – ohne Förderung – der Brennstoffzelle heute bei rund 800 €/kW. Bei diesem Preis werden die Materialkosten jedoch auf unter 20 % geschätzt, was ein Indiz für deutliche Kostensenkungspotenziale bei hohen Stückzahlen ist. Auch für den Nutzfahrzeugbereich kann damit gerechnet werden, dass gewisse Stückzahleffekte den Brennstoffzellenpreis deutlich drücken. Aus einem Fachgespräch ging hervor, dass die erste Kleinserie von Brennstoffzellen-LKW aktuell in Produktion geht. Nach Sichtung der aktuellen Literatur und den Gesprächen mit den Experten gehen wir bei den TCO-Berechnungen davon aus, dass die Kosten im betrachteten Zeitraum bis 2030 nicht unter 100 €/kW fallen werden.

### 6.3 Investitionen

In dieser Studie werden die Investitionen bottom-up für die verschiedenen Antriebsvarianten gerechnet. Dies bedeutet, dass die Investitionen für die verschiedenen Fahrzeugkomponenten einzeln betrachtet werden und mittels Lernkurven für den Untersuchungszeitraum bis 2030 fortgeschrieben werden.

#### Komponentenkosten

Um die Fahrzeugantriebe zu vergleichen, werden in einem ersten Schritt die Produktionskosten der zu untersuchenden Fahrzeugsegmente berechnet. Bei elektrischen Antrieben werden unterschiedliche Komponenten verbaut und entsprechend unterscheiden sich die Produktionskosten. Die nachfolgende Tabelle zeigt die benötigten Komponenten nach Fahrzeugantrieb.

	Antriebskonzept		
	Diesel	BEV	FCEV
Verbrennungsmotor	X		
Dieseltank	X		
E-Motor		X	X
Hochvolt-Batterie		X	X
Leistungselektronik		X	X
Batterie-managementsystem		X	X
Brennstoffzellensystem			X
H <sub>2</sub> -Speicher			X

Tabelle 11: Komponenten nach Fahrzeugantrieb

10 | Fuel cell and hydrogen joint undertaking.

Die Analyse der Kosten erfolgt für die Jahre 2015–2030. Die spezifischen Kosten für die Komponenten werden deshalb für diesen Zeitraum definiert. Alle Kosten beziehen sich auf eine Preisbasis 2015 (ohne Inflation und Steuern).

Komponente	Einheit	2015	2030
Verbrennungsmotor	€/kW	70	75
Elektromotor	€/kW	23	20
HV-Batterie (schwerer Transp.)	€/kWh	700	200
HV-Batterie (Busse, LKW usw.)	€/kWh	1.000	285
Leistungselektronik	€/kW	15	10
Batteriemanagementsystem	€ pauschal	300	200
Brennstoffzelle	€/kW	2.000	100
H <sub>2</sub> -Tank	€/kg	1.000	300

Tabelle 12: Spezifische Komponentenkosten

© (CE Delft 2013; Özdemir 2012; Fuchs S. et al. 2014; Öko-Institut 2015; Nikvist et al. 2015)

Es wird erwartet, dass die spezifischen Kosten des Dieselmotors zukünftig aufgrund der höheren Umweltauforderungen (insbesondere der Abgasnachbehandlung) ansteigen werden (Özdemir 2012).

Die Preisentwicklung der Batteriesysteme sowie der Brennstoffzelle ist in den Unterkapiteln 6.1 und 6.2 beschrieben.

Die Produktionskosten werden unter Berücksichtigung einer Verkaufsmarge, eines Zinssatzes und eines Fahrzeugrestwertes am Ende der Nutzungsdauer in jährliche Kapitalkosten umgerechnet.

### 6.4 Energieträgerpreise

Den größten Anteil an den Betriebskosten der Fahrzeuge haben die Energiekosten. Die Energiekosten betreffen Diesel- bzw. Strom- oder Wasserstoffkosten bei alternativen Nutzfahrzeugen. Die Energiekosten sind direkt mit der Fahrleistung bzw. der Betriebsdauer, dem spezifischen Kraftstoffverbrauch und natürlich den Energieträgerpreisen verknüpft.

Die Energiepreisentwicklungen für die TCO-Berechnungen basieren auf eigenen Energienachfrage- und Kraftwerksparkmodellen, die laufend aktualisiert werden.

Die mittleren Strompreise variieren je nach Abnehmer in einer Bandbreite von z. T. unter 5 ct/kWh (für stromintensive Industriekunden) bis hin zu knapp 30 ct/kWh (für Privatkunden). Zusätzlich unterliegt der Strompreis saisonalen und tagesabhängigen Schwankungen. Der aktuelle Strompreis für das Jahr 2015 wird vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft übernommen (BDEW 2017). Für die TCO-Rechnungen wird der Strompreis für Industriekunden (inkl. Stromsteuer) angesetzt; dieser lag im Jahr 2015 bei 15,23 ct/kWh. Ein Richtwert für 2017 ist auch bereits veröffentlicht; dieser liegt bei 17,02 ct/kWh. Danach wird die Entwicklung gemäß Energiereferenzprognose angesetzt (Prognos et al. 2014).

Die zukünftigen Kosten für Wasserstoff lassen sich nur schwer abschätzen. Aktuell wird Wasserstoff an den Tankstellen der Clean Energy Partnership (CEP) zu 9,50 €/kg verkauft, was einem Energiepreis von 28,5 ct/kWh entspricht, der in Anlehnung an konventionelle Flüssigkraftstoffe festgelegt wurde. Aufgrund von Effizienzsteigerungen werden in Zukunft deutliche Kostenreduktionen bei der Wasserstoffbereitstellung erwartet, wodurch der Wasserstoffpreis deutlich sinken dürfte. Die Kosten des Wasserstoffs werden neben den Herstellungskosten der Elektrolyseure vor allen Dingen durch die Strompreise und die Betriebsstunden beeinflusst. Aufgrund der Flexibilität von PEM-Elektrolyseuren bietet sich eine Nutzung von Überschussstrom zur Wasserstoffproduktion an, um zu möglichst geringen Strompreisen zu produzieren. Aufgrund der Restriktion der Verfügbarkeit von Überschussstrom kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei einem weit verbreiteten Einsatz von Wasserstoff dieser nicht nur aus Überschussstrom erzeugt werden kann. Aus diesem Grund sind bei großflächigem Einsatz von Wasserstoff die Vollkosten der Stromproduktion anzulegen.

Die in der folgenden Tabelle dargestellten Energiepreise beziehen sich auf eine Referenzentwicklung (ohne Berücksichtigung möglicher zukünftiger Steuern bei Strom und Wasserstoff).

Energieträger	Einheit	2015	2030	15–30, in %
Diesel	€/l	1,14	1,44	+27 %
Strom	€/kWh	0,15	0,19	+28 %
Wasserstoff	€/kg H <sub>2</sub>	9,90	5,09	-49 %

Tabelle 13: Energieträgerpreise für 2015 und 2030

### 6.5 Kosten der Infrastruktur

Die heutige Versorgung des Verkehrssektors mit entsprechenden Kraftstoffen basiert auf jahrzehntelangen Entwicklungen der Lieferstrukturen. Aktuell existieren in Deutschland mehr als 14.000 Tankstellen, wobei diese Zahl rückläufig ist. Ende der 1960er-Jahre betrug die Anzahl der Tankstellen noch mehr als 40.000 (ADAC 2017). An Autobahnen werden aktuell gut 350 Tankstellen betrieben (EID 2017). Die meisten öffentlich zugänglichen Tankstellen bieten Diesel und Benzin an, die Zahl der Tankmöglichkeiten für Autogas (LPG) in Deutschland ist mit 7.000 geringer (DVFG 2017), die Tankmöglichkeiten für komprimiertes Erdgas (CNG) werden mit ungefähr 900 beziffert (erdgas.info 2017).

Wie bei der aktuellen Diskussion um die Ladeinfrastruktur zeigt sich auch bei den beiden genannten alternativen Kraftstoffen (LPG und CNG) eine Herausforderung, die häufig als „Henne-Ei-Problem“ beschrieben wird: Die fehlende oder unzureichende Betankungsinfrastruktur ist einerseits ein Hindernis für die Verbreitung der Antriebstechnologie; andererseits ist der Aufbau der Infrastruktur unwirtschaftlich, wenn der entsprechende Absatzmarkt noch nicht ausreichend ausgeprägt ist.

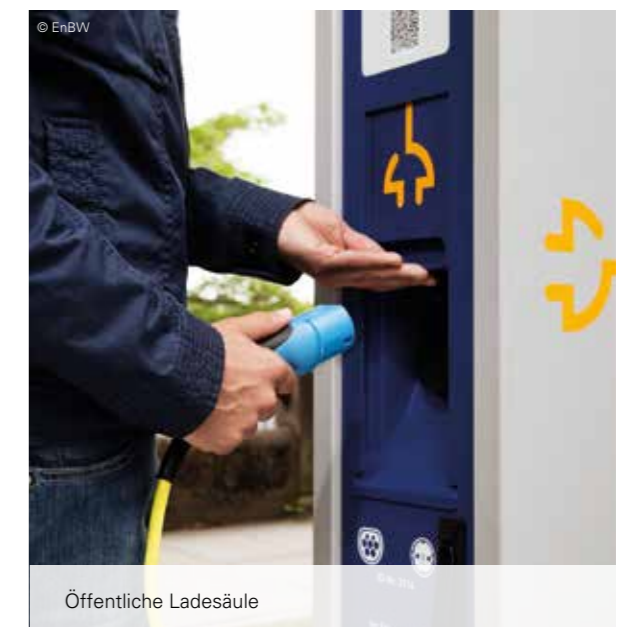
Für die Betankung von Diesel-Nutzfahrzeugen wird bei ausreichender Flottengröße häufig eine eigene Betriebs tankstelle genutzt. Auch für elektrisch angetriebene Fahrzeuge ist eine Betriebs tankstelle von Vorteil. In aller Regel (Baustellen sind eine wichtige Ausnahme) ist ein Betriebsgelände mit einer Stromversorgung versehen, deren Kapazität das Laden mehrerer Elektrofahrzeuge erlaubt.

Bezüglich der möglichen Ladeströme sind sowohl die Limitationen des Fahrzeugs (z. B. On-board-Ladegerät, erforderliche Kühlung) als auch der Ladeinfrastruktur (z. B. Netzanschluss) zu berücksichtigen. Die einfachsten Ladestationen sind wie eine Steckdose mit einer Phase des Wechselstroms (AC) verbunden und können dadurch bis zu 3,7 kW Ladeleistung bereitstellen. Sind alle drei im Netz verfügbaren Phasen angeschlossen, erhöht sich die maximal verfügbare Ladeleistung auf 11 kW. Können statt der im Haushalt üblichen Stromstärke von 16 A sogar 32 A genutzt werden, beträgt die Ladeleistung bis zu 22 kW. Die Kosten für eine derartige Ladestation belaufen sich auf ungefähr 1.000 € (The Mobility House 2017a). Es gilt allerdings zu überprüfen, ob auch der im Fahrzeug verbaute On-board-Lader diese Leistung aufnehmen kann. Die hier genannten (maximalen) 22 kW Leistung

bei Wechselstrom können aktuell von nur wenigen Elektrofahrzeugen tatsächlich genutzt werden.

Eine Alternative zur Nutzung des im Haushalt üblichen Wechselstroms (AC) ist das Schnellladen mittels Gleichstrom (DC). Dieser muss von der Ladestation selbst bereitgestellt werden, die dadurch aufwändiger und somit auch teurer ausfällt. Derzeit sind Ladeleistungen von 24 kW und 50 kW üblich. Für die geringere Leistungsklasse sind Kosten von ca. 10.000 bis 15.000 € anzusetzen, wohingegen eine Schnellladestation der höheren Leistungsklasse Kosten von ca. 30.000 € mit sich bringt (The Mobility House 2017b, goingelectric 2017). Die sogenannten Supercharger der Firma Tesla bieten bereits heute eine Ladeleistung von 120 kW und Schnellladestationen von 150 kW sollen in naher Zukunft insbesondere entlang von wichtiger Verkehrsachsen und -knotenpunkte bereitgestellt werden (e-stations 2017). Die Firma Porsche treibt eine Verdoppelung der Batterieladespannung von 400 V auf 800 V voran, was eine Ladeleistung von 220 kW ermöglichen und zukünftig auf eine Leistung von 350 kW gesteigert werden soll (Porsche 2016).

Die Anschlussleistung von gewerblichen und industriellen Stromkunden reicht in aller Regel aus, um konventionelle Ladestationen mit einer Leistung von bis zu 22 bzw. 24 kW zu betreiben. Ob allerdings mehrere Anschlusspunkte für das gleichzeitige Laden von mehreren Fahrzeugen bzw. Ladestationen mit höherer Leistung eingesetzt werden können, ist



Öffentliche Ladesäule

anhand des individuellen Anschlusses an das Stromnetz und insbesondere dessen Spannungsebene (Nieder-, Mittel- oder Hochspannung) zu entscheiden. Gegebenenfalls muss die Stromversorgung des Betriebsgeländes mittels eines eigenen Transformators an eine höhere Spannungsebene angeschlossen werden, um die erforderliche Leistung bereitzustellen. Die damit verbundenen Kosten können je nach zu überbrückender Entfernung erheblich sein und müssen mit dem zuständigen Netzbetreiber geklärt werden. So wird die Investition für einen 15-MW-Anschluss, der die gleichzeitige Schnellladung von ca. 40 Fahrzeugen mit 220 kW oder den Betrieb einer Wasserstofftankstelle mit On-site-Produktion erlauben würde (s. u.), in (Thomas et al. 2016) mit rund einer halben Million Euro beziffert.

Während Ladepunkte für Elektrofahrzeuge auch Zug um Zug realisiert werden können, erscheint für eine Versorgung mit Wasserstoff eine zentralisiertere Struktur zielführender. Die Wasserstoffherzeugung in größerem Maßstab ist wirtschaftlich deutlich vorteilhafter, da zahlreiche Skaleneffekte genutzt werden können. Hierbei ist die Wasserstoffherzeugung direkt an der Tankstelle (On-site-Produktion) ebenso denkbar wie die Erzeugung von Wasserstoff an einer zentralen Anlage mit anschließendem Transport zur Tankstelle (Off-site-Produktion). Dabei gilt es, die höhere Effizienz der Wasserstoffherzeugung in einer Großanlage gegen den anschließend notwendigen Transportaufwand abzuwägen. Da für die vorliegende Studie von einer Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse ausgegangen wird, sind für diese Entscheidung weiterhin die Verfügbarkeit einer Stromversorgung mit ausreichender Leistung vor Ort und die Kosten für den Strombezug ausschlaggebend.

Nimmt man eine Tankstelle mit einem täglichen Durchsatz von 5.000 kg H<sub>2</sub> und eine On-site-Wasserstoffherzeugung mit 20 Volllaststunden am Tag an, so benötigt diese bei einem Strombedarf von 58 kWh/kg H<sub>2</sub> (NBF 2017a) eine durchschnittliche Leistung von 14,5 MW. Hinzu kommt weiterer Strombedarf für die Kompression des Wasserstoffs und gegebenenfalls dessen Kühlung während der Betankung – jedoch in weit geringerem Umfang als für die H<sub>2</sub>-Herstellung. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Effizienz der Komponenten zukünftig steigt und sich somit deren Energiebedarf in Zukunft verringert (FCH JU 2014).

Die exemplarisch genannte Menge von 5.000 kg H<sub>2</sub>/d würde, beispielsweise abgegeben zu je 30 kg H<sub>2</sub> an 165 Stadtbusse bei einem überschlägig angenommenen Verbrauch von

9 kg H<sub>2</sub>/100 km (FCH JU 2014), eine Reichweite von ungefähr 330 km pro Bus und insgesamt von mehr als 55.000 km/d ermöglichen.

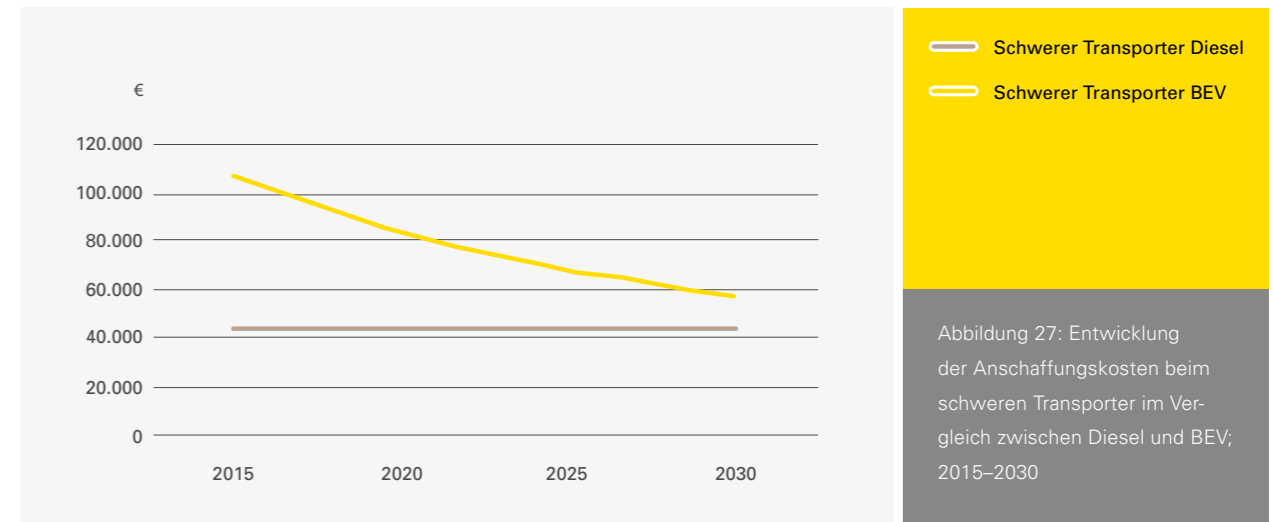
Gleiches kann für die Kosten angenommen werden, die mit der Wasserstoffproduktion und -betankung einhergehen. Insbesondere die Elektrolyseeinheit, aber auch der Wasserstoffspeicher sowie die Kompressoren erfordern Investitionen, die weit über den heute üblichen Kosten für Dieseltankstellen liegen. Die Gesamtkosten eines Projektes mit der bereits genannten Kapazität von 5.000 kg H<sub>2</sub>/d kann somit einige Millionen Euro betragen (NBF 2017a). Allerdings gilt zu beachten, dass die daraus resultierenden Wasserstoffkosten, aufgrund des hohen H<sub>2</sub>-Durchsatzes und bei Nutzung von günstigem Strom für die Elektrolyse, sehr gering ausfallen. Somit können die Energiekosten pro gefahrenem Kilometer bereits heute gleichauf liegen mit den Kosten für Diesel (NBF 2017b).

Das gleiche niedrige Kostenniveau kann je nach Situation auch für eine Tankstelle erreicht werden, die angelieferten Wasserstoff nutzt. Für eine solche Anlage fallen die notwendigen Investitionen deutlich geringer aus (NBF 2017a); allerdings fallen die Kosten für den angelieferten Wasserstoff als laufende Kosten an. Auch hier werden in Zukunft starke Kostensenkungen erwartet (FCH JU 2014).

### 6.6 TCO schwerer Transporter

Beim Fahrzeugsegment schwere Transporter wird die Kostenentwicklung für ein batterieelektrisches Fahrzeug untersucht. Der Transporter hat eine zulässige Gesamtmasse von 7,5 t bei einem mittleren Verbrauch von 48 kWh/100 km und einer Batteriekapazität von 83 kWh. Damit ergibt sich eine Reichweite von rund 170 km, die für den Verteilerverkehr gut geeignet ist. Als Referenzfahrzeug wird ein Diesel-Transporter mit ebenfalls 7,5 t zGG (z. B. Fuso Canter von Daimler) und ähnlichen Leistungsspezifikationen gewählt.

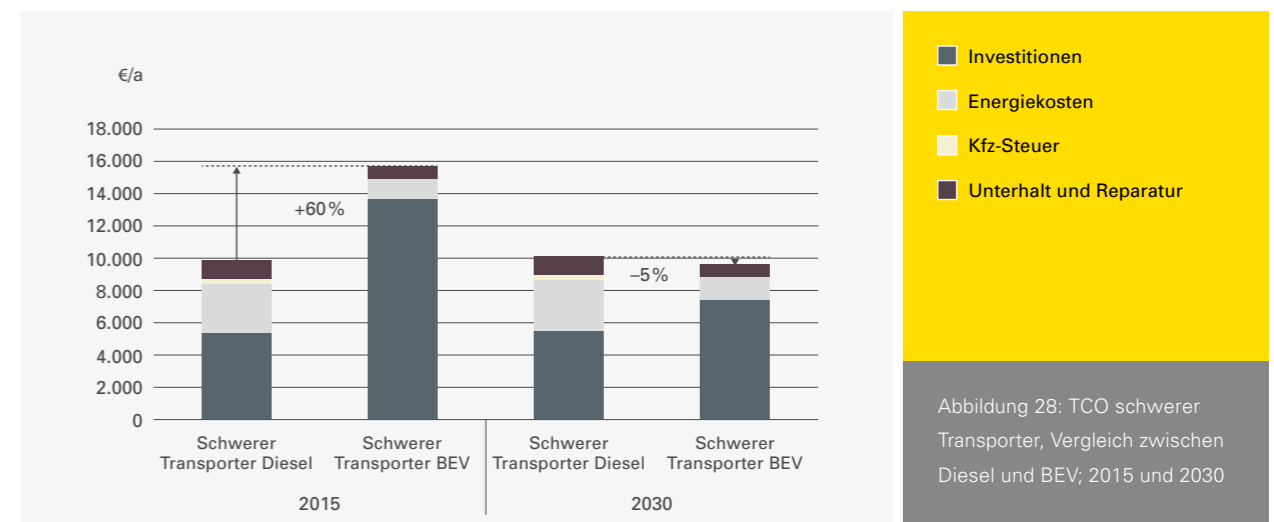
Die Anschaffungskosten für den Diesel-Transporter belaufen sich auf rund 44.000 €. Der batterieelektrische Transporter ist heute deutlich teurer. Der Preis bei der Anschaffung beträgt fast das Doppelte. Hauptsächlich dank einer deutlichen Kostendegression beim Batteriepreis sinken die Anschaffungskosten für den Elektro-Transporter auf unter 60.000 € im Jahr 2030. Damit bleiben die Anschaffungskosten der BEV-Variante auch 2030 rund 30 % höher.



Dank effizientem Antrieb gestalten sich die Energiekosten beim batterieelektrischen Transporter vorteilhaft. Da für Diesel bis 2030 deutliche Preissteigerungen erwartet werden, erhöht sich dieser Kostenvorteil weiter. Die Energiekosten liegen 2015 bei rund 23 ct/Fzg.-km für den BEV und bei rund 51 ct/Fzg.-km für die Dieselvariante. Aufgrund höherer Strompreise steigen die Energiekosten beim batterieelektrischen Transporter (trotz Effizienzverbesserungen) bis 2030 leicht an. Auch beim konventionellen Diesel-Transporter wird erwartet, dass der steigende Dieselpreis die Effizienzverbesserung überkompensiert und somit künftig höhere Kraftstoffkosten resultieren. Die Preissteigerung liegt bei beiden Antrieben in der gleichen Größenordnung unter 10 %.

Die Mautpflicht entfällt für den untersuchten Transporter, da die Mautgrenze von 7,5 t zGG nicht überschritten wird. Nach aktueller Regelung sind Elektrofahrzeuge für zehn Jahre von der Kfz-Steuer befreit.

Die Kosten für Unterhalt und Reparatur (inkl. Reifen) werden aus (CE Delft 2013) abgeleitet und betragen rund 6 ct/Fzg.-km beim Dieselantrieb. Beim elektrischen Antrieb werden geringere Wartungskosten erwartet als beim konventionellen Verbrennungsmotor, da keine Kosten für Motoröl, Luftfilter usw. anfallen. Zudem ist der Elektromotor einfacher gebaut als ein Verbrennungsmotor. Nach (CE Delft 2013) werden die spezifischen Kosten für Unterhalt und Reparatur des Batteriefahrzeugs mit 4 ct/Fzg.-km angesetzt.



Nach TCO-Rechnung betragen die Mehrkosten für den batterieelektrischen Transporter heute knapp 6.000 € pro Jahr. Die Mehrkosten liegen damit bei +60 % trotz deutlich geringerer Energiekosten, Wegfall der Kfz-Steuer sowie Kostenvorteilen bei Unterhalt und Reparatur. Der Grund für die höheren TCO-Werte sind die deutlichen höheren Anschaffungskosten. Dank günstigerer Batteriepreise schrumpfen diese jedoch bis ins Jahr 2030 deutlich, sodass der batterieelektrische Transporter beim TCO-Vergleich im Jahr 2030 wirtschaftliche Vorteile hat.

Die fahrleistungsabhängigen Kosten beim elektrischen Transporter (Strom) sind heute schon geringer als beim Dieselfahrzeug. Die Kostenunterschiede sind jedoch gering, sodass sich der TCO-Break-even nur bei sehr hohen Jahresfahrleistungen von über 200.000 km ergeben würde.

Gemäß dieser TCO-Rechnung hat der elektrische Transporter im Jahr 2030 einen knappen Kostenvorteil von 5 %. Haupt-sächlichster Grund dafür sind die Anschaffungskosten, die in diesem Zeitraum um fast 50 % sinken. Der Break-even wird im Jahr 2028 erreicht.

### 6.7 TCO schwerer LKW

Beim zweiten Fahrzeugsegment, das bezüglich der Wirtschaftlichkeit untersucht wird, handelt es sich um einen LKW mit 18 t zGG. Das Fahrzeug soll mehrheitlich im Fernverkehr eingesetzt werden, was eine bestimmte Tagesfahrleistung erfordert. Als alternative Antriebsvariante wird in diesem

Fahrzeugsegment ein LKW mit einer Brennstoffzellenleistung von 100 kW und einer Wasserstofftankkapazität von 31 kg untersucht. Zusätzlich wird eine Batterie mit einer Kapazität von 120 kWh<sup>11</sup> verbaut. Diese Fahrzeugkonfiguration verursacht Anschaffungskosten von rund 470.000 € für den Brennstoffzellen-LKW. Sie liegen damit deutlich höher als bei der Dieselvariante. Die berechneten Kosten sind jedoch als Einzelfertigungs-/Kleinserienkosten zu verstehen. Bei Serienfertigung sind deutliche Kostenreduktionen möglich. Aufgrund der angesetzten Kostendegressionen bei Batterie, Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Tank sinken die Kosten für das Brennstoffzellenfahrzeug auf rund 125.000 € im Jahr 2030. Die Mehrkosten für den Brennstoffzellen-LKW liegen dann bei unter 30 % gegenüber der Dieselvariante.

Während beim rein batterieelektrischen Antrieb bereits heute Vorteile bei den Energiekosten darstellbar sind, gilt dies aktuell nicht für den Brennstoffzellenantrieb. Bei einem Preis von knapp 10 €/kg H<sub>2</sub> und einem spezifischen Verbrauch von rund 7 kg H<sub>2</sub>/100 km ergeben sich Energiekosten, die heute um rund Faktor zwei über denen des Dieselantriebs liegen.

Bis 2030 wird jedoch erwartet, dass sich dieses Verhältnis umdreht und die Energiekosten beim Wasserstoffantrieb rund 15 % geringer sind. Da der Brennstoffzellen-LKW nicht über Plug-in geladen wird, fallen keine zusätzlichen Stromkosten an (siehe Fußnote 9, Seite 57).

Aktuell sind die Mautsätze zwar nach Schadstoffklassen gespreizt, jedoch ergeben sich dadurch keine unterschiedlichen Kosten zwischen Nullemissionsfahrzeugen und Dieselfahrzeugen mit der Abgasnorm Euro VI. Für die TCO-Rechnungen in dieser Studie wird davon ausgegangen, dass Nullemissionsnutzfahrzeuge künftig von der LKW-Maut befreit werden. Aufgrund der kurzen Nutzungsdauer von 4,2 Jahren haben die Anschaffungskosten bzw. die Mehrkosten beim Brennstoffzellen-LKW einen großen Einfluss auf die TCO-Betrachtung. Aus heutiger Sicht liegen die Kapitalkosten beim FCEV deutlich höher als die gesamten TCO beim Dieselfahrzeug. Bei einem reinen Wirtschaftlichkeitsvergleich ist der Brennstoffzellen-LKW heute nicht konkurrenzfähig.

Sowohl die Anschaffungs- als auch die Energiekosten können zukünftig bei der FCEV-Variante deutlich reduziert werden. Zusätzlich entfallen die Maut und die Kfz-Steuer. Diese Effekte führen dazu, dass der Brennstoffzellen-LKW langfristig nach TCO-Betrachtung günstiger ist als der Diesel-LKW. Voraussetzung ist jedoch eine Serienfertigung mit entsprechend hohen Stückzahlen.

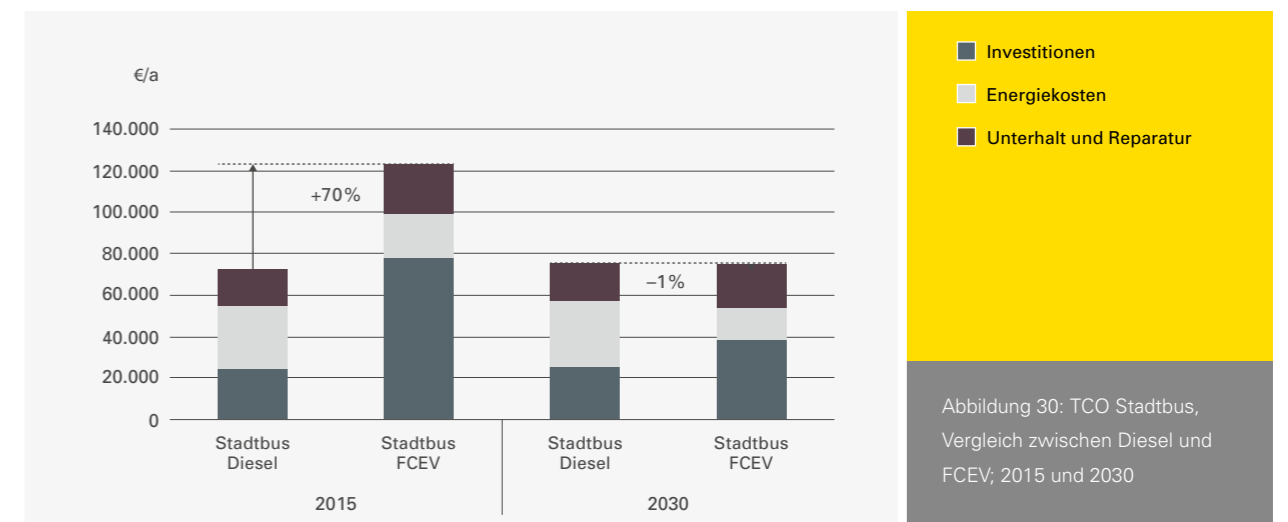
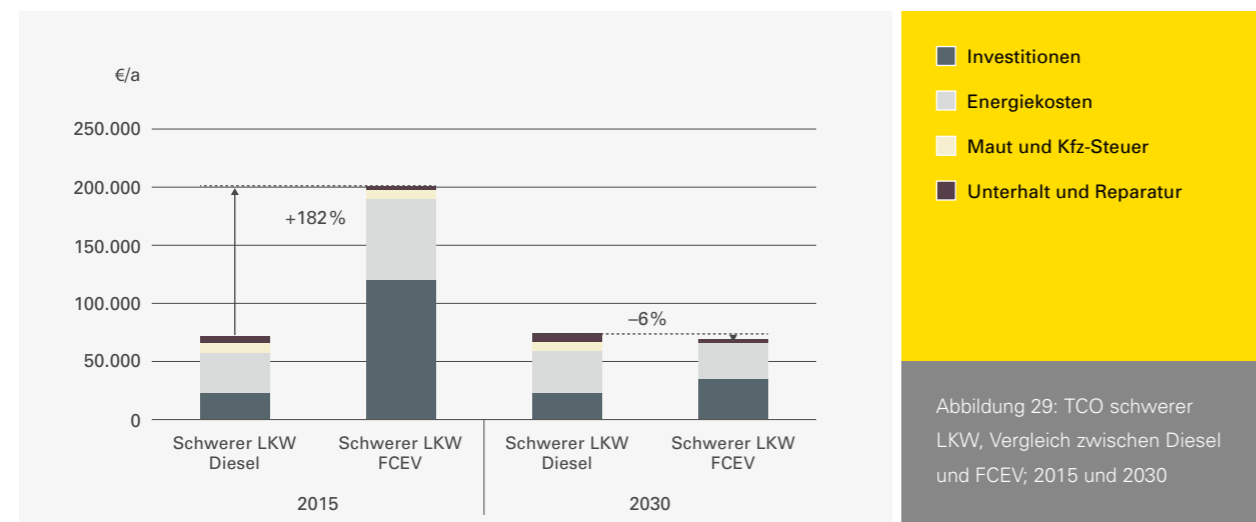
### 6.8 TCO Stadtbus

Der untersuchte Omnibus ist im Stadtverkehr unterwegs und mit einer Batteriekapazität von 240 kWh ausgestattet. Der Elektromotor leistet 160 kW. Zusätzlich verfügt der Bus über eine Brennstoffzelle als Range Extender mit einer Leistung von 30 kW und der Wasserstofftank fasst 15 kg H<sub>2</sub>. Gemäß

Komponentenrechnung belaufen sich die Kosten für ein solches Fahrzeug auf rund 700.000 €, während für die Standard-Dieselvariante Anschaffungskosten von rund 235.000 € zu veranschlagen sind. Die Mehrkosten der Investition sinken von Faktor 3 im Jahr 2015 auf Faktor 1,5 im Jahr 2030. Bei einer Jahresfahrleistung von 60.000 km ergeben sich Kraftstoffkosten von rund 30.000 € pro Jahr für den Dieselbus. Demgegenüber liegen die Energiekosten beim Brennstoffzellenbus deutlich niedriger mit unter 22.000 € pro Jahr. Rund 9.000 € davon sind Stromkosten und der Rest sind Kosten für den Wasserstoff. Die Stromkosten steigen zwar leicht an, trotzdem können die Energiekosten des Brennstoffzellenbusses bis auf unter 16.000 € pro Jahr im Jahr 2030 reduziert werden (entspricht -27 % gegenüber 2015).

Die spezifischen Kosten für Unterhalt und Reparatur werden aus der aktuellen Brennstoffzellenbus-Studie (Roland Berger 2015) übernommen. Nach dieser Quelle werden sich die Kosten für Unterhalt und Reparatur denen des Dieselfahrzeugs angleichen und nach 2020 keine Mehrkosten mehr verursachen.

Nach der TCO-Rechnung betragen die Mehrkosten heute rund 50.000 € pro Jahr für den emissionsfreien Batteriebus mit Brennstoffzelle als Range Extender. Die Mehrkosten ergeben sich zu einem großen Teil aus den hohen Investitionen sowie den höheren Kosten für Unterhalt. Alle drei Kostenbestandteile sinken deutlich zwischen 2015 und 2030, sodass sich im Jahr 2030 die TCO der beiden Antriebsvarianten auf gleichem Niveau befinden.



11 | Trotz der Batteriegröße ist es nicht vorgesehen, diese extern zu laden (Plug-in-Funktionalität). Es besteht jedoch grundsätzlich die Möglichkeit dazu. Die große Batterie dient als Puffer, um konstant bis zu 160 kW Leistung über 20–30 Min. zusätzlich zur Brennstoffzelle zu liefern.

### 6.9 TCO Abfallsammelfahrzeug

Die Anschaffungskosten beim Abfallsammelfahrzeug beinhalten die Kosten für das Fahrgestell, den Rotopressaufbau und die Schüttung sowie die antriebspezifischen Kosten. Als Nullemissionsvariante wird ein batterieelektrischer Antrieb mit einer Brennstoffzelle als Range Extender angesetzt. Die Anschaffungskosten sind dementsprechend hoch, da sowohl eine relativ große Batterie als auch die Brennstoffzelle inkl. H<sub>2</sub>-Tank verbaut werden. Zudem wird dieses Fahrzeug heute quasi als Einzelfertigung produziert, was den Anschaffungspreis zusätzlich erhöht.

Für die TCO-Betrachtung im Jahr 2030 rechnen wir mit denselben Komponenten, jedoch mit deutlichen Reduktionen bei den spezifischen Komponentenkosten (vgl. Tabelle 12). Auch die Kosten für die Umrüstung können durch Skaleneffekte deutlich reduziert werden. In der Anschaffung bleibt der batteriebetriebene Abfallsammler mit Brennstoffzellen-Range-Extender jedoch auch im Jahr 2030 deutlich teurer als die konventionelle Dieselvariante.

Auf 100 km werden beim FCEV-Antrieb rund 5,8 kg H<sub>2</sub> und 88 kWh aus der Batterie verbraucht. Demgegenüber steht ein Dieselverbrauch von 65 l/100 km. Es wird mit einer Tagesfahrleistung von rund 45 km gerechnet. Bei den Energiekosten ergeben sich demnach heute bereits Kostenvorteile von rund 12 % für die Nullemissionsvariante. Dieser Energiekostenvorteil erhöht sich auf über 40 % im Jahr 2030.

Das Abfallsammelfahrzeug ist mehrheitlich im im Stop-and-go-Verkehr unterwegs. Dies bedeutet eine extreme Belastung für die Bremsen. Der Verschleiß der Bremsen ist beim Elektroantrieb deutlich geringer, da elektrisch gebremst wird und die dabei freigesetzte Energie teilweise in die Batterie zurückgespeist werden kann (Rekuperation).

Aus einer reinen TCO-Betrachtung ergibt sich in diesem Anwendungsfall kein wirtschaftlicher Betrieb für den hier untersuchten emissionsfreien Abfallsammler – die Dieselvariante lässt sich deutlich günstiger betreiben.

Werden die aktuellen H<sub>2</sub>-Tankstellenpreise angesetzt (vgl. Kapitel 6.4), lässt sich aus heutiger Sicht auch bei längeren Touren und höheren Jahresfahrleistungen kein wirtschaftlicher Betrieb auf Basis der TCO beim FCEV-Abfallsammler realisieren. Vor dem Hintergrund günstigerer H<sub>2</sub>-Kosten im Jahr 2030 ist die Situation jedoch eine andere: Bei hohen Jahresfahrleistungen nähert sich der Break-even-Punkt der Nullemissionsvariante dem Diesel an. Kostenvorteile nach TCO-Betrachtung lassen sich jedoch erst ab einer (theoretischen) Jahresfahrleistung von über 100.000 km/a realisieren, was für einen Abfallsammler nicht realistisch ist.

### 6.10 TCO Radlader

Wie auch bei den anderen Nutzfahrzeugsegmenten dominiert im Segment der Radlader der Dieselantrieb. Aktuell wird von Kramer jedoch der erste allradgelenkte vollelektrisch be-

triebene Radlader angeboten. Diese Baumaschine ist mit zwei Elektromotoren (Fahrmotor und Arbeitshydraulik) ausgestattet. Der BEV-Radlader ist mit einer im Vergleich zur Lithium-Ionen-Batterie deutlich günstigeren Blei-Säure-Batterie ausgestattet. Trotzdem liegen die Anschaffungskosten bei rund 55.000 € (netto) und damit rund 50 % höher als bei der vergleichbaren Dieselvariante.

Bei den Energiekosten schneidet der BEV-Radlader jedoch deutlich besser ab als der dieselbetriebene. Bei jährlich rund 500 Betriebsstunden fallen knapp 3.000 € an Energiekosten für Dieselkraftstoffe an. Die Stromkosten sind mit rund 550 € deutlich niedriger.

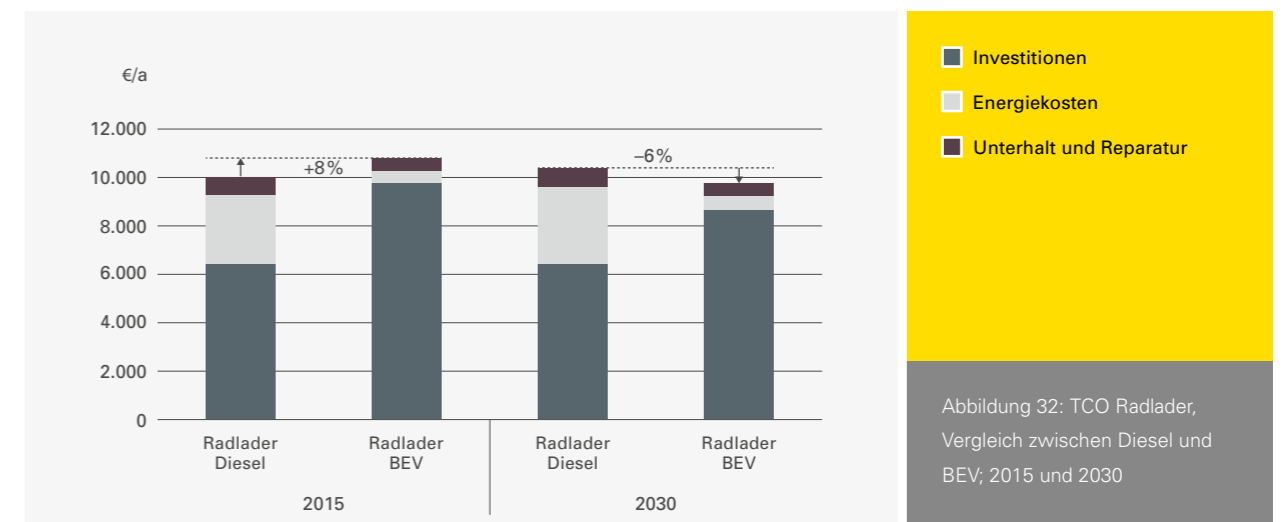
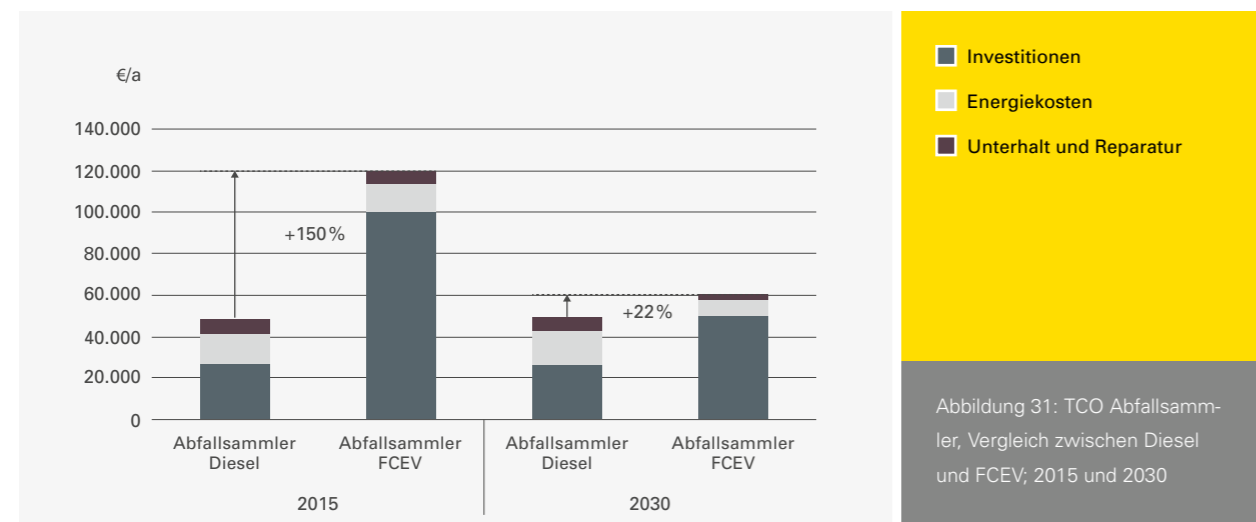
Beim E-Lader ergeben sich außerdem deutliche Einsparungen beim Unterhalt, da der Motorservice entfällt. Nach Expertenmeinung lassen sich so rund 400 €/a an Unterhaltskosten einsparen.

Trotz der deutlich höheren Anschaffungskosten rechnet sich der BEV-Radlader bei dieser Betrachtung bereits bei rund 600 jährlichen Betriebsstunden. In der Basisrechnung werden 500 Betriebsstunden pro Jahr angesetzt, woraus sich heute Mehrkosten von 6 % ergeben. Auch beim BEV-Radlader gehen wir von künftig sinkenden Anschaffungskosten aus. Nach dieser Rechnung ist der Break-even-Punkt für den E-Radlader bereits im Jahr 2021 erreicht.



### 6.11 Exkurs: Auswirkungen der Digitalisierung auf die TCO

Aktuell herrscht eine ausgesprochen hohe technologische Dynamik im Verkehrssektor, die sich insbesondere in der zunehmenden Digitalisierung äußert. Damit ist in erster Linie die Automatisierung des Fahrgeschehens und die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander, aber auch mit der sie umgebenden Infrastruktur zu verstehen. Prinzipiell ist die Digitalisierung im Verkehr noch weitreichender, da zunehmend komplette Transportvorgänge datengestützt und in Echtzeit optimiert werden und sich sogar selbst organisieren können (Stichworte Logistik 4.0 und Internet of Things).



All diese Entwicklungen können bei einem Analysehorizont bis 2030 keinesfalls außer Acht gelassen werden. Die größten Kosteneffekte wären bei einem vollautonomen Betrieb der jeweiligen Fahrzeuge zu erwarten. Eine derartige Annahme ist bis zum Jahr 2030 aber schon allein aus rechtlichen Gründen wenig realistisch. Für diese Studie sind zudem nur all jene Digitalisierungstendenzen von Interesse, die sich unmittelbar in den TCO der Fahrzeuge niederschlagen. Gesamtbetriebliche Effekte wie sinkende Staukosten (durch effizientere Verkehrsflüsse), Unfallkosten (durch höhere Fahrsicherheit) und Erlösoptimierungen (vgl. Logistik 4.0) werden an dieser Stelle hingegen nicht berücksichtigt.

**Kraftstoffverbrauch**

Durch angepasste und optimierte Fahrweise kann der durchschnittliche Verbrauch im automatisierten Betrieb gesenkt werden. Im Projekt euroFOT (euroFOT 2012) konnten allein durch den Einsatz verschiedener Fahrerassistenzsysteme (z. B. Adaptive Cruise Control ACC, Geschwindigkeitsregelsysteme und Fuel Efficiency Advisors FEA) bei LKW etwa 2 % des Treibstoffs eingespart werden. Die zunehmende Verbreitung derartiger Assistenzsysteme in LKW kann schon allein aus Gründen der Verkehrssicherheit als sehr wahrscheinlich gelten. Besonders große Effekte sind durch das Platooning zu erwarten, das jedoch nur auf Autobahnen für LKW relevant sein wird. Werden einzelne LKW zu solchen Konvois verbunden, können durch engere Abstände und damit verbundene Windschatteneffekte rund 7 % Kraftstoff eingespart werden (Daimler 2017). Andere Studien halten auch Einsparungen von bis zu 20 % für möglich (Robinson 2010; Klaußner 2013). Bei batterieelektrischen Antrieben ist ein geringerer Energieverbrauch gleichbedeutend mit einer höheren Reichweite und einer längeren Einsatzzeit.

**Instandhaltungskosten**

Durch kontinuierliche On-board-Datenanalyse und vernetzte Fahrzeugkomponenten können Schäden frühzeitig erkannt („Predictive Maintenance“) und Instandhaltungskosten gesenkt werden. Die entsprechenden Systeme sind in der Lage, die Performance bestimmter Komponenten (z. B. Bremsen und Stoßdämpfer) und die Fahreigenschaften insgesamt (z. B. Beschleunigung) schon auf kaum merkliche Anomalien hin zu überwachen. Treten diese auf, können dafür einzelne beeinträchtigte Komponenten mit Verschleißerscheinungen identifiziert werden. Deren frühzeitiger Aus-

tausch verhindert, dass andere Teile in Mitleidenschaft gezogen werden. In einer Studie zu den Potenzialen des „Digitized Trucking“ geht PwC davon aus, dass allein durch derartige vernetzte Wartungssysteme die Reparaturkosten eines LKW um 5 % gesenkt werden können, wenn besonders wartungsintensive und teure Komponenten wie z. B. Getriebe frühzeitig getauscht würden (PwC 2016). Zu bedenken ist dabei aber, dass sich derartige Teile nicht bei elektrischen Antrieben finden; hier muss daher von geringeren Kostenreduktionspotenzialen bei der Wartung ausgegangen werden.

**Personalkosten**

Auch ein besonders bedeutender Kostenblock bei den TCO wird perspektivisch von autonomen Fahrzeugen beeinflusst: Durch einen (auch zeitweisen) Wegfall des Fahrers würden die Personalkosten des Fahrzeugbetriebs stark gesenkt; bei vollautonomen Fahrzeugen könnte diese Reduktion bis zu 100 % betragen. An dieser Stelle muss aber darauf hingewiesen werden, dass der aktuelle Rechtsrahmen eine derart weitgehende Automatisierung bislang nicht zulässt. Allenfalls im nicht öffentlichen Bereich (Baustellen, Werksgelände, land- und forstwirtschaftliche Flächen) ist denkbar, dass bis 2030 vollautonome Fahrzeuge eingesetzt werden. Darüber hinaus ist durchaus möglich, dass Fahrer auf Autobahnen bis 2030 weitgehend von der Fahraufgabe entbunden werden. Derartige Systeme sind unter Namen wie „AutobahnpiLOT“ schon heute sowohl in PKW als auch in LKW verfügbar (z. B. Tesla Model S oder Mercedes Future Truck). Vor diesem Hintergrund geht z. B. (McKinsey 2016) davon aus, dass 2025 jeder dritte verkaufte LKW bereits teilautonom sein wird. Bislang ist es aber noch die rechtliche Pflicht des Fahrers, den Verkehr permanent zu überwachen; er ist somit keinesfalls ersetzbar. Es bleibt abzuwarten, wie sich diesbezüglich der rechtliche Rahmen weiter entwickeln wird und ob eine Entbindung von der Fahraufgabe zu Kostenreduktionen führen wird, wenn sich Fahrer beispielsweise im autonomen Betrieb anderen Tätigkeiten (z. B. Bearbeitung von Lieferpapieren oder Kundenkontakt) widmen können. Eine weitere Möglichkeit könnte darin bestehen, dass automatisiert zurückgelegte Strecken von Lenkzeitenbeschränkungen ausgenommen werden. Auch dies würde eine Reduzierung der Personalkosten bedeuten.

Für die betrachteten Segmente wäre unter diesen Annahmen von folgenden möglichen Effekten bei den TCO auszugehen.

Fahrzeugkategorie	Verbrauch	Wartung	Personalkosten
Schwere Transporter	Durch Fahrerassistenzsysteme Energieeinsparungen von 2 % denkbar (euroFOT2012)	Bis zu 5 % weniger (PwC 2016)	Keine, da nur kurze Strecken auf Autobahnen
Schwere LKW	In Platoons auf Autobahnen bis zu 20 % weniger (Robinson 2010)		Keine direkten; je nach Rechtslage könnten aber die zulässigen Lenkzeiten auf Autobahnen verlängert werden
Stadtbus	Durch Fahrerassistenzsysteme Energieeinsparungen von 2 % denkbar (euroFOT2012)		Keine, von vollautonomen Bussen auf eigenen Fahrspuren wird bis 2030 nicht ausgegangen
Radlader	Die Verbräuche bei Radladern schwanken im Betrieb je nach Fahrweise um bis zu 40 %. ein vollautonomer Betrieb könnte daher durch optimierte Fahrweise potenziell bis zu 40 % einsparen		Bis zu 100 % bei vollautonomem Einsatz
Abfallsammelfahrzeug	Durch Fahrerassistenzsysteme Energieeinsparungen von 2 % denkbar (euroFOT2012)		Unter der Annahme, dass Rangieren vollautonom geschehen könnte, könnte eine von drei Arbeitskräften eingespart werden

Tabelle 14: Angenommene TCO-Effekte durch Digitalisierung bis 2030

Es ist darauf hinzuweisen, dass alle diese Effekte mehr oder weniger unabhängig vom Antrieb wirken. Auch wenn sich im Detail kleinere Verschiebungen bei den TCO ergeben können (z. B. sind die Wartungskosten und damit auch die Ersparnis

bei der Wartung von Dieselantrieben höher), sind diese zu vernachlässigen und wurden daher nicht in die Berechnungen einbezogen.

**Kernaussagen Kapitel 6**

Aktuell sind Nullemissionsantriebe in keinem der betrachteten Segmente bezogen auf die reinen TCO eine wirtschaftliche Alternative zum Diesel. Hauptgrund dafür sind die heute noch deutlich höheren Anschaffungspreise dieser Fahrzeuge. Im Jahr 2030 kann aber in manchen Segmenten der Break-even-Punkt unter bestimmten Voraussetzungen durchaus erreicht werden. Dies liegt an stark sinkenden Anschaffungskosten der Fahrzeuge, wenn diese nicht mehr als „Einzelstücke“ gefertigt, sondern in hohen Stückzahlen produziert

werden. Beim Wasserstoff sind zudem erhebliche Kostendegressionen zu erwarten, wenn dieser im industriellen Maßstab mittels Elektrolyse hergestellt werden kann.

Auch aus den heute bereits feststellbaren Digitalisierungstendenzen des Verkehrs sind weitere Senkungen der TCO zu erwarten. Diese Effekte greifen jedoch weitgehend antriebsunabhängig, sodass eine erhöhte Wirtschaftlichkeit der Nullemissionsantriebe hierdurch kaum zu erwarten ist.





**07**

**Ressourcen- und Energieverbrauch,  
Treibhausgasemissionen  
(WtW)**

# 07

Ressourcen- und Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen (WtW)



Neben dem ökonomischen Vergleich wurden auch die Umweltauswirkungen der emissionsfreien Antriebsvarianten denen der konventionellen Fahrzeuge gegenübergestellt. Die Bewertung der Umweltrelevanz erfolgte mittels einer Well-to-Wheel-Betrachtung (WtW-Betrachtung, „von der Quelle bis zum Rad“) über den gesamten Lebenszyklus, d. h. von der Rohstoffgewinnung bis zum Einsatz im Fahrzeug. Dabei gingen neben dem direkten Rohstoffeinsatz auch die relevanten Hilfsprodukte und der Herstellungsprozess der Komponenten sowie die mögliche Wiederverwertbarkeit der Rohstoffe am Ende der Produktlebensdauer in die Betrachtung ein. Die WtW-Analyse beruht auf dem für den jeweiligen Fahrzeugtyp erforderlichen Materialeinsatz. Da BEV und FCEV nur auf Basis der direkten Schadstoffemissionen beim Fahrbetrieb emissionsfrei sind, müssen insbesondere auch die Vorketten zur Her- und Bereitstellung der eingesetzten Energieträger berücksichtigt werden. Die Wartung der Fahrzeuge wird über eine Abschätzung der erforderlichen Austauschteile ebenfalls mitberücksichtigt. Am Lebensende der Fahrzeuge (End-of-Life) gehen die Aufwendungen der Verwertung in die Betrachtung ein, es erfolgt jedoch wie bei Ökobilanzen in der Automobilindustrie üblich keine Materialgutschrift für die Wiederverwertung der Rohstoffe.

In Kapitel 7.1 erfolgt eine Beschreibung der eingesetzten kritischen Rohstoffe. In Kapitel 7.2 werden zunächst grundsätzlich die Energieeffizienz und der erforderliche Primärenergiebedarf der betrachteten Antriebskonzepte verglichen, bevor anschließend in Kapitel 7.3. auf die Umweltwirkungen der Energieträgerbereitstellung eingegangen wird. In den darauf folgenden Unterkapiteln 7.4–7.8 werden die Ergebnisse für die Beispielfahrzeuge dargestellt.

Für die WtW-Betrachtung wurden jeweils die angenommenen Technologieparameter für das Jahr 2030 und die aufgrund von Effizienzsteigerungen gesunkenen Verbräuche zugrunde gelegt. Für den Materialeinsatz wurde die Kategorisierung nach VDA vorgenommen.

## 7.1 Kritische Rohstoffe

Die Antriebskonzepte der emissionsfreien Nutzfahrzeuge basieren auf Komponenten wie der Fahrzeugbatterie und dem elektrischen Motor, die sowohl in BEV als auch von FCEV genutzt werden, sowie der Brennstoffzelle im Fall von FCEV. Für diese Komponenten sind einige Rohstoffe notwendig, die bislang nur in deutlich geringeren Mengen eingesetzt wurden, als sie bei einer Marktdurchdringung der Elektromobilität erforderlich sind.

Moderne Fahrzeugbatterien nutzen nahezu allesamt die Lithium-Ionen-Technologie. Lithium und der Frage nach dessen zukünftiger Verfügbarkeit wird daher große Beachtung geschenkt. Für die Anode wird in der Regel Graphit genutzt, das aus natürlichen Vorkommen gewonnen oder auch synthetisch erzeugt werden kann. Für die Kathode werden unterschiedliche Materialmischungen verwendet, wobei aktuell insbesondere Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (Li-NiMnCo, auch als Li-NMC bezeichnet), Lithium-Eisenphosphat (Li-FePO<sub>4</sub>) oder auch Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium (Li-NiCoAl) eingesetzt werden. Li-NMC ist aktuell die vorherrschende Chemie für Elektro- und Hybridfahrzeuge in Europa, während in chinesischen Modellen bevorzugt Li-FePO<sub>4</sub>-Batterien eingesetzt werden. Eine Übersicht über die derzeit hauptsächlich verwendeten Batterietechnologien bei batterieelektrischen (BEV) und Plug-in-Hybrid-PKW (PHEV) gibt Tabelle 15.

BEV-Modell	PHEV-Modell	Verkaufte Fahrzeuge	Batteriechemie
Tesla Model S		50.935	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid
Nissan Leaf		49.818	Lithium-Mangan-Kobaltoxid/Lithium-Manganoxid
	BYD Tang	31.405	Lithium-Eisenphosphat
	Chevrolet Volt	28.295	Lithium-Mangan-Kobaltoxid
	Mitsubishi Outlander	27.850	Lithium-Eisenphosphat
BMW i3 BEV		25.576	Lithium-Mangan-Kobaltoxid
Tesla Model X		25.372	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid
	BYD Qin PHEV	21.686	Lithium-Eisenphosphat
Renault Zoe		21.626	Lithium-Mangan-Kobaltoxid/Lithium-Manganoxid
BYD e6		20.609	Lithium-Eisenphosphat

Tabelle 15: Batteriechemie der meistverkauften BEV und PHEV 2016 (Romare and Dahllöf 2017)

Zahlreiche Veröffentlichungen befassen sich mit der Abschätzung der zukünftigen Verfügbarkeit bzw. der Verknappung von relevanten Rohstoffen; sie vergleichen den prognostizierten Bedarf mit den heute bekannten Reserven und Ressourcen der Rohstoffe.<sup>12</sup> Hierbei sind die Annahmen zur Bedarfsentwicklung ebenso wie zu Recyclingverfahren mit den entsprechenden Wiedergewinnungsquoten wichtige Grundlagen der Berechnungen.

### Lithium

Obwohl gemäß den Prognosen der Bedarf an Lithium in Zukunft deutlich steigt, wird die Gefahr seiner Verknappung angesichts der verfügbaren geologischen Ressourcen in der Regel nicht gesehen (Angerer 2009a; Konietzko 2011; Reuter 2016).

### Kobalt

Zu einer anderen Einschätzung kommen die Untersuchungen bezüglich der Verwendung von Kobalt. Dessen Reserven und Ressourcen könnten sich nach dem derzeitigen Kenntnisstand abhängig von der Verbreitung elektrischer Fahrzeuge und der darin verwendeten Batterietechnologie als limitierende Faktoren für die Batterieproduktion erweisen.

So sind in aktuellen Li-NMC-Batterien mehrere hundert Gramm Kobalt je kWh enthalten (Konietzko 2011; Reuter 2016; Romare and Dahllöf 2017). Tabelle 16 spiegelt die spezifische Materialzusammensetzung einer Lithium-NMC-Batterie wider, abgeleitet von einer 253 kg schweren Batterie mit einer Kapazität von 26,6 kWh.



<sup>12</sup> | Unter dem Begriff „Reserven“ werden Lagerstätten zusammengefasst, die zum heutigen Zeitpunkt und entsprechend der heutigen Preislage wirtschaftlich abbaubar sind. Zu den Reserven zählen ebenfalls Lagerstätten, die bereits heute oder möglicherweise in der Zukunft wirtschaftlich abbaubar sein können. Ein steigender Rohstoffpreis führt zu dem Effekt, dass bislang unrentable Lagerstätten wirtschaftlich abbaubar werden; steigende Rohstoffpreise können folglich eine Zunahme der Reserven induzieren. Die Menge der Ressourcen wird im Allgemeinen hingegen nicht von der Preisentwicklung beeinflusst.

Rohstoff	Spezifischer Materialanteil (kg/kWh)	Rohstoff	Spezifischer Materialanteil (kg/kWh)
Aluminium sekundär	1,77	Lithiumcarbonat aus Sole	0,60
Aluminium primär	1,77	Lithiumhexafluorophosphat	0,11
Ruß	0,11	Mangan	0,53
Kobalt	0,53	Nickel	0,53
Kupfer primär	1,43	N-Methylpyrrolidon (NMP)	0,86
Kupfer sekundär	1,43	Polyvinylidenfluorid	0,15
Ethylencarbonat	0,79	Polypropylen	0,79
Graphit	0,90	Stahl (niedriglegiert)	1,28

Tabelle 16: Materialzusammensetzung einer Lithium-NMC-Batterie (Datengrundlage: (Romare and Dahllöf 2017))

Unter der Annahme, dass die Hälfte der rund 78.000 Busse in Deutschland (siehe Kapitel 2.1) zukünftig als Nullemissionsfahrzeuge betrieben werden, die jeweils mit einer Batteriekapazität von 250 kWh analog Tabelle 10 ausgestattet werden, ergibt dies eine Batteriekapazität von insgesamt 19.500 MWh. Mit der in Tabelle 16 dargestellten spezifischen Materialzusammensetzung ergibt sich nur für die Elektrifizierung von 50 % der deutschen Busflotte somit ein Kobaltbedarf von gut 10.000 t. Dieser entspricht über 10 % der jährlichen Weltproduktion an Kobalt (CDI 2016). Obwohl bedeutende weitere Vorkommen angenommen werden, sind daher verfügbare Technologiealternativen stets zu berücksichtigen.

Hinzu kommt die monopolistische Versorgungssituation mit Kobalt, die von einigen Untersuchungen als kritisch eingestuft wird, da die Hälfte des weltweit genutzten Rohstoffs aus dem Kongo stammt (EC 2014; USGS 2017; vbw 2011). Die schwierige politische Lage im Kongo und die lokalen Arbeitsbedingungen gelten zudem als problematisch (Reuter 2016) und können ein Versorgungsrisiko darstellen (Denkwerk 2010).

#### Neodym und Dysprosium

Im Bereich der Elektromotoren kommt der Verwendung von Permanentmagneten aus Eisen-Neodym-Bor eine besondere Bedeutung zu. Die genannten Magnete kommen in Elek-

tromotoren, genauer gesagt in permanent erregten Synchronmotoren (PSM), zum Einsatz und beinhalten meist mehrere der sogenannten Seltenerdmetalle. Diese werden in leichte und schwere Seltenerdmetalle unterteilt, wobei die leichten in deutlich größeren Mengen geologisch verfügbar sind als die schweren (Schüler 2011). Neben dem bereits genannten Neodym, das zu den leichten Seltenerdmetallen gehört, wird für gewöhnlich in geringerer Menge auch Dysprosium in die Legierung eingebracht, insbesondere um die Temperaturwiderstandskraft der Magnete zu erhöhen. In Summe beträgt ihr massenmäßiger Anteil in Permanentmagneten deutlich mehr als 20 %. Da die erforderlichen Daten zu den geologischen Vorkommen häufig nicht für die einzelnen Seltenerdmetalle, sondern nur für alle Seltenerdmetalle erhältlich sind, behandeln viele Untersuchungen der zukünftigen Verknappung die Gruppe als Ganzes. Das Ergebnis ist, dass entgegen dem Namen dieser Elemente die Gefahr einer geologischen Verknappung der Seltenerdmetalle äußerst gering ist (Bradshaw 2013; Reuter 2016). Deutlich bedenklicher ist die monopolistische Versorgungssituation mit Seltenerdmetallen, die heutzutage zu mehr als 80 % aus China stammen, sodass ein ernstzunehmendes Risiko für Versorgungsengpässe bestehen könnte (Buchert 2011; EC 2014; bw 2011).



Auch die Versorgungsstruktur von Platin, das in Brennstoffzellen und Elektrolyseuren verwendet wird, wird zusammen mit den weiteren Platingruppenmetallen in vielen Untersuchungen als bedenklich eingestuft, da es von nur wenigen Ländern bzw. Firmen auf dem Markt angeboten wird. Das Risiko einer geologischen Verknappung wird hingegen als wenig kritisch betrachtet. Hier stehen sich zwei gegenläufige Entwicklungen günstig gegenüber: Der Bedarf an Platin nimmt für die in Zukunft verwendeten Brennstoffzellen zu, wohingegen der Bedarf an Platin für Katalysatoren von Verbrennerfahrzeugen abnehmen wird (acatec 2017; Buchert 2011; denkwerk 2010; EC 2014; vbw 2011).

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass für Platin und die zur Platinmetallgruppe gehörenden Metalle wie z. B. Palladium und Ruthenium aufgrund ihres wirtschaftlichen Wertes bereits ein etabliertes System für die Rückgewinnung zur Verfügung steht. Edelmetallhaltige Stoffströme ergeben sich beispielsweise in der Automobilindustrie über die aus der Fahrzeugverwertung stammenden Abgaskatalysatoren sowie aus der Schmuckindustrie und der Medizintechnik.

Für andere in Batterien verwendete Metalle besteht ein gewisses Risiko der geologischen Verknappung; der Bedarf an diesen Metallen zur Produktion von Fahrzeugbatterien ist jedoch eher gering (Reuter 2016).

#### Entwicklungen im Hinblick auf die Ressourcenverfügbarkeit

Vonseiten der Batteriehersteller gibt es Bestrebungen, den Kobaltanteil deutlich zu senken bzw. Kobalt z. B. durch Aluminium vollständig zu ersetzen. So enthalten bisherige Generationen von Li-NMC-Batterien Kathoden, bei denen Nickel, Mangan und Kobalt ungefähr im gleichen Mengenverhältnis (1:1:1) eingesetzt wurden (wie in Tabelle 16 gezeigt). Bei aktuellen Generationen beläuft sich das Verhältnis auf 3:1:1 und neuere Forschungen zielen darauf ab, den Kobaltanteil durch eine nochmalige Verschiebung Richtung Nickel bis zu einem Verhältnis von 8:1:1 weiter zu vermindern.

Wenn es zu einem Versorgungsengpass bei Kobalt mit einem entsprechenden Preisanstieg kommen sollte, können alternativ beispielsweise Li-FePO<sub>4</sub>-Batterien eingesetzt werden. Ähnlich ist es auch bei Elektromotoren: Asynchronmotoren benötigen keine Permanentmagnete, sondern lediglich Eisenwerkstoffe, Aluminium und Kupfer. Häufig haben die Technologiealternativen jedoch aktuell noch technische Nachteile. So ist die Energiedichte von Li-FePO<sub>4</sub>-Batterien geringer als die von Li-NMC-Batterien, was ein höheres Batteriegewicht zur Folge hat, und auch ein Asynchronmotor ist in aller Regel schwerer als die Option mit Permanentmagneten.

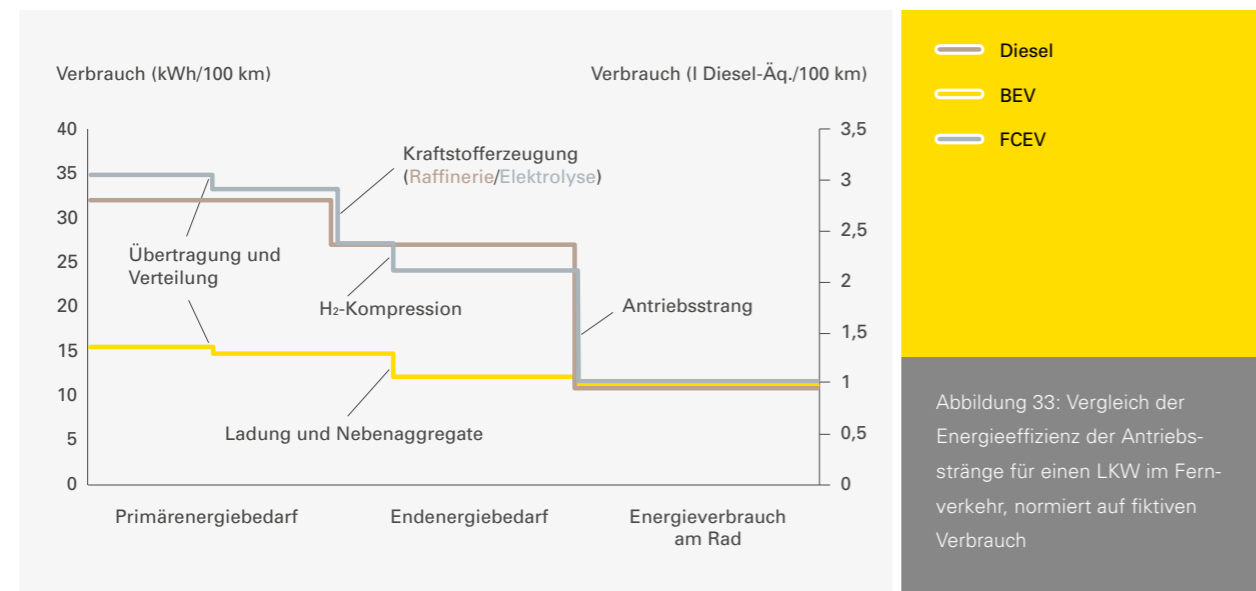
Bei Brennstoffzellen liegt ein Entwicklungsschwerpunkt auf der weiteren Reduktion des spezifischen Platinbedarfs je kW Leistung. Wird für aktuelle FCEV ein Platineinsatz unter 1 g/kW genannt, äußern sich Automobilhersteller zuversichtlich, in absehbarer Zeit den Platinbedarf eines FCEV so weit zu reduzieren, dass er in der Größenordnung des derzeitigen Platineinsatzes bei PKW mit Verbrennungsmotoren, der sich üblicherweise im Bereich 5–10 g bewegt, liegt (Creamer 2017). Dementsprechend ergibt sich für den hier untersuchten Zeithorizont 2030 ein Platinanteil in Brennstoffzellen von 0,1 g/kW; das entspricht 10 % des heutigen Anteils.

### 7.2 Energieeffizienz der Antriebsstränge

Mit den zusätzlichen Umwandlungen, die für den Betrieb eines Brennstoffzellenfahrzeugs mit Wasserstoff aus Elektrolyse notwendig sind (Umwandlung von elektrischem Strom zu Wasserstoff, der in der Brennstoffzelle wiederum zu elektrischem Strom umgewandelt wird), sind deutliche Wandlungsverluste verbunden. Bei der direkten Nutzung von Strom liegt der Wirkungsgrad der Gesamtkette damit in der Regel deutlich höher als bei der Verwendung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle.

In Abbildung 33 sind die Energiebilanzen für die verschiedenen Antriebsvarianten beispielhaft für einen LKW im Fernverkehr gegenübergestellt. Dabei wurde der technologische Fortschritt in Form entsprechender Wirkungsgradverbesserungen bei den Motoren wie auch bei der Herstellung der Energieträger berücksichtigt. Alle Angaben wurden auf einen fiktiven Energieverbrauch am Rad von 1 l Dieseläquivalent<sup>13</sup>/100 km normiert.

Es zeigt sich, dass für den Brennstoffzellenantrieb mit dem 3,0-fachen des Energiebedarfs am Rad ein ähnlicher Primärenergieeinsatz erforderlich ist wie für den Dieselantrieb (Faktor 2,9). Unter der Voraussetzung von 100 % erneuerbarer Energie für die Stromerzeugung, für die definitionsgemäß ein Wirkungsgrad von 1 angesetzt wird, ergibt sich für den batterieelektrischen Antrieb lediglich der 1,4-fache Primärenergie-



13 | Ein Liter Dieseläquivalent entspricht dem Energieinhalt (Heizwert) von einem Liter Diesel. Dieser beträgt für den aktuellen Diesel B6 (Biodieselanteil von knapp 6 %) 9,92 kWh/l Dieselkraftstoff.

einsatz. Damit verbraucht der Elektroantrieb im Vergleich zu den anderen Antriebsvarianten weniger als die Hälfte an Primärenergie. Bei der vergleichenden Betrachtung des Verbrauchs unterschiedlicher Antriebstechnologien ist zu berücksichtigen, dass Dieselmotoren im Fernverkehr eine sehr hohe Effizienz aufweisen, die bei anderen Fahrzeugsegmenten oder Anwendungen aufgrund häufiger und hoher Lastschwankungen zum Teil deutlich geringer anzusetzen ist. Die Energiebilanzen fallen daher je nach Anwendungsfall entsprechend unterschiedlich aus, was sich bei der Gegenüberstellung der Endenergiebedarfe der betrachteten Beispielsektoren in Abbildung 34 zeigt. Dargestellt ist der Endenergiebedarf, also das Energieäquivalent in kWh der verbrauchten Energieträger Diesel, Strom und Wasserstoff, jeweils für die konventionelle und die emissionsfreie Antriebsvariante. Für 2030 wurde ein Dieselmix mit einem gegenüber heute erhöhten Anteil von 10,8 % Biodiesel (Diesel B11, siehe auch Kapitel 7.3) und einem Energieinhalt von 9,89 kWh/l zugrunde gelegt, für Wasserstoff von 33,33 kWh/kg.

Es wird deutlich, dass die Endenergieverbräuche des schweren LKW auf der Langstrecke in beiden Varianten eng zusammenliegen und der Diesel mit nur 15 % einen besonders geringen Mehrbedarf an Endenergie gegenüber dem Brennstoffzellenfahrzeug aufweist. Der mit Abstand höchste Mehrbedarf tritt beim Radlader auf, der mit Dieselmotor etwa die 7,0-fache Endenergie wie mit batterieelektrischem

Antrieb benötigt; er ist damit in der BEV-Variante besonders energieeffizient. Für die anderen Beispielsegmente liegt der Endenergiebedarf an Diesel um den Faktor 2,3–2,9 über der jeweiligen emissionsfreien Variante.

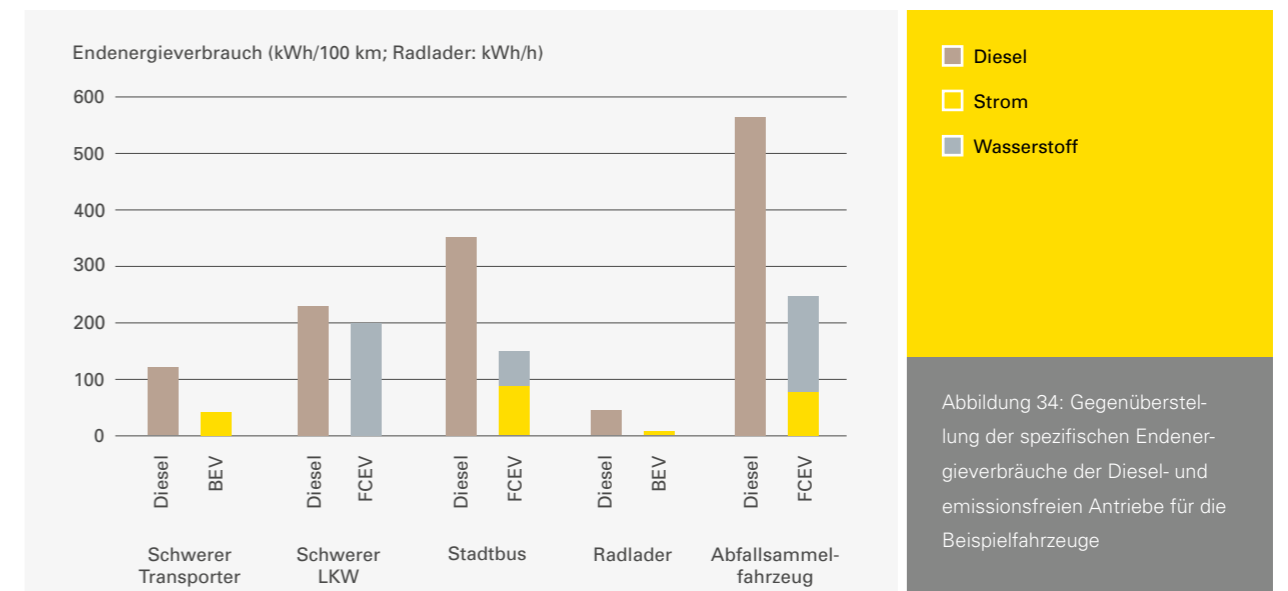
### 7.3 Umweltwirkungen der Energieträgerbereitstellung

Im folgenden Kapitel wird der Fokus auf die Emission von Treibhausgasen (THG) gelegt, die bei der Erzeugung von Strom und Wasserstoff verursacht werden.

#### Stromerzeugung

Nach Angaben des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg (StaLa BW 2017) setzt sich 2015 die Stromerzeugung im Land wie in Abbildung 35 dargestellt zusammen: Knapp 40 % entfallen auf fossile Kraftwerke, wovon ca. 32 % Steinkohle und rund 5 % Erdgas nutzen. Gut ein Drittel des Gesamtstroms wird aus CO<sub>2</sub>-neutraler Kernenergie (35,1 %) gewonnen und knapp ein Viertel stammt aus erneuerbaren Energien.

Dieser Stromerzeugungsmix führt zu einem THG-Emissionsfaktor von 421 g CO<sub>2</sub>e/kWh Strom inkl. Energieträgerbereitstellung.



Entsprechend dem Integrierten Energie- und Klimakonzept für Baden-Württemberg (IEKK 2014) wird für das Jahr 2030 ein Stromerzeugungsmix ohne Nuklearenergie und mit redu-

ziertem Steinkohleanteil, dafür mit einem deutlich gesteigerten Erzeugungsanteil aus erneuerbaren Energien und auch Erdgas angenommen (siehe Abbildung 36).

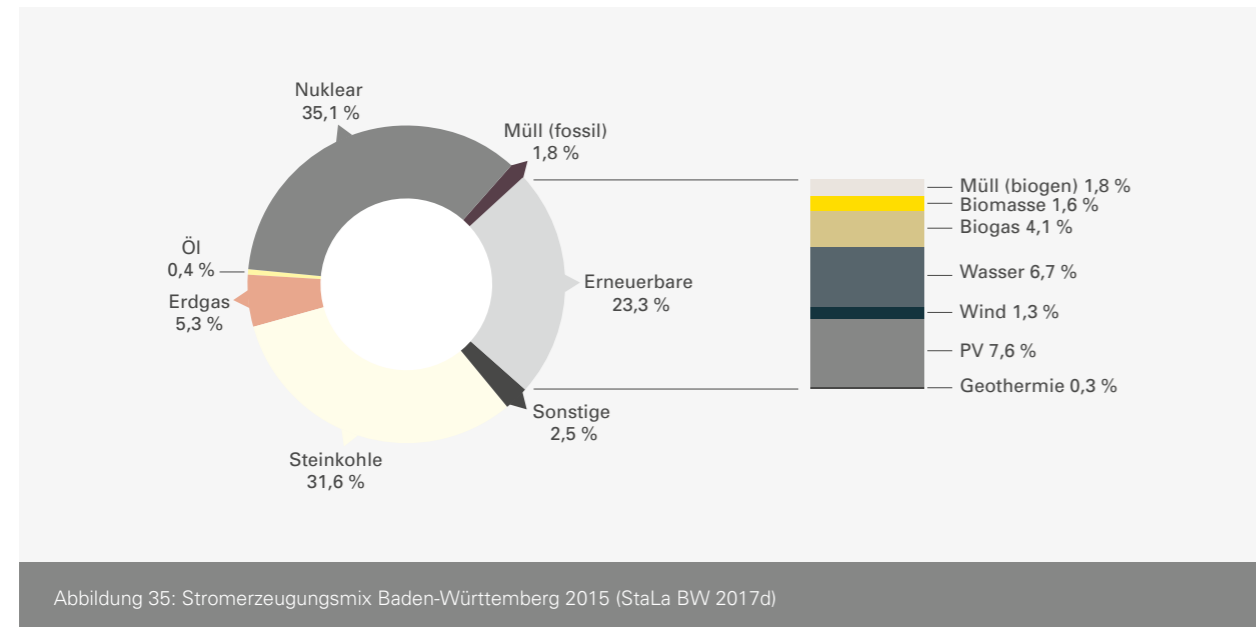


Abbildung 35: Stromerzeugungsmix Baden-Württemberg 2015 (StLa BW 2017d)

Entsprechend sinken 2030 die THG-Emissionen der Stromerzeugung in Baden-Württemberg auf 192 g CO<sub>2</sub>e/kWh. In Abbildung 37 sind für das Bezugsjahr 2030 die THG-Emissionen je kWh aus dem prognostizierten Strommix, dem erneuerbaren Anteil am Strommix in Baden-Württemberg (mit EE-Mix bezeichnet) und schließlich die THG-Emissionen der Stromerzeugung aus einzelnen ausgewählten erneuerbaren Energien ausgewiesen.

ren Anteil am Strommix in Baden-Württemberg (mit EE-Mix bezeichnet) und schließlich die THG-Emissionen der Stromerzeugung aus einzelnen ausgewählten erneuerbaren Energien ausgewiesen.

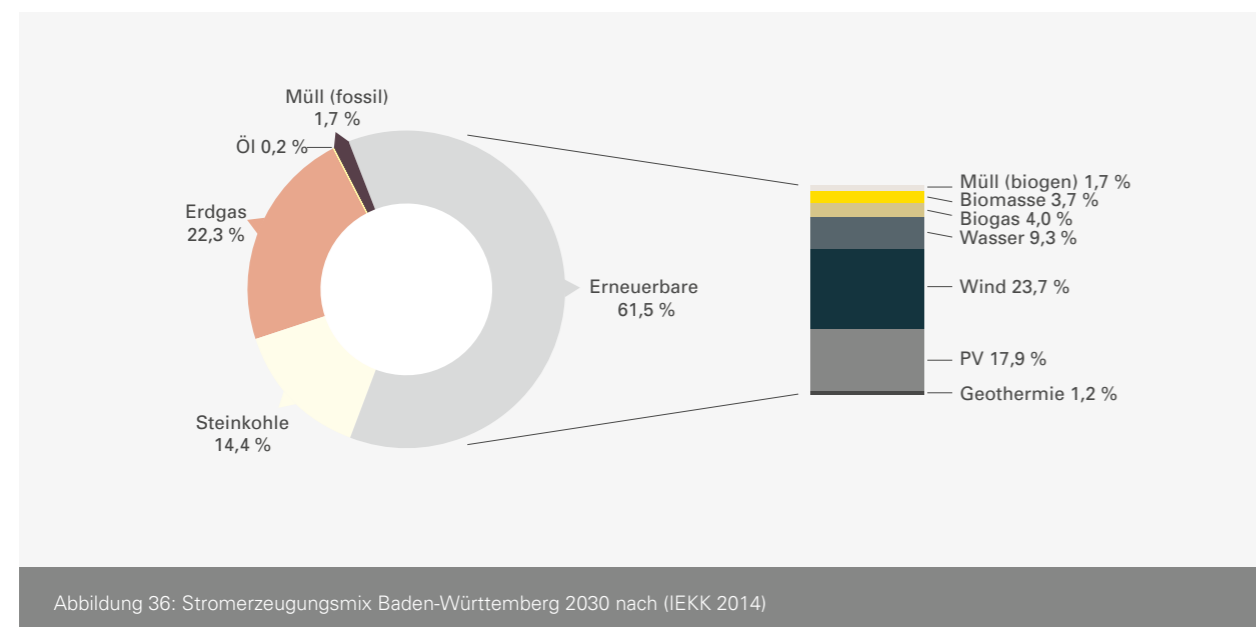


Abbildung 36: Stromerzeugungsmix Baden-Württemberg 2030 nach (IEKK 2014)

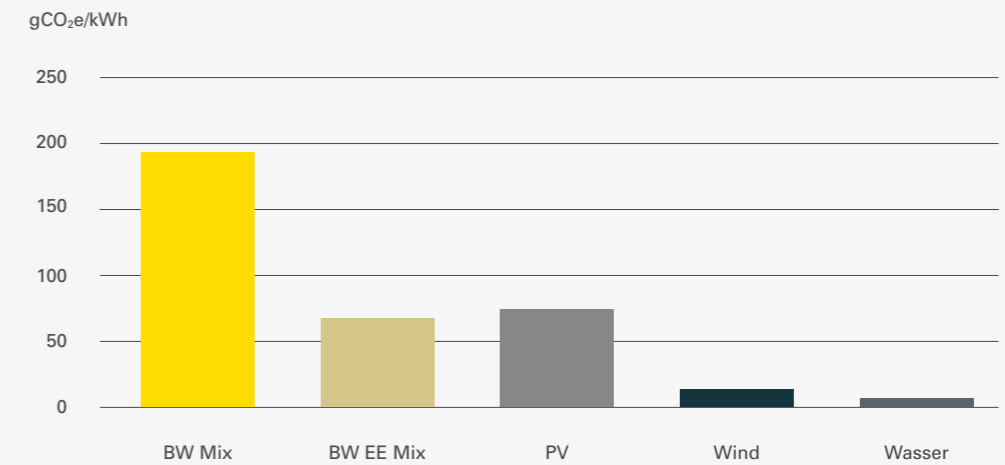


Abbildung 37: THG-Emissionen aus der Stromerzeugung in Baden-Württemberg 2030 nach (IEKK 2014)

Wird Strom aus ausschließlich erneuerbaren Energien eingesetzt, sinken die THG-Emissionen für den EE-Mix um ca. zwei Drittel. Kommen Wind- oder Wasserkraft zum Einsatz, liegen die THG-Emissionen nochmals deutlich niedriger. Bei der Stromerzeugung aus Sonnenenergie mittels Photovoltaik ergeben sich etwas höhere THG-Emissionen aufgrund der energieintensiven Produktion der eingesetzten Halbleitermaterialien wie multi- und monokristallines Silizium, die mehrheitlich in China stattfindet.

Im Hinblick auf die Zielsetzung der Studie und um das maximale Potenzial der emissionsfreien Antriebe zu demonstrieren, wurde im Gegensatz zum Strommix nach (IEKK 2014) für diese Studie eine Stromerzeugung vollständig aus erneuerbaren Energien unterstellt. Die angenommenen Anteile der Primärenergieträger an der Stromerzeugung sind in Abbildung 38 dargestellt. Damit ergibt sich für Strom ein THG-Emissionsfaktor von 48 g CO<sub>2</sub>e/kWh, was im Vergleich zum baden-württembergischen Strommix 2015 einer Reduktion der THG-Emissionen um 88 % entspricht.

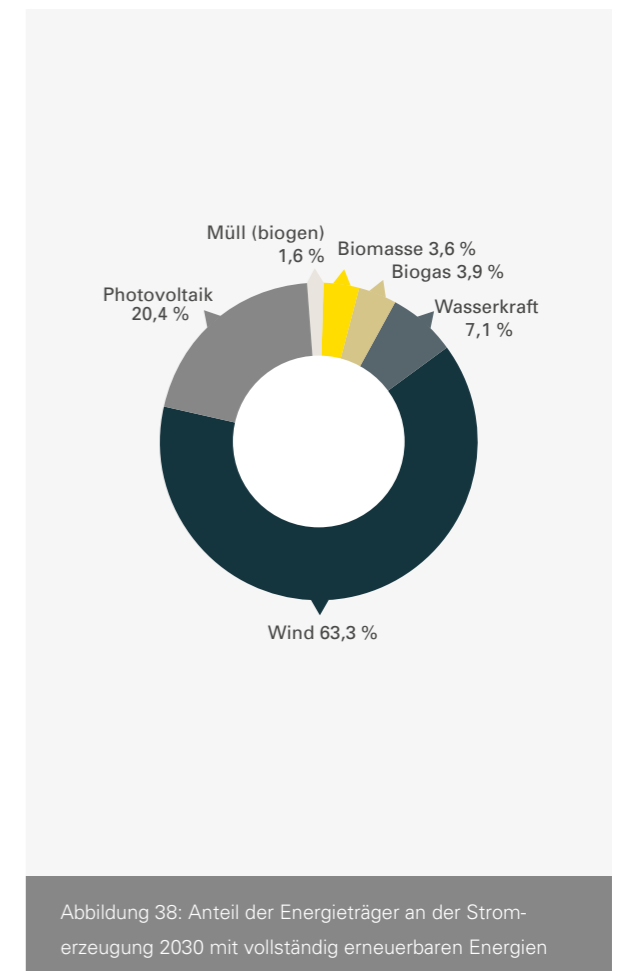


Abbildung 38: Anteil der Energieträger an der Stromerzeugung 2030 mit vollständig erneuerbaren Energien

### Wasserstoffproduktion

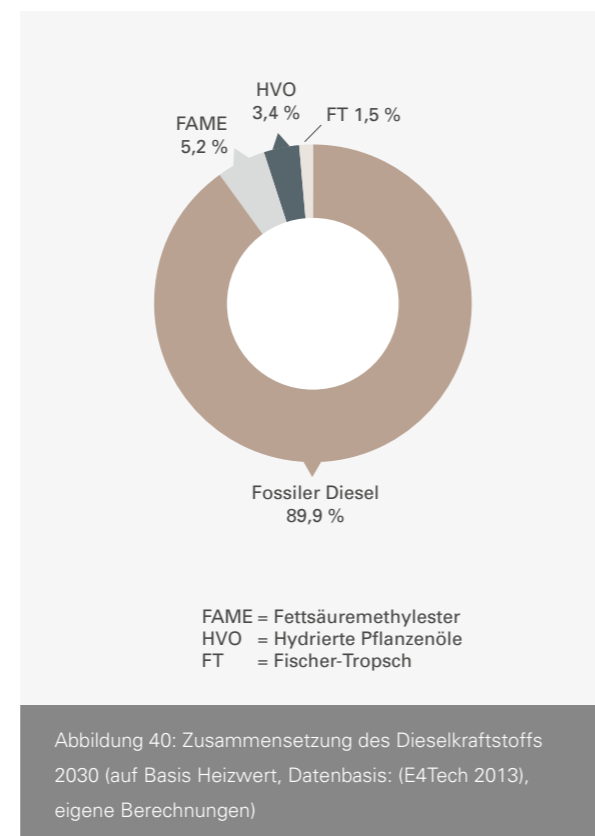
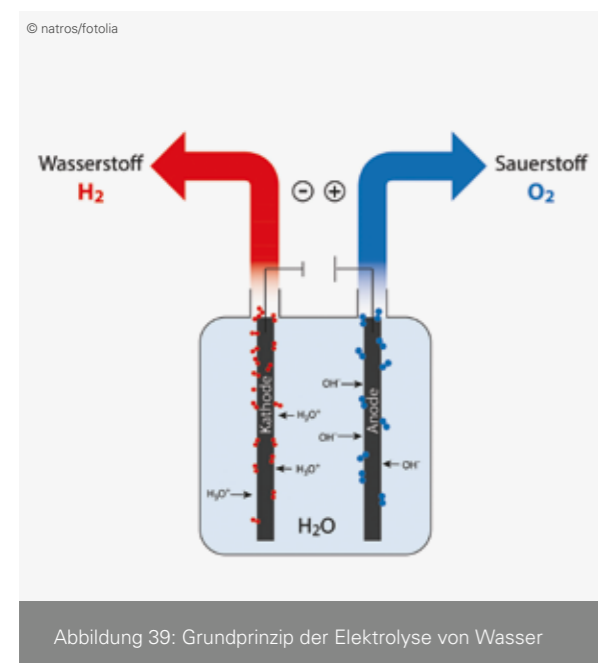
Die großtechnische Herstellung von Wasserstoff erfolgt heute üblicherweise mittels Dampfreformierung, bei der in der Regel Erdgas mit Wasserdampf in einem Reaktor zu Wasserstoff umgewandelt wird.<sup>14</sup> Zur Nutzung im Fahrzeug muss der Wasserstoff dann noch auf das erforderliche Druckniveau komprimiert oder verflüssigt werden. Die THG-Emissionen des so hergestellten Wasserstoffs einschließlich Komprimierung betragen ca. 13 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub> (Berechnung auf Basis von (NBF 2017a)).

Eine weitere Technologie zur Wasserstoffherzeugung ist die Elektrolyse, bei der elektrischer Strom genutzt wird, um Wasser in die Produkte Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten. Im Fall einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ist diese Art der Wasserstoffherstellung klimaneutral. Für die vorliegende Studie wurde daher unterstellt, dass der Wasserstoff elektrolytisch erzeugt wird. Damit hängen die ökologischen Auswirkungen des Fahrbetriebs sowohl für BEV als auch für FCEV ausschließlich davon ab, welche Primärenergieträger zur Stromerzeugung eingesetzt werden.

Bei der Erzeugung von Wasserstoff aus Elektrolyse mittels des derzeitigen baden-württembergischen Strommixes liegen die THG-Emissionen für die Herstellung und Kompressi-

on von Wasserstoff bei ca. 21 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub> und damit deutlich über denen von Wasserstoff aus der Dampfreformierung. Wird der vollständig auf erneuerbaren Energien basierende Strommix gemäß Abbildung 38 für die elektrolytische Wasserstoffherstellung verwendet, beträgt der daraus resultierende THG-Emissionsfaktor 2,976 kg CO<sub>2</sub>e/kg H<sub>2</sub>; das sind 75 % weniger als mittels Dampfreformierung und gut 88 % weniger als mit dem aktuellen baden-württembergischen Strommix. Wird bei der H<sub>2</sub>-Produktion aus Dampfreformierung Biomethan und grüner Strom für die Kompression eingesetzt, fallen die damit verbundenen THG-Emissionen mit weniger als 4 kg CO<sub>2</sub>e/kg H<sub>2</sub> in einer vergleichbaren Größenordnung aus.

Für die Ermittlung der mit dem Dieserverbrauch der konventionellen Fahrzeuge einhergehenden THG-Emissionen wurde der in Abbildung 40 dargestellte Diesel B11 mit einem erhöhten Biodieselanteil von 10,8 % entsprechend (E4Tech 2013) zugrunde gelegt. Der resultierende THG-Emissionsfaktor einschließlich der Vorketten zur Produktion der Biodieselanteile beträgt 2,818 kg CO<sub>2</sub>e/l Diesel B11.



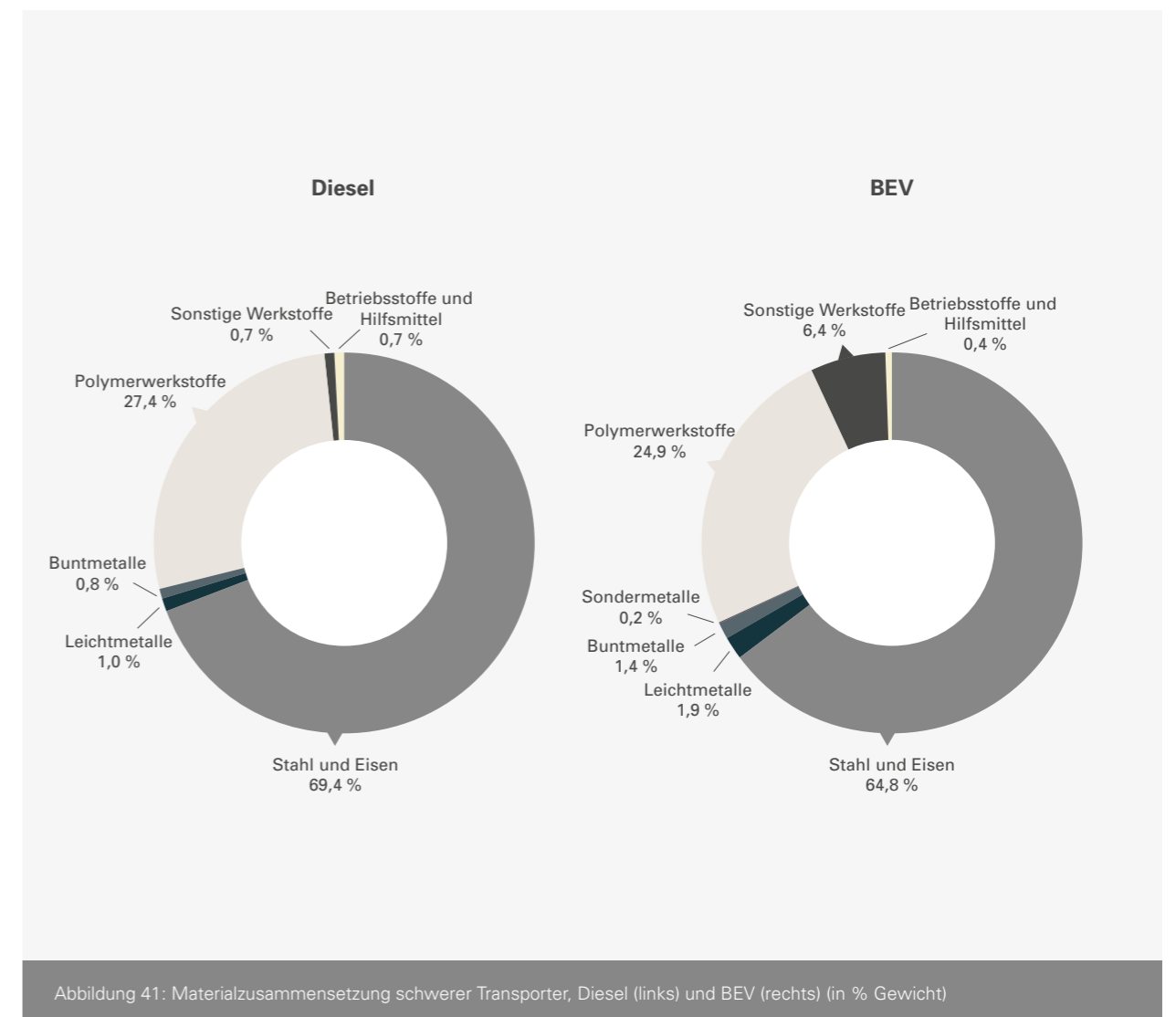
In den folgenden Abschnitten werden die fünf betrachteten Fahrzeugtypen hinsichtlich der eingesetzten Materialien und der während ihres Lebenszyklus anfallenden THG-Emissionen untersucht und jeweils der Dieselvariante des jeweiligen Fahrzeugtyps gegenübergestellt.

### 7.4 WtW-Betrachtung schwerer Transporter

Zu Beginn des Lebenszyklus steht die Herstellung der Fahrzeuge einschließlich der Gewinnung der verbauten Materialien. Die folgende Abbildung zeigt jeweils den anteiligen gewichtsbezogenen Materialeinsatz für die Herstellung eines diesel- und eines batteriebetriebenen schweren Transporters.

Bei der Betrachtung der Materialmixe beider Fahrzeuge ist zu berücksichtigen, dass die BEV-Variante ca. 400 kg schwerer ist. Der Wegfall der vorwiegend aus Stahl bestehenden konventionellen Antriebskomponenten (Motor, Getriebe, Differential, Auspuffanlage, insgesamt ca. 490 kg) wird gewichtsmäßig durch das ca. 670 kg schwere Batteriesystem inkl. Kühlung sowie den Elektromotor mehr als kompensiert.

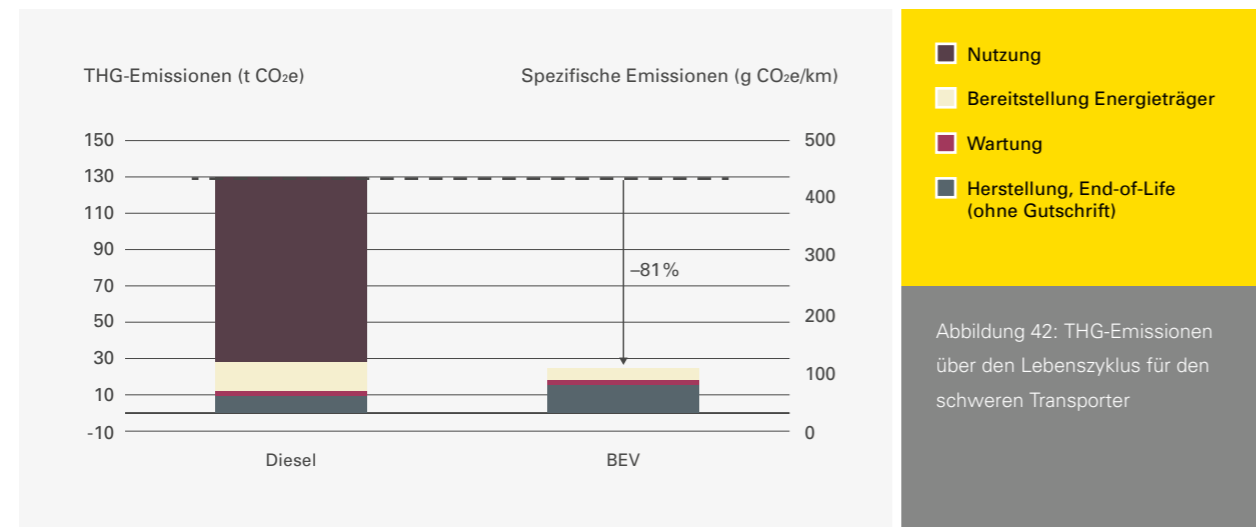
Die Batteriezellen machen mit 225 kg ca. ein Drittel der Masse der HV-Batterie aus, was zu dem erhöhten Anteil an sonstigen Werkstoffen führt. Die leichte Steigerung an Buntmetallen ergibt sich überwiegend durch die rund 45 kg Kupfer, die in den Stromleitungen, der HV-Batterie und dem Elektromotor eingesetzt werden.



14 | Weitere industrielle Verfahren zur Wasserstoffherstellung sind z. B. in (e-mobil BW 2013) beschrieben.

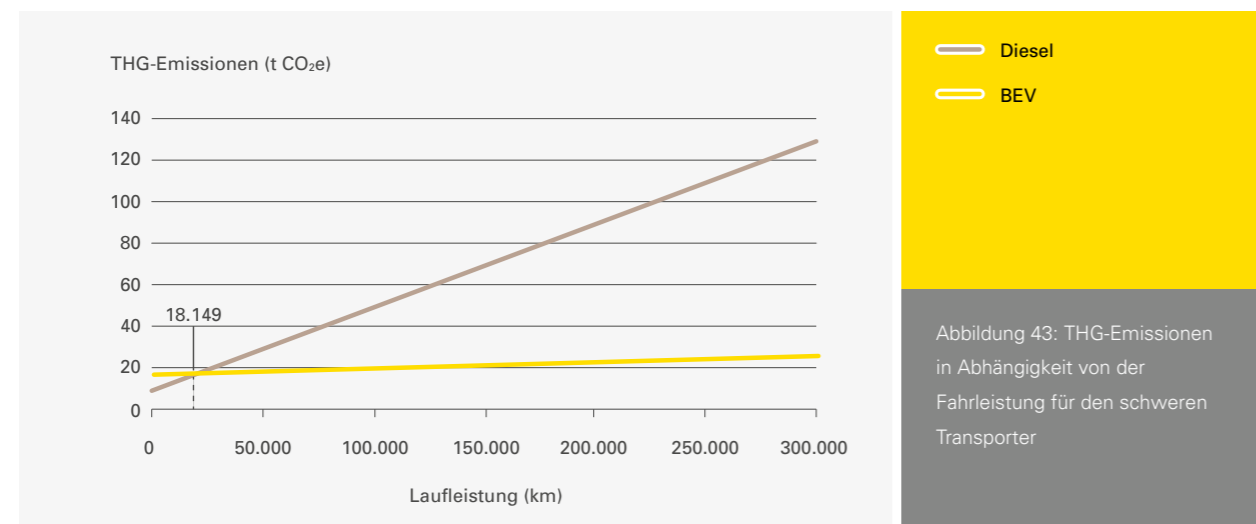
Abbildung 42 zeigt die THG-Emissionen über den Lebenszyklus für den Diesel- und den Batterie-Transporter. Zu erkennen sind die deutlich höheren Emissionen der Herstellung für den Batterie-Transporter. Die weitaus größte Relevanz für die THG-Emissionen hat jedoch die Nutzungsphase. Über 90 %

der Lebenszyklusemissionen des Diesel-Transporters werden durch den Kraftstoffverbrauch inkl. der Dieselmotoremissionen verursacht. Über die gesamte Lebensdauer werden mit dem Batterie-Transporter daher gut 80 % der THG-Emissionen eingespart.



Obwohl somit die THG-Emissionen des Batterie-Transporters bei der Inbetriebnahme deutlich höher sind als beim Diesel-Transporter, wird dieser Nachteil durch die Dieselmotoremissionen bereits nach einer relativ kurzen Fahrleistung ausgeglichen. Abbildung 43 zeigt die Entwicklung der THG-Emissionen und den Break-even-Punkt, ab dem der Batterie-Transporter aufgrund seines emissionsfreien Betriebs geringere

THG-Auswirkungen aufweist als der Diesel-Transporter. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen ist dies bereits nach gut 18.000 km der Fall, was in etwa der angenommenen Jahreslaufleistung entspricht. Das heißt, bereits nach etwa einem Jahr Betrieb werden durch den Einsatz des Batterie-Transporters in der Summe THG-Emissionen eingespart.

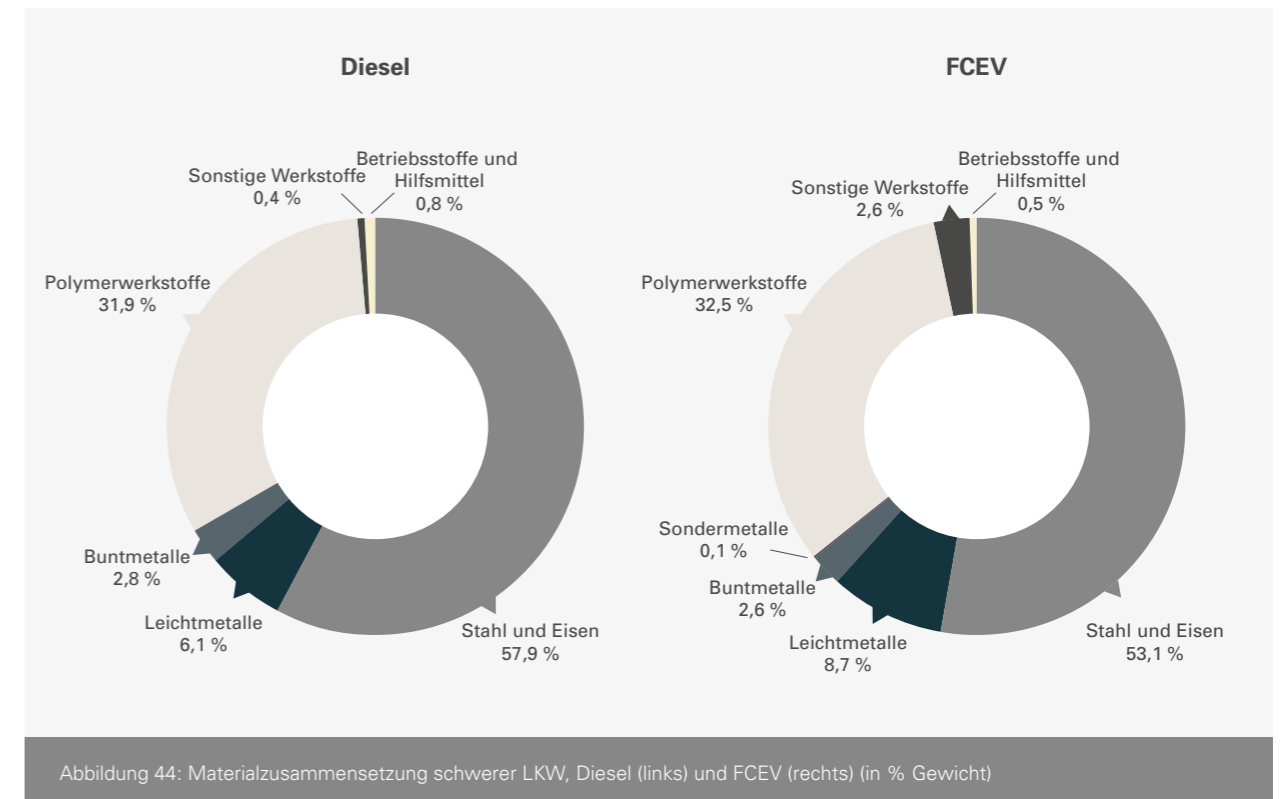


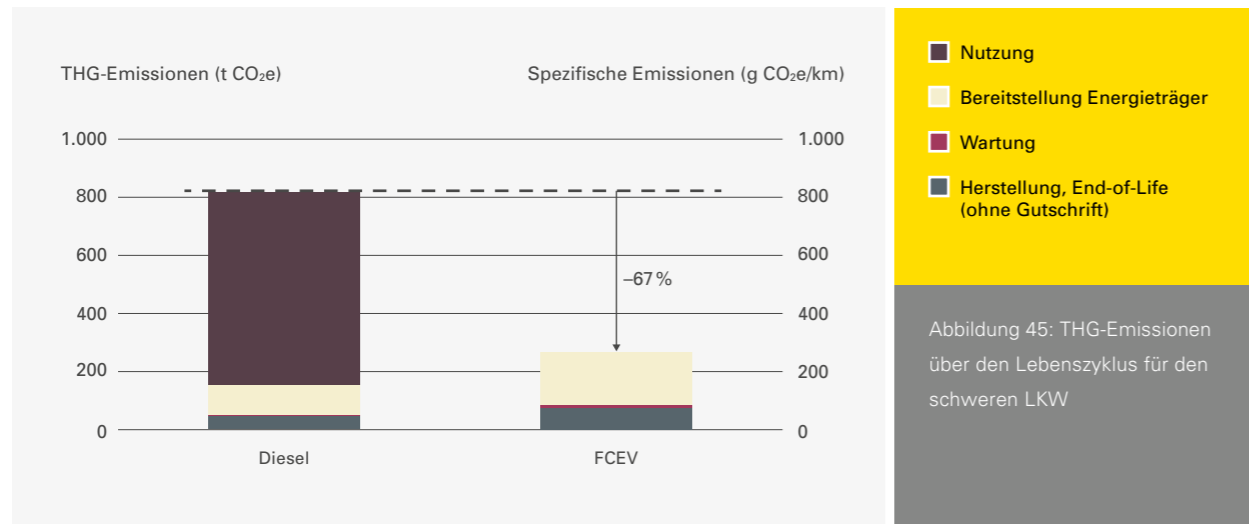
### 7.5 WtW-Betrachtung schwerer LKW

Abbildung 44 zeigt die exemplarische Materialzusammensetzung für einen schweren LKW mit Dieselantrieb im Vergleich zum Brennstoffzellenantrieb (FCEV). Das Leergewicht des schweren LKW mit Brennstoffzelle und zusätzlicher HV-Batterie beträgt mit 19,8 t ca. 2,5 t mehr als das des konventionellen LKW mit klassischem Dieselantrieb, obwohl mit Verbrennungsmotor, Getriebe, Abgasanlage und Treibstofftank zunächst ca. 950 kg an Stahl und Eisen wegfallen. Dies wird beim Brennstoffzellenhybrid jedoch durch etwa 800 kg Edelstahl (davon 500 kg für die HV-Batterie und 220 kg für die Brennstoffzelle und Wasserstoffleitungen) und 680 kg sonstigen Stahl, die sich relativ gleichmäßig auf HV-Batterie, Elektromotor, Brennstoffzelle und Träger des Wasserstofftanksystems verteilen, mehr als ausgeglichen. Wesentliche zusätzliche Gewichtsanteile haben die HV-Batterie, deren Zellen ca. 440 kg wiegen (sonstige Werkstoffe), weiterhin rund 700 kg Aluminium, wovon die Typ-3-Wasserstofftanks einen Großteil ausmachen, und 580 kg Kohlefasern (zu über 90 % für das Wasserstofftanksystem).

In Abbildung 45 werden die THG-Emissionen über den Lebenszyklus für die beiden Antriebsvarianten gegenübergestellt. Der Brennstoffzellen-LKW weist für die Herstellungsphase höhere THG-Emissionen aus als der Diesel-LKW. Aber auch hier ist mit über 90 % der Lebenszyklusemissionen die absolute Dominanz der Nutzungsphase (einschließlich Dieselmotoremissionen) deutlich zu erkennen. Im Vergleich zu einem rein batterieelektrischen LKW sind bei einem LKW mit Brennstoffzellenantrieb die mit der Bereitstellung des eingesetzten Energieträgers verbundenen THG-Emissionen deutlich höher. Dies liegt an der geringeren Effizienz und dem mehr als doppelt so hohen Primärenergieverbrauch zur Wasserstoffherstellung im Vergleich zur direkten Nutzung von Strom in einem BEV (siehe Abbildung 33).

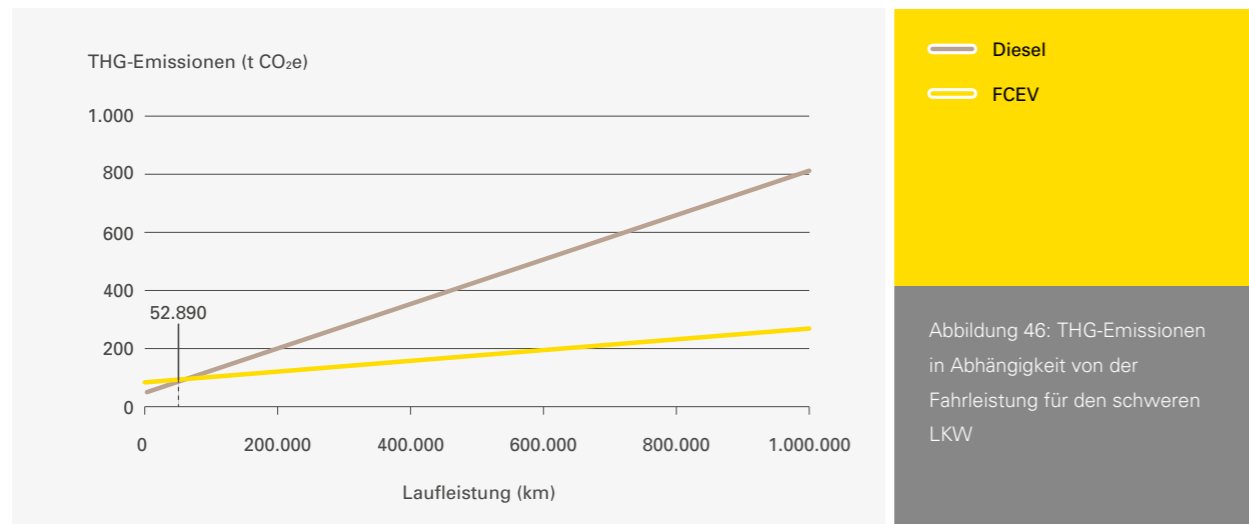
Über den Lebenszyklus können die THG-Emissionen mit dem schweren Brennstoffzellen-LKW gegenüber dem konventionellen Diesel-LKW um etwa zwei Drittel reduziert werden.





Wie für den Transporter lässt sich ermitteln, bei welcher Fahrleistung die höheren THG-Emissionen bei der Herstellung des FCEV durch die deutlich geringeren Emissionen beim Betrieb ausgeglichen werden. Dies ist bereits nach gut

50.000 km der Fall, wie aus Abbildung 46 ersichtlich wird. Bei einer Jahresfahrleistung von 100.000 km entspricht dies einem guten halben Jahr Betrieb.



### 7.6 WtW-Betrachtung Stadtbus

Die folgende Abbildung zeigt die anteilige gewichtsbezogene Materialzusammensetzung eines Diesel- und eines Brennstoffzellen-Stadtbusse. Deutlich zu sehen ist die Reduktion von Stahl und Eisen durch den Wegfall der Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs. Der Anstieg der sonstigen Werkstoffe kommt vor allem durch die knapp eine Tonne

schweren Batteriezellen zustande, der der Buntmetalle durch das in den HV-Leitungen und u. a. auch in den E-Motoren enthaltene Kupfer.

Abbildung 48 zeigt die entstehenden THG-Emissionen während des Lebenszyklus für die beiden Bus-Varianten. Bezogen auf die Fahrzeugherstellung liegen die THG-Emissionen des Brennstoffzellenbusses aufgrund der enthaltenen Brenn-

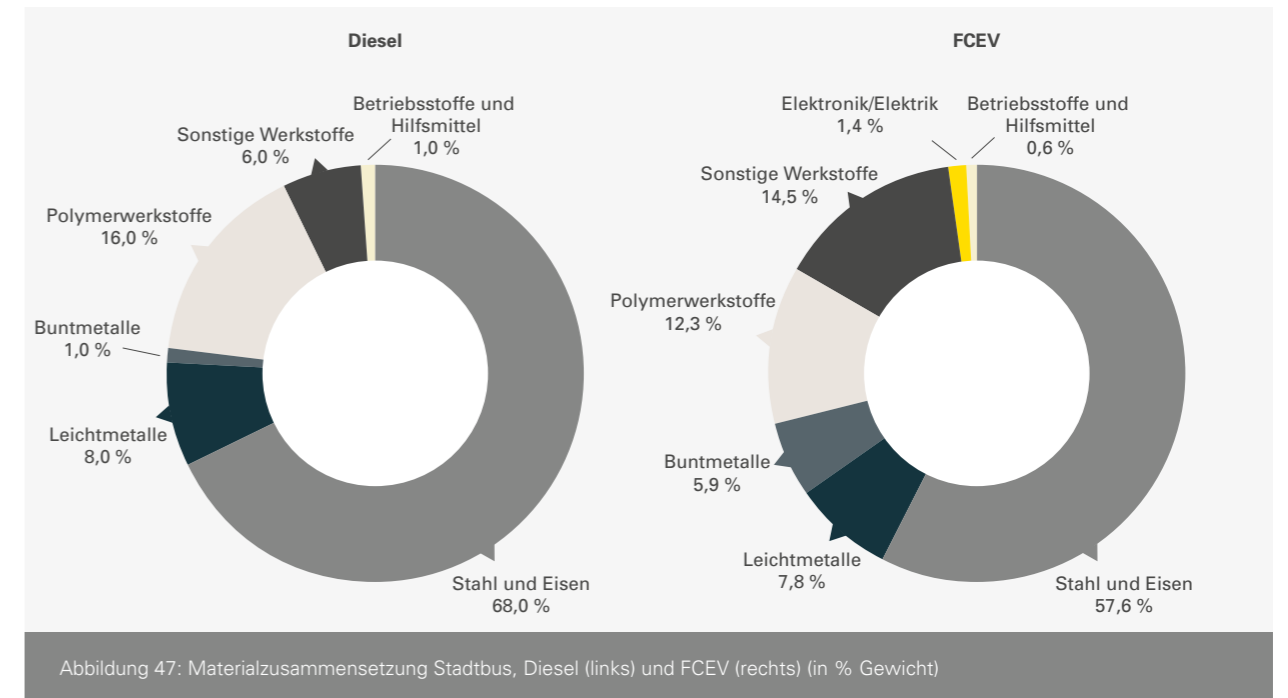
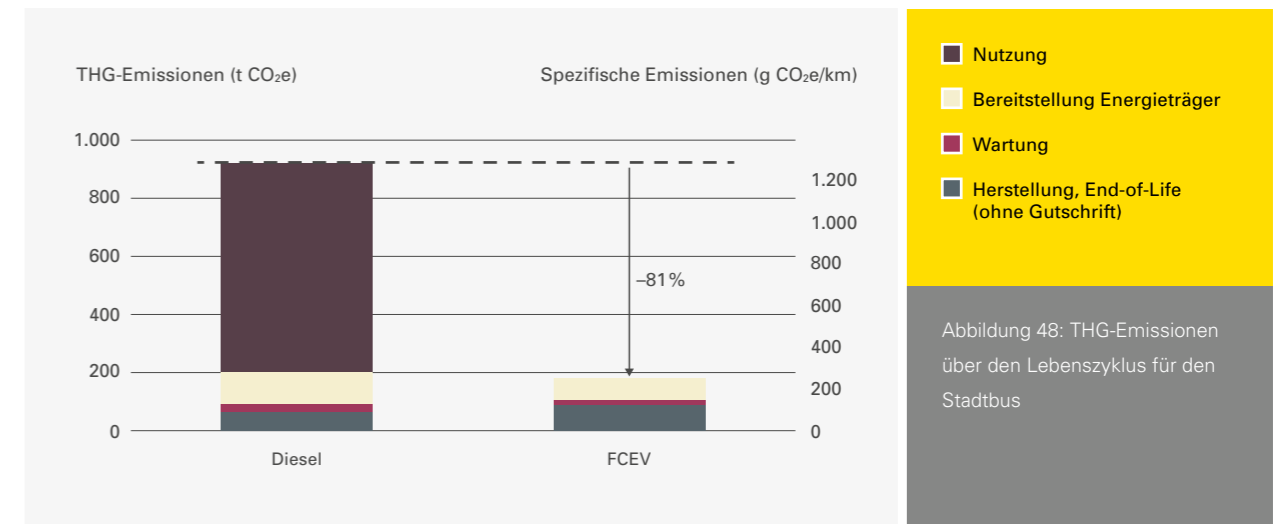


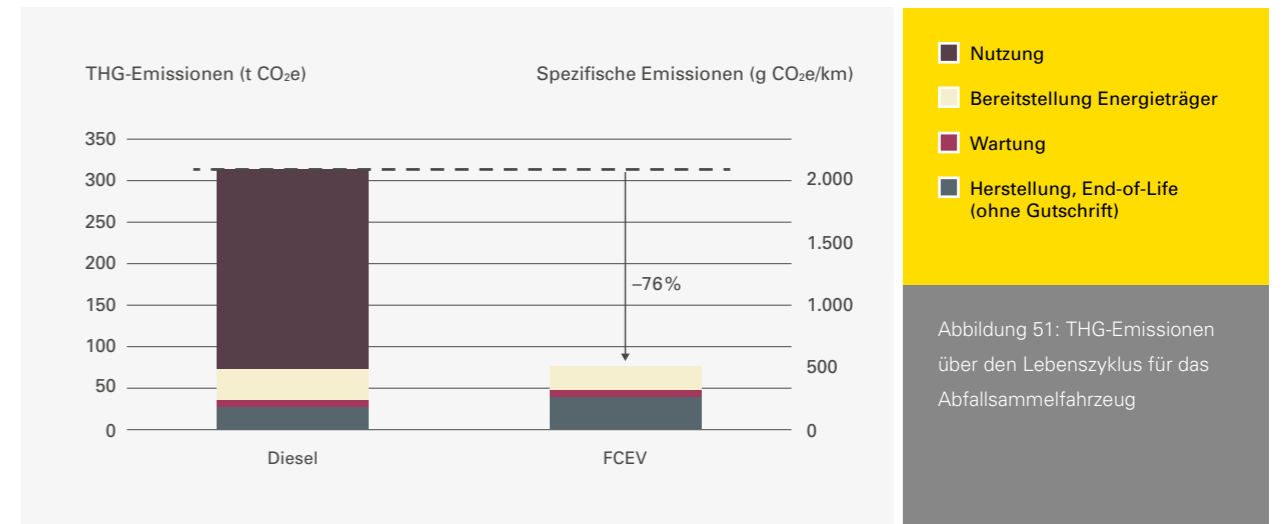
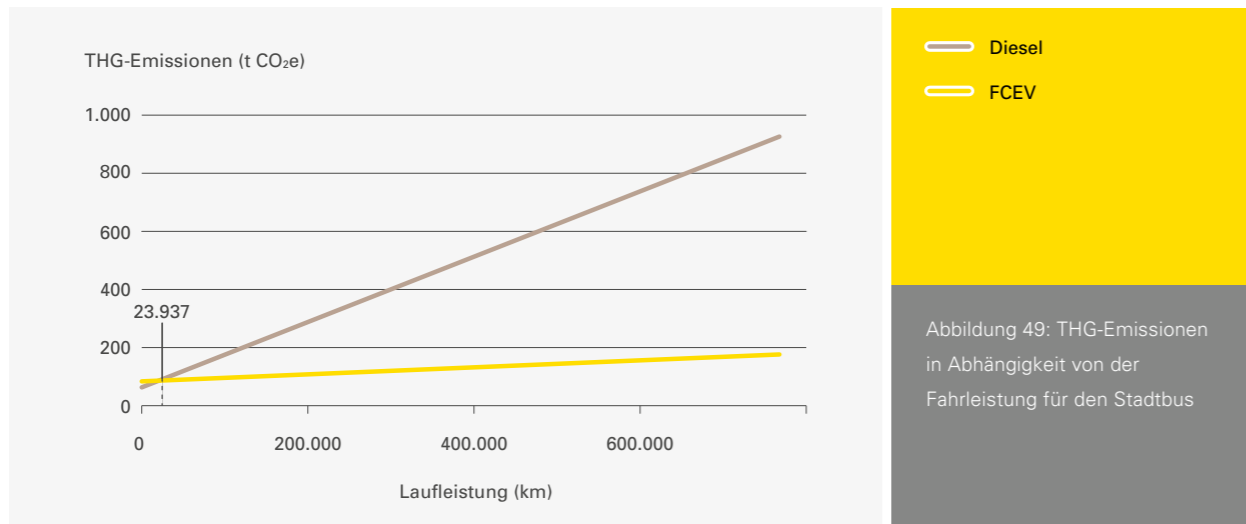
Abbildung 47: Materialzusammensetzung Stadtbus, Diesel (links) und FCEV (rechts) (in % Gewicht)



stoffzelle und Batterie um ca. 40 % höher als beim Dieselbus. Da im Gegensatz zum schweren LKW die Brennstoffzelle hier als Range Extender genutzt und die Batterie vorrangig extern geladen wird, ist der Einfluss der Energieträgerbereitstellung auf die THG-Emissionen des Brennstoffzellenbusses deutlich geringer. Bei weitem am meisten THG-Emissionen entstehen jedoch wiederum durch den Verbrauch des Dieselbusses einschließlich der Dieselherstellung, die 90 % der Lebenszyklusemissionen des Dieselbusses ausmachen. Als Resultat ergeben sich in der Lebenszyklusbetrachtung für

den Brennstoffzellenbus gut 80 % geringere THG-Emissionen als für den Dieselbus. Die zu Beginn höheren THG-Emissionen des Brennstoffzellenbusses egalieren sich, wie bei den anderen Fahrzeugtypen, durch seinen emissionsfreien Betrieb. Wie Abbildung 49 zu entnehmen ist, erweist er sich bereits ab rund 24.000 km Fahrleistung im Hinblick auf die THG-Emissionen als vorteilhaft. Mit der angenommenen Jahresfahrleistung von 60.000 km führt der Einsatz des Brennstoffzellenbusses nach nicht einmal fünf Monaten Betrieb in der Bilanz zu einer THG-Minderung.



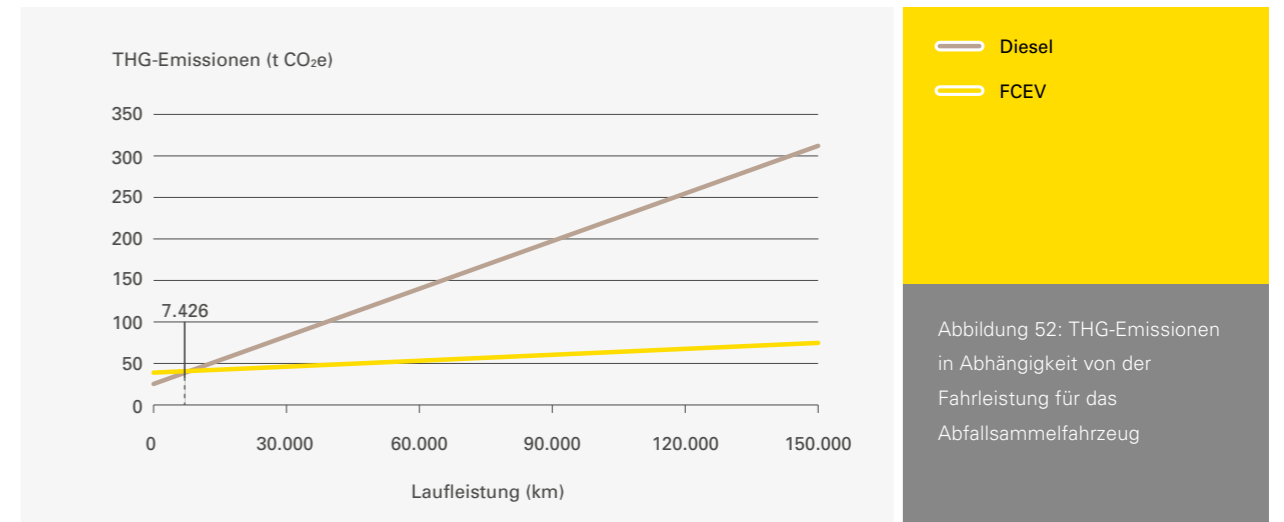
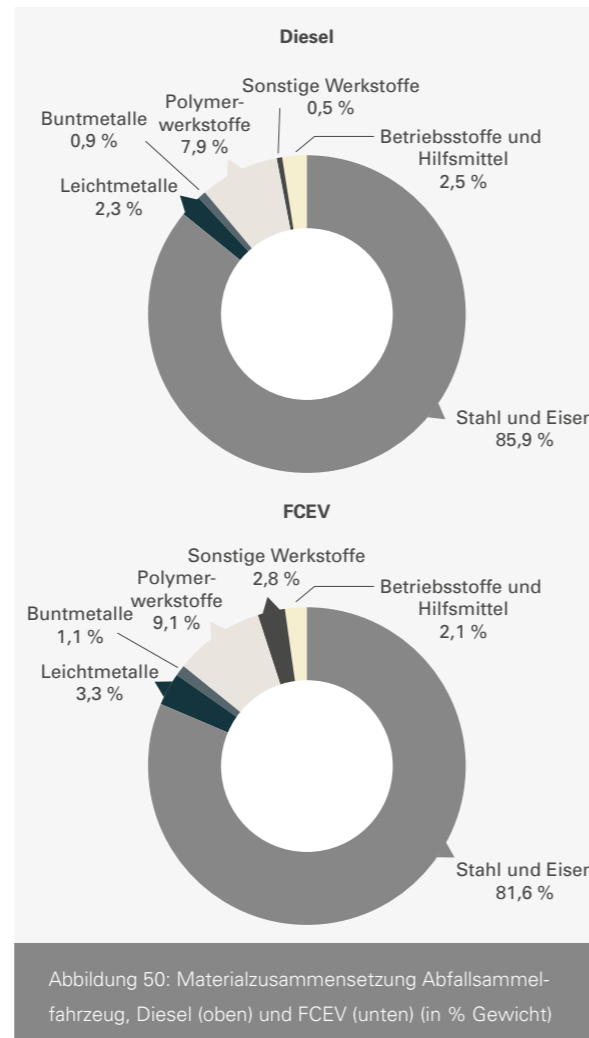


### 7.7 WtW-Betrachtung Abfallsammelfahrzeug

Der Materialmix des Abfallsammelfahrzeugs wird deutlich von Stahl- und Eisenwerkstoffen dominiert. Dies ergibt sich durch den Rotopressaufbau und die Schüttung, die im Wesentlichen aus ca. 4,3 t Stahl bestehen. Das Fahrzeug mit Wasserstoffantrieb weist mit insgesamt rund 13,8 t lediglich ein Mehrgewicht von etwa 600 kg gegenüber dem Fahrzeug mit Dieselmotor auf. Die Batteriezellen schlagen sich im erhöhten Anteil an sonstigen Werkstoffen nieder, während der etwas höhere Anteil an Leichtmetallen auf den Wasserstofftank und weitere Aluminiumkomponenten zurückzuführen ist.

Der Vergleich der THG-Emissionen über den Lebenszyklus ist in Abbildung 51 dargestellt und weist große Ähnlichkeiten mit den Ergebnissen für den Stadtbus auf. Wie dort erfolgt der Betrieb zunächst aus der Batterie, die über Nacht extern geladen wird, die Brennstoffzelle dient als Range Extender zur Reichweitenvergrößerung. Der Anteil der THG-Emissionen aus der Nutzungsphase einschließlich Kraftstoffbereitstellung beim Dieselfahrzeug beträgt hier 89 %. Die THG-Einsparung durch den Brennstoffzellenantrieb liegt mit gut 75 % etwas unter der Einsparung, die sich für den Stadtbus ergibt.

Für das Abfallsammelfahrzeug wird die THG-Neutralität nach knapp 7.500 km erreicht. Es wurde eine Jahresfahrleistung von 18.750 km zugrunde gelegt, sodass der Einsatz des Brennstoffzellenantriebs nach weniger als fünf Monaten Betriebszeit zu einer positiven THG-Bilanz führt.



### 7.8 WtW-Betrachtung Radlader

Die folgende Abbildung zeigt den anteiligen Materialmix des Diesel- und des batterieelektrischen Radladers. Das Gesamtgewicht des Fahrzeugs mit alternativem Antrieb erhöht sich um 330 kg von 3,8 auf 4,13 t. Mit Wegfall des Dieselantriebs wird der Anteil an Eisen und Stahl signifikant geringer. Die deutliche Verschiebung hin zu anderen Materialien lässt sich durch den hohen Anteil der Antriebskomponenten am Ge-

samtgewicht des (im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen) relativ leichten Fahrzeugs erklären. Im Gegensatz zu den anderen Fahrzeugen mit HV-Batterie wird beim elektrischen Radlader eine Blei-Säure-Batterie verwendet. Diese besteht etwa zur Hälfte aus Blei (590 kg), was den hohen Anstieg der Buntmetalle im Materialmix erklärt. Auch der Anstieg von Polymeren und Betriebsmitteln ist auf die Batterie zurückzuführen, die neben Blei ca. 210 kg Polypropylen sowie 380 kg Batteriesäure enthält.

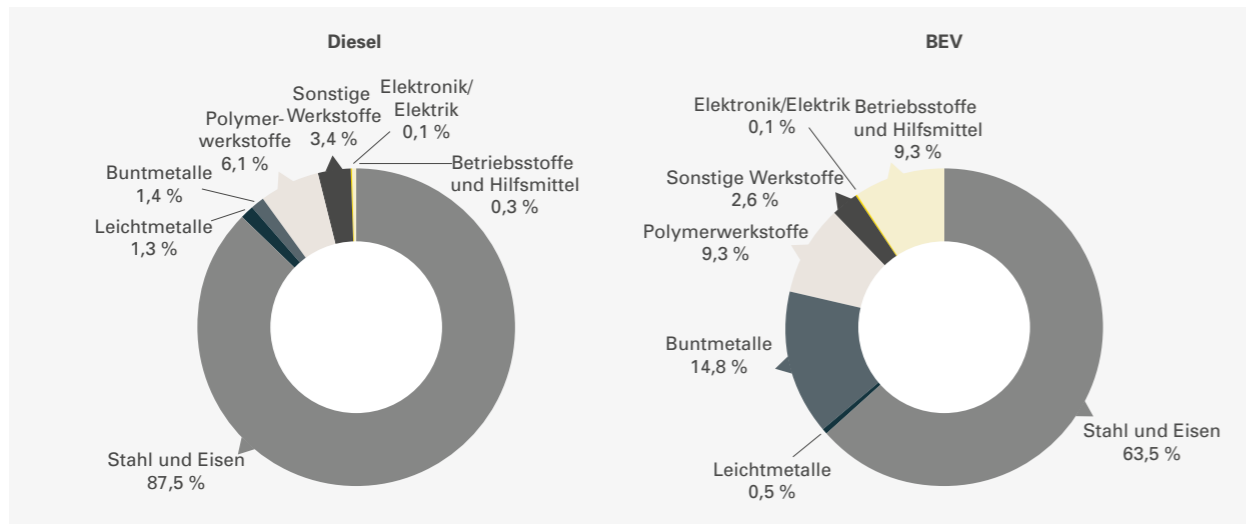


Abbildung 53: Materialzusammensetzung Radlader, Diesel (links) und BEV (rechts) (in % Gewicht)

Betrachtet man die THG-Emissionen, ist der Radlader insofern ein Ausnahmefall, als der Einfluss der Herstellung auf Diesel- und Elektrofahrzeug praktisch identisch ist. Die hohe Energieeffizienz des elektrischen Radladers im Vergleich zum

Dieselfahrzeug (siehe Kapitel 7.2) resultiert in der im Vergleich zu den anderen Beispielfahrzeugen höchsten THG-Einsparung über den Lebenszyklus (87 %).

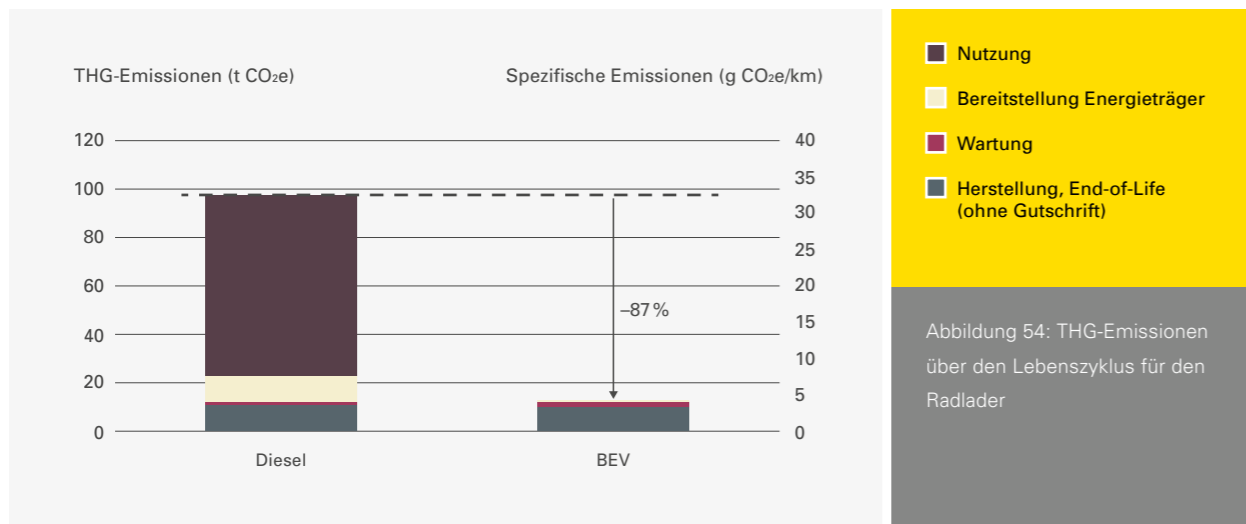


Abbildung 54: THG-Emissionen über den Lebenszyklus für den Radlader

Da der Elektroradlader bereits bei der Inbetriebnahme vergleichbare THG-Emissionen aufweist wie das Dieselfahrzeug, ist der Elektroantrieb von der ersten Betriebsstunde an

vorteilhaft. Die zu Beginn bestehende Gleichheit der THG-Emissionen führt über die Betriebsdauer zu einer immer größeren THG-Einsparung, wie in Abbildung 54 ersichtlich wird.

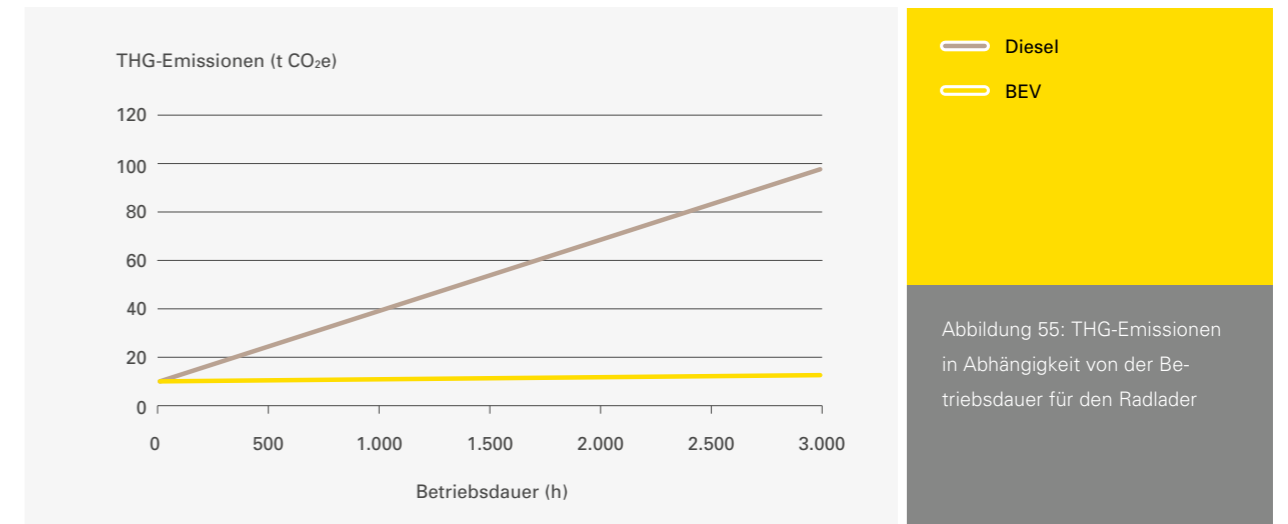


Abbildung 55: THG-Emissionen in Abhängigkeit von der Betriebsdauer für den Radlader

### Kernaussagen Kapitel 7

Bezogen auf die spezifischen Endenergieverbräuche weisen die Nullemissionsantriebe in allen betrachteten Segmenten deutliche Vorteile gegenüber dem Diesel auf. Diese Vorteile sind umso höher, je dynamischer der Betrieb ist (häufig wechselnde Leistungsanforderung mit stark schwankenden Motordrehzahlen), was beim konventionellen Dieselmotor zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades führt.

Bei beiden Nullemissionsantriebsvarianten entstehen in der Well-to-Wheel-Betrachtung auch deutlich geringere THG-Emissionen als beim Diesel. Dabei hängt die Gesamtbilanz eng mit dem Energiemix der Stromerzeugung zusammen.

Eine massenhafte Umstellung der Fahrzeugflotte auf BEV und Brennstoffzellen wird den Bedarf an bislang deutlich weniger verwendeten Rohstoffen erheblich steigern. Eine besondere Knappheit könnte bei Kobalt entstehen. Insgesamt überwiegen jedoch eindeutig die ökologischen Vorteile der Fahrzeuge.



# 08

## Maßnahmen und Handlungsempfehlungen

## 08

Maßnahmen und  
Handlungsempfehlungen

Die Verschärfung von Einfahrtsbeschränkungen kann positive Auswirkungen auf den Einsatz von Nullemissionsfahrzeugen haben

Die Analysen haben sowohl die ökologischen Vorteile als auch die ökonomischen Herausforderungen von Nullemissionsantrieben im Nutzfahrzeugsektor aufgezeigt. Der Sektor besteht bei weitem nicht nur aus LKW, sondern aus einer Vielzahl höchst unterschiedlicher Fahrzeuge mit verschiedenen Einsatzbereichen. Den dadurch bedingten spezifischen Anforderungen muss bei der Einführung von BEV und FCEV Rechnung getragen werden. Da nahezu alle Nutzfahrzeuge im gewerblichen Bereich eingesetzt werden, in dem es ganz wesentlich auf die Kosten ankommt, ist es von zentraler Bedeutung, dass Nullemissionsfahrzeuge keine gravierenden Kostennachteile gegenüber konventionellen Dieselfahrzeugen mit sich bringen, wie es heute in der Regel noch der Fall ist.

Die vorliegenden TCO-Betrachtungen haben gezeigt, dass bis 2030 sowohl BEV als auch FCEV in den analysierten Segmenten konkurrenzfähig werden können. Dies liegt v. a. an den Kostenreduktionen bei der Herstellung der alternativen Antrie-

be, die sich stark dämpfend auf die Kaufpreise auswirken. Somit werden die bestehenden gravierenden Fixkostennachteile bis 2030 deutlich abnehmen. Beim Wasserstoff ist zudem abzusehen, dass die Erzeugungskosten substantiell sinken werden. Im Ergebnis nähern sich beide Antriebe, erreichen auch bei geringer Fahrleistung den Break-even-Punkt früher gegenüber Diesel, und werden im Jahr 2030 durchaus wirtschaftliche Alternativen für verschiedene Anwendungsfelder darstellen.

Die Studie hat auch gezeigt, dass eine reine TCO-Betrachtung nicht alle Faktoren abbilden kann, die bei betrieblichen Entscheidungen in verschiedenen Einsatzkontexten eine Rolle spielen: Nullemissionsfahrzeuge weisen bestimmte Vorteile auf, die an anderen Stellen Kosten senken, Technologien überflüssig machen (wie z. B. Belüftungsanlagen in geschlossenen Arbeitsbereichen) oder erst bestimmte Konzepte (Einfahrt in Umweltzonen oder Nachtbelieferungen) ermöglichen. In diesen Fällen können die alternativen Antriebe betriebswirt-

schaftlich bereits sinnvoll sein, bevor der fahrzeugeitige Break-even-Punkt für die Kosten erreicht ist. Um die Verbreitung von Nullemissionsnutzfahrzeugen zu fördern, ergeben sich drei wesentliche Handlungsfelder.

### 1. Nullemissionsnutzfahrzeuge sind finanziell möglichst weit zu entlasten.

Solange die Anschaffungskosten von Nullemissionsantrieben noch nicht mit Diesel konkurrenzfähig sind, ist es umso wichtiger, dass der Break-even-Punkt von BEV und FCEV gegenüber dem Dieselantrieb bezogen auf die TCO-Betrachtung möglichst weit nach vorne verschoben wird. Dazu bieten sich beispielsweise Vergünstigungen bei Steuern und Maut sowie gezielte Förderungen und Zuschüsse bei der Anschaffung an. Die bestehenden Anreizsysteme sind in diese Richtung weiterzuentwickeln und deutlicher auf die Begünstigung von Nullemissionsfahrzeugen zu akzentuieren. Um politische Instrumente zielgerichtet zu adressieren, sollten Nullemissionsfahrzeuge bei der Klassifizierung der Antriebsstruktur mit einer eigenen Kategorie berücksichtigt werden.

### 2. Die Vorteile von Nullemissionsnutzfahrzeugen müssen regulatorisch gestärkt werden.

Nullemissionsfahrzeuge sind lokal emissionsfrei und deutlich leiser als Dieselfahrzeuge. Somit entsprechen sie ohne weiteren technischen Aufwand und zusätzliche Kosten bestehenden Richtlinien zur Luftreinhaltung und stellen zudem eine geringere Lärmbelastung dar. In allen Einsatzbereichen, in denen emissionsbedingte Regularien gelten, kann dieser Vorteil die monetären Nachteile schon heute aufwiegen. Die Elektrifizierungstendenz in der KEP-Branche ist dafür ein deutlicher Beleg. Daher ist es zur Etablierung von Nullemissionsfahrzeugen ausgesprochen hilfreich, die betreffenden Regularien weiter zu verschärfen. Insbesondere die Einführung verschärfter Einfahrtsbeschränkungen in Innenstädte (z. B. Umweltzonen mit blauer Plakette) würde konventionelle Dieselfahrzeuge zu großen Teilen aus dem Innenstadtbereich verdrängen und den Einsatz von FCEV und BEV stark forcieren. Die Vorgabe entsprechender Standards für geschlossene Arbeitsbereiche und für Neuzulassungen generell (z. B. Abgastests unter Realbedingungen) bewirkt sukzessive die vollständige Umstellung der Nutzfahrzeugflotte auf emissionsfreie Antriebe.

### 3. Eine Vermittlung zwischen Herstellern und Nutzern ist notwendig.

Insbesondere in den Expertengesprächen war evident, dass in vielen Segmenten eine Nachfrage nach BEV und FCEV durchaus vorhanden ist. Je nachdem, wie bedeutend die Emis-

sionsproblematik in den Einsatzbereichen ist, wären die Anwender durchaus bereit, zu deren Lösung moderate Mehrkosten hinzunehmen. Allerdings wurde geäußert, dass praktikable Fahrzeuge am Markt schlichtweg nicht vorhanden seien und dass bestehende Prototypen an den Bedarfen vorbeientwickelt würden. Auch hier soll noch einmal das Beispiel des sehr aktiven KEP-Marktes bemüht werden: Der aktuell stark nachgefragte StreetScooter ist keine Entwicklung der etablierten Nutzfahrzeugindustrie, sondern eine Eigenentwicklung der RWTH Aachen für den elektrischen Kurzstreckenverkehr. Die Firma wurde später von der Deutschen Post übernommen, da die Fahrzeuge gezielt deren Bedarf und Anspruch für den Zustellbetrieb adressieren und die Versuche einer entsprechenden Entwicklung mit der Automobilindustrie fehlschlagen. Offenbar besteht eine große Diskrepanz zwischen Anbieter- und Nachfragerseite, die sich im Fehlen praxistauglicher Produkte äußert. Da es für die großen Fahrzeughersteller schwierig ist, neue Fahrzeugmodelle in kleinen Stückzahlen in ihre Produktionsabläufe aufzunehmen, ergeben sich hier große Chancen für kleine und mittelständische Unternehmen. Aufgrund ihrer deutlich höheren Flexibilität in der Fertigung können sie die sich derzeit herausbildenden Nischenmärkte für Nullemissionsfahrzeuge leichter bedienen. Dies betrifft vor allem den Nutzfahrzeugmarkt, der aufgrund seiner Heterogenität und der Vielfalt der Anforderungen an Fahrzeuge zahlreiche individuelle Lösungen erfordert, wie das oben aufgeführte Beispiel des StreetScooter zeigt. Eine wesentliche Aufgabe besteht daher darin, die spezialisierten Anforderungen der Nachfrageseite mit der Innovationskraft und Flexibilität der mittelständischen Unternehmen zu verknüpfen. Diese spielen besonders in Baden-Württemberg traditionell eine wichtige Rolle als Zulieferer und Systementwickler der Automobilindustrie und verfügen somit über eine hervorragende Ausgangsposition zur Entwicklung von Nullemissionsfahrzeugen und deren Komponenten. Wie diese Verknüpfung erfolgen kann und ob die Politik dabei z. B. durch „Runde Tische“ als Initiator fungieren sollte, ist zu prüfen.

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Politik diverse Stellschrauben zur Verfügung hat, mit deren Hilfe sie mitgestalten kann, wann Nullemissionsfahrzeuge eine praktikable und ökonomisch lohnende Alternative zum Diesel sein werden. Die Beispielrechnungen dieser Studie haben gezeigt, dass 2030 dafür ein realistischer Zeithorizont ist. Wenn die aufgezeigten Handlungsoptionen aufgegriffen und geschickt miteinander kombiniert werden, ist der Beginn eines spürbaren Markthochlaufs in bestimmten Segmenten aber durchaus auch schon früher zu erreichen.

## Literaturverzeichnis

### Acatec 2017

acatec – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.: Rohstoffe für die Energiewende – Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung, ISBN: 978-3-8047-3664-1, Februar 2017.

### ADAC 2017

ADAC (Hg.): Entwicklung der Tankstellenanzahl seit 1965 in Deutschland, <https://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/probleme-tankstelle/anzahl-tankstellen-markenverteilung/> (letzter Zugriff am 11.07.2017).

### Angerer 2009a

Angerer G. et al., Lithium für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität, Fraunhofer ISI, 2009.

### Angerer 2009b

Angerer G. et al., Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, Fraunhofer ISI & Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, 2009.

### asp 2017

AUTO SERVICE PRAXIS (Hg.): Neue Regeln für Stickoxide. 2017. Online verfügbar unter <http://www.autoservicepraxis.de/neue-regeln-fuer-stickoxide-1941155.html>, (letzter Zugriff am 05.05.2017).

### BG Bau 2015

Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (Hg.): Abgasgefahr wird unterschätzt. Baumaschinen in geschlossenen Räumen/ 26. Februar 2015. Online unter <http://www.bgbau.de/presse/presse-meldungen/presse-meldungen-2015/abgasgefahr-wird-unterschuetzt> (letzter Zugriff am 10.08.2017).

### BGL 5138

Dieselmotor-Emissionen in Lade- und Sortierhallen von Kurier-, Express- und Paketdiensten. BG-Information 5138 v. Dezember 2011.

### BMUB 2016

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hg.): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin, 2016.

### BMUB 2016

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hg.): Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, Ausgabe 2016. Berlin, 2016.

### BMWi 2017

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.): Energiedaten: Gesamtausgabe. Berlin, 2017.

### Bradshaw 2013

Bradshaw A. M., Reuter B., Hamacher T., The Potential Scarcity of Rare Elements for the Energiewende. In: Green 3 (2013), Nr. 2.

### Buchert 2011

Buchert M., et al.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität – Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen, Öko-Institut e.V., 2011.

### Burose, Sauer 2011

Burose F. und Sauer N., Reparatur- und Wartungskosten – Ergebnisse einer Befragung. In Mensch und Technik, Landtechnik. 4.2011.

### CDI 2016

Cobalt Development Institute (Hg.): Cobalt Facts. Supply & Demand. Guildford, 2016.

### CE Delft 2013

Zero emission trucks, An overview of state-of-the-art technologies and their potential, Delft, July 2013.

### Cookson 2015

Cambridge chemists make superbattery breakthrough. CNBC.com. Retrieved <http://www.cnbc.com/2015/10/30/hemists-make-super-battery-breakthrough.html> (letzter Zugriff am 06.07.2017).

### Creamer 2017

Creamer, M.: Platinum for new fuel cell Mercedes cut to autocat level. [http://www.miningweekly.com/article/daimler-slashes-platinum-needed-by-new-fuel-cell-mercedes-car-2017-07-12/rep\\_id:3650](http://www.miningweekly.com/article/daimler-slashes-platinum-needed-by-new-fuel-cell-mercedes-car-2017-07-12/rep_id:3650) (letzter Zugriff am 13.07.2017).

### Curry 2017

Curry, Claire: Lithium-ion Battery Costs and Market. Squeezed margins seek technology improvements & new business models. 05.07.2017.

### Daimler 2009

media.daimler.com, Zukunft wird Gegenwart: Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid, <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Zukunft-wird-Gegenwart-Mercedes-Benz-Citaro-FuelCELL-Hybrid.xhtml?oid=9907932> (letzter Zugriff am 09.08.2017).

### Daimler 2017

Vernetzte LKW: Mithilfe des Internets zum Warentransport der Zukunft. <https://www.daimler.com/innovation/digitalisierung/vernetzung/vernetzte-LKW.html> (letzter Zugriff am 27.09.2017).

### Denkwerk 2010

Denkwerk Zukunft – Stiftung kulturelle Erneuerung: Die künftige Verfügbarkeit knapper, strategisch wichtiger Metalle – Risiken und Herausforderungen, 2010.

### DESTATIS 2017

Statistisches Bundesamt, Beschäftigte und Umsatz der Betriebe im verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige (WZ2008 2-4-Steller Hierarchie), [https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data.jsessionid=12BA1525D94EC27965E6D09A87C133B9.tomcat\\_GO\\_1\\_2?operation=abrufabelleAbrufen&selectionname=42111-0005&levelindex=1&levelid=1493919002417&index=5](https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data.jsessionid=12BA1525D94EC27965E6D09A87C133B9.tomcat_GO_1_2?operation=abrufabelleAbrufen&selectionname=42111-0005&levelindex=1&levelid=1493919002417&index=5) (letzter Zugriff am 04.04.2017).

### Diegmann et al. 2007

Diegmann, V.; Pfäfflin, F.; Wiegand, G.; Wursthorn, H.; Dünnebeil, F.; Helms, H.; Lambrecht, U.: Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub und Stickstoffdioxid. UBA-Texte 22/07, Dessau, 2007.

### DLR 2016

Adolf, J.; Lenz, B. et al. (2016): Shell Nutzfahrzeugstudie: Diesel oder alternative Antriebe – Womit fahren LKW und Bus morgen? Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040. Hamburg, 2016.

### DUH 2013

Deutsche Umwelthilfe (Hg.): Erneuter Wortbruch: Baumaschinen ohne Dieselpartikelfilter auf Baustellen der Deutschen Bahn weiterhin erlaubt. Berlin, 2013.

### DVFG 2017

Deutscher Verband Flüssiggas, Autogas: Alternativ Tanken leicht gemacht, <http://www.dvfg.de/fahren-mit-fluessiggas/autogas-tankstellen/> (letzter Zugriff am 11.07.2017).

### e-mobil BW 2013

e-mobil BW, Fraunhofer ISE, Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität, 2013.

### e-mobil BW 2015

e-mobil BW, Fraunhofer IAO, Strukturstudie BW<sup>a</sup> mobil 2015, 2015.

### e-stations 2017

e-stations, Ladekabel und -stationen, <https://www.e-stations.de/wissen/ladestationen> (letzter Zugriff am 11.07.2017).

### EA.NRW 2013

Energieagentur NRW: Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende. Informationsbroschüre des Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW, 2013.

### EC 2014

European Commission, Report on Critical Raw Materials for the EU – Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014.

### electrive.net 2017

Koreaner tüfteln an Akkus mit weniger Kobalt. 27.07.2017. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2017/07/27/koreaner-tuefteln-an-akkus-mit-weniger-kobalt/> (letzter Zugriff am 28.07.2017).

### EMCEL 2017

EMCEL (Hg.): Wie ist der Stand der Technik bei schweren Brennstoffzellen-LKW? Online verfügbar unter <http://emcel.com/de/schwere-brennstoffzellen-LKW-wie-ist-der-stand/>, (letzter Zugriff am 16.08.2017).

### Jörissen, L., Martin, A. 2017: AutoStack-CORE: Second Generation PEM-Fuel Cell Stack for Automotive Applications

<https://efcw2017.sciencesconf.org/133610/document> (letzter Zugriff am 28.09.2017).

### erdgas.info 2017

Erdgas.info, Erdgas-Tankstellen, <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/erdgas-tankstellen/> (letzter Zugriff am 11.07.2017).

Esslinger et al. 2015

Esslinger, C.; Kainrath-Raumayer, S; Aldinger, M.: Bewetterung – eine Herausforderung beim Bau des Steinbühl tunnels. In: BauPortal 127 (2015), H. 3, S. 2–10.

euroFOT 2012

[http://www.eurofot-ip.eu/download/events/eurofot\\_press\\_release\\_26062012\\_german.pdf](http://www.eurofot-ip.eu/download/events/eurofot_press_release_26062012_german.pdf) (letzter Zugriff am 14.07.2017).

FCH JU 2017

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Multi-Annual Work plan 2014–2020, 2014.

Fuchs S. et al. 2014

Stephan Fuchs, Markus Lienkamp und Peter Burda: An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels and Greenhouse Gas Emissions. Publiziert in: ResearchGate. Uploaded: 25.01.2017.

GefStoffV

Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643, 1644), zuletzt geändert durch Artikel 148 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626).

GREENCAR 2017

GREENCAR (Hg.): Baumaschinen-Partikelfilter-Nachrüstung und Baumaschinen-Partikelfilter-Reinigung. <http://www.dieselpartikelfilter.net/baumaschinen-partikelfilter/baumaschinen-nachruuestfilter/466-300-400-kw-bis-ca-18000-ccm.html>, <http://www.dieselpartikelfilter.net/baumaschinen-partikelfilter/baumaschinen-filterreinigung.html>, (letzter Zugriff am 03.05.2017).

GCC 2017

Green Car Congress: Toyota North America unveils hydrogen-fuel-cell heavy-duty truck proof-of-concept; twin Mirai fuel cell stacks. 19.04.2017. <http://www.greencarcongress.com/2017/04/20170419-toyota.html> (letzter Zugriff am 09.08.2017).

Goingelectric 2017

goingelectric.de, DC Lösungen, [https://www.goingelectric.de/wiki/DC\\_Lösungen](https://www.goingelectric.de/wiki/DC_Lösungen) (letzter Zugriff am 11.07.2017).

HBEFA 2017

Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA). Version 3.3. Infrac. April 2017.

H2Mobility 2017

H2Mobility: Mission: Wasserstoff-Infrastruktur. Homepage, <http://h2-mobility.de/h2-mobility/> (letzter Zugriff am 26.04.2017).

HDB et al. 2013

HDB Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.; ZDB Zentralverband Deutsches Baugewerbe; BVMB Bundesvereinigung Mittelständischer Bauunternehmen e.V. (Hg.): Nachrüstung von Baumaschinen mit Diesel-Partikelfiltern auf Baustellen der DB ProjektBau GmbH. HDB ZDB BVMB Positionspapier. 2013.

HyCologne/RVK 2016

Persönliche Information von Boris Jermer und Jens Conrad zu H<sub>2</sub>-Versorgung der BZ-Busse der RVK, 2016.

ICCT 2016

The International Council on Clean Transportation (ICCT); Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions. Working Paper. Paul Wolfram and Nic Lutsey. July 2016.

IEA 2015

International Energy Agency: Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, June 2015.

IEKK 2014

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept; Stuttgart.

ifeu 2014a

Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsminderungsoptionen für den Bestand. Institut für Energie und Umweltforschung. Heidelberg (UBA Texte 24/2014).

ifeu 2014b

Schadstoffemissionen und Belastungsbeitrag mobiler Maschinen in Baden-Württemberg; Heidelberg.

IHK 2013 IHK

Baden-Württemberg, Die größten Unternehmen in Baden-Württemberg, Stuttgart, Juni 2013.

Imanishi 2014

Imanishi, N. und Yamamoto, O.: Rechargeable lithium-air batteries: characteristics and prospects. Materials Today, 17(1), 24–30. Zugriff über <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702113004586>

KBA 2015

Verkehr in Kilometern 2014; Insgesamt legten deutsche Kraftfahrzeuge wieder mehr Kilometer zurück. Flensburg.

KBA 2016a

Verkehr in Kilometern 2015; Durchschnittliche Fahrleistung auf Vorjahresniveau. Flensburg.

KBA 2016b

Fahrzeugzulassungen (FZ) 25: Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten); 01.01.2015; Flensburg.

KBA 2016c

Fahrzeugzulassungen (FZ) 13: Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen; 01.01.2016, Flensburg, Mai 2016.

KBA 2017

Fahrzeugzulassungen (FZ) 26: Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten), 01.01.2016, Flensburg, Januar 2017.

Klaußner 2013

Klaußner, S., Irtenkauf, P. (2013): Autonome Kolonnenfahrt auf Autobahnen.

Kochan et al. 2014

Kochhan, Robert; Fuchs, Stephan; Reuter, Benjamin; Burda, Peter; Matz, Stephan; Lienkamp, Markus: An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels and Greenhouse Gas Emissions. Technische Universität München, 2014. Zugriff über [https://www.researchgate.net/profile/Robert\\_Kochhan/publication/260339436\\_An\\_Overview\\_of\\_Costs\\_for\\_Vehicle\\_Components\\_Fuels\\_and\\_Greenhouse\\_Gas\\_Emissions/](https://www.researchgate.net/profile/Robert_Kochhan/publication/260339436_An_Overview_of_Costs_for_Vehicle_Components_Fuels_and_Greenhouse_Gas_Emissions/)

[links/588801c64585150dde503d57/An-Overview-of-Costs-for-Vehicle-Components-Fuels-and-Greenhouse-Gas-Emissions.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/publication/260339436_An_Overview_of_Costs_for_Vehicle_Components_Fuels_and_Greenhouse_Gas_Emissions.pdf?origin=publication_detail), zuletzt geprüft am 27.07.2017.

Konietzko

Konietzko S. et al.: Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen – Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt – Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcenverfügbarkeit im Rahmen der BMU-geförderten Projekte LithoRec und LiBRI, Oktober 2011.

Kübler et al. 2016

Kübler, G.; Triebel, R.; Knappe, M.: Neue Anforderungen aus der Grenzwertdiskussion zu Stickoxiden NO<sub>x</sub>. In: Kali & Steinsalz 02/2016, 7–17.

LMUKE 2016

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Zweiter Monitoring-Kurzbericht 2015; Stuttgart.

Lüddemann 2011

Lüddemann, R.: Nachrüstung mit Rußpartikelfiltern – Erfahrungsbericht. 27.10.2011 (Vortrag).

McKinsey 2016

LKW-Industrie: Jeder dritte Lastwagen bis 2025 teilautonom. Pressemitteilung 13.09.2016.

NBF 2017a

thinkstep, New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots – Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling, FCH JU, 2017.

NBF 2017b

thinkstep, New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots – High-Level Techno-Economic Project Summary Report, FCH JU, 2017.

Nikvist et al. 2015

Björn Nykvist & Måns Nilsson: Systematic review of EV battery pack costs suggests economies of scale may push toward US\$200/kWh without further cell chemistry improvements. Green Car Congress, 20.04.2015.

NPE 2015

Nationale Plattform Elektromobilität: Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland. Statusbericht und Hand-

lungsempfehlungen. Hg. v. GGEMO Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin, 2015.

Özdemir 2012

Enver Doruk Özdemir: The Future Role of Alternative Powertrains and Fuels in the German Transport Sector, Forschungsbericht Universität Stuttgart.

Öko-Institut 2015

Florian Hacker, Rut von Waldenfels und Moritz Mottschall: Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Abschlussbericht. April 2015.

Porsche 2016

Reber, V.: e-power – Neue Möglichkeiten durch Laden mit 800 Volt, Porsche Engineering Magazin, 01/2016.

Prognos et al. 2014

Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose; Basel, Berlin.

PwC 2016

Digitized Trucking: Betriebskosten eines LKWs lassen sich bis 2025 um 15 Prozent senken <http://www.pwc.de/de/transport-und-logistik/digitized-trucking-betriebskosten-eines-lkws-lassen-sich-bis-2025-um-15-prozent-senken.html>

Reuter 2016

Reuter B., Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten zur Rohstoff- und Technologieauswahl für Elektrofahrzeuge, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München.

Ricardo-AEA 2015

Improving understanding of technology and cost for CO<sub>2</sub> reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves. Final Report for the Directorate-General for Climate Action.

Robinson 2010

Robinson, T. et al. : Operating Platoons On Public Motorways: An Introduction To The SARTRE Platooning Programme.

Roland Berger 2015

Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe. A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), München, September 2015.

Romare and Dahllöf 2017

Romare, Mia; Dahllöf, Lisbeth: The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty Vehicles. Hg. v. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, 2017 (C 243).

Schüler 2011

Schüler D. et al., Study on Rare Earths and Their Recycling, Öko-Institut e.V., 2011.

Spod 2015

Spod, U.: Stickoxidexpositionen in der betrieblichen Praxis. Symposium Gefahrstoffe. Merseburg, 27.03.2015.

StaLa BW 2015a

Mäding, A.: Aktuelle und langfristige Entwicklung von Treibhausgas-Emissionen. Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 9/2015.

StaLa BW 2016a

Eckdaten seit 2008 nach Beschäftigtengrößenklassen (Stichtag 30.09.2016); Stuttgart. Online unter <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/Industrie/Struktur/VG-GK-BBEU.jsp> (letzter Zugriff am 26.07.2017).

StaLa BW 2016b

Eckdaten für Wirtschaftszweige seit 2008 (Stichtag 30.09.2016); Stuttgart. Online unter <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/Industrie/Struktur/kenngrWZ2008.jsp> (letzter Zugriff am 26.07.2017).

StaLa BW 2017a

Statisches Landesamt Baden-Württemberg: Endenergieverbrauch des Verkehrs in Baden-Württemberg seit 1965 nach Energieträgern und Verkehrszweigen. Stand 22. Februar 2017. Stuttgart, 2017. Online unter <https://www.statistik-bw.de/Energie/Energiebilanz/LRt1507.jsp> (letzter Zugriff am 26.07.2017).

StaLa BW 2017b

Statisches Landesamt Baden-Württemberg: Entwicklung der Emissionen an Luftschadstoffen des Straßenverkehrs seit 1985 in Baden-Württemberg. Online unter <http://www.statistik-bw.de/Umwelt/Luft/l1a03u05.jsp?path=/Verkehr/KFZBelastung> (letzter Zugriff am 26.07.2017).

StaLa BW 2017c

Statisches Landesamt Baden-Württemberg: Jahresfahrleistungen in Baden-Württemberg 2005 bis 2015 nach Fahrzeugkategorien. Stuttgart, 2017.

StaLa BW 2017d

Statisches Landesamt Baden-Württemberg: Bruttostromerzeugung in Baden Württemberg 2015. Stuttgart, 2017. Zugriff unter <http://www.statistik-bw.de/Energie/ErzeugVerwend/EN-BS-LR.jsp> (letzter Zugriff am 26.07.2017).

Statista 2017

Kostenentwicklung der Blei-Säure-Batterie. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/241773/umfrage/prognose-zur-kostenentwicklung-von-blei-saeure-und-lithium-ionen-batterien> (letzter Zugriff am 20.06.2017).

Steibadler 2013

Arbeiten am Alaufstieg der Schnellbahntrasse Wendlingen-Ulm laufen auf Hochtouren. In: Schwäbisches Tagblatt, 26.06.2013.

TE 2015

Transport s& Environment Briefing: Non-Road Mobile Machinery: The good, the bad and the dirty. European Federation for Transport and Environment AISBL, Brüssel.

The Mobility House 2017a

The Mobility House, Stationäre Ladestationen, [https://shop.mobilityhouse.com/de\\_de/stationaere-ladestationen.html](https://shop.mobilityhouse.com/de_de/stationaere-ladestationen.html) (letzter Zugriff am 11.07.2017).

The Mobility House 2017b

The Mobility House, DC Wallbox, [https://shop.mobilityhouse.com/de\\_de/dc-wallbox-24kw-ccs-chademo-sim-rfid.html](https://shop.mobilityhouse.com/de_de/dc-wallbox-24kw-ccs-chademo-sim-rfid.html) (letzter Zugriff am 11.07.2017).

Thomas et al. 2016

Thomas D.; Mertens, D.; Meeus, M.; van der Laak, W.; Francois, I.: Power-to-Gas: Roadmap for Flanders. Final Report. Hg. v. WaterstofNet vzw. Brussels, 2016.

TRGS 554

Technische Regeln für Gefahrstoffe: Abgase von Dieselmotoren, Ausgabe Oktober 2008, berichtigt: GMBI Nr. 28 S. 604-605 (v. 2.7.2009).

TRGS 900

Technische Regeln für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte, Ausgabe: Januar 2006, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2016 S. 886-889 (Nr. 45) (vom 04.11.2016).

UBA 2017

Umweltbundesamt (Hg.): Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs. Dessau-Roßlau, 2017. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs> (letzter Zugriff am 26.07.2017).

UBA 2017a

Umweltbundesamt (Hg.): Emissionen des Verkehrs. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs> (letzter Zugriff am 10.08.2017).

USGS 2017

U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries 2017.

vbw, 2011

Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V., Rohstoffsituation Bayern – keine Zukunft ohne Rohstoffe, 2011.

VM BW 2016

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg: Mobilitätswende: Minister Hermann spricht im Bundesrat über blaue Plakette und automatisiertes Fahren. <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/ministerium/presse/pressemitteilung/pid/mobilitaetswende-minister-hermann-spricht-im-bundesrat-ueber-blaue-plakette-und-automatisiertes-fah/> (letzter Zugriff am 14.07.2017).

Wittenbrink 2014

Wittenbrink, Paul: Transportmanagement – Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe. Springer: Wiesbaden, 2014.

Ziegler et al. 2015

Ziegler, C.; Rühl, R.; Spod, U.: Abgase beim Bau von Hallen. Fachgespräch der BG BAU. In: BauPortal 127 (2015), H. 3, S. 20-21.

ZDK 2016

Wirtschaftsgesellschaft des Kraftfahrzeuggewerbes (Hg.): Zahlen & Fakten 2015. Bonn, 2016.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: THG-Emissionen in Abhängigkeit von der Fahrleistung am Beispiel des schweren Transporters .....	6	Abbildung 18: Spezifische Emissionen des LKW-Güterverkehrs 1995–2014 (normiert auf 1995) (UBA 2017a) .....	38
Abbildung 2: TCO am Beispiel des schweren Transporters in Abhängigkeit von der Fahrleistung .....	7	Abbildung 19: Anteil der Fahrzeugsegmente an den NO <sub>x</sub> -Emissionen des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg 2015 (Datenbasis: (StaLa BW 2017b)) .....	38
Abbildung 3: Batterieelektrischer und Brennstoffzellenantrieb, Abbildung adaptiert nach (e-mobil BW 2015) .....	23	Abbildung 20: Anteil der Fahrzeugsegmente an den PM <sub>10</sub> -Emissionen des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg 2015 (Datenbasis: (StaLa BW 2017b)) .....	38
Abbildung 4: Gegenüberstellung der Gewichte und Volumina von Diesel, Wasserstoff und Batterie für 500 km Reichweite (von Helholt 2010) .....	24	Abbildung 21: Anteil der einzelnen Fahrzeugsegmente am Gesamtmarktvolumen Nutzfahrzeuge in Deutschland 2015 (Datenbasis: (KBA 2017), (DESTATIS 2017), (ZDK 2016), Auskünfte von VDA, VDMA und Herstellern sowie eigene Preisrecherchen) .....	40
Abbildung 5: Bestand an Transportern nach Größenklassen (Anteile) von 2005 bis 2016 (KBA 2016b, Fz 25) .....	29	Abbildung 22: In der direkten Produktion Beschäftigte nach Fahrzeugsegmenten in Baden-Württemberg (eigene Berechnung anhand von Firmenangaben; keine Daten für Abfallsammelfahrzeuge verfügbar) .....	42
Abbildung 6: Anteil der Fahrzeuge mit Abgasnorm Euro VI nach Nutzfahrzeugsegment in Baden-Württemberg am 01.01.2016 .....	30	Abbildung 23: Produktionsstandorte von Nutzfahrzeugherstellern sowie ausgewählten Zulieferern in Baden-Württemberg ...	43
Abbildung 7: Anteil der Fahrzeugneuzulassungen am Fahrzeugbestand im Jahr 2015 .....	31	Abbildung 24: Übersicht zu Umweltzonen in Deutschland (UBA) .....	48
Abbildung 8: Fahrzeugbestand schwere Nutzfahrzeuge und Kraftomnibusse in Baden-Württemberg zum 01.01.2016 (Datengrundlage: (KBA 2016c)) .....	32	Abbildung 25: Kostenstruktur für einen LKW im Fernverkehr (Wittenbrink 2014) .....	64
Abbildung 9: Berechneter Kraftstoffverbrauch mobiler Maschinen in Baden-Württemberg im Jahr 2010 (Datengrundlage: (ifeu 2014b)) .....	32	Abbildung 26: Preisentwicklung für Li-Ion-Batteriepacks für Elektro-PKW (Claire 2017) .....	66
Abbildung 10: Inländerfahrleistung nach Nutzfahrzeugkategorie für die Jahre 2013–2015, in Mrd. Fzg.-km (KBA, mehrere Jahre) .....	33	Abbildung 27: Entwicklung der Anschaffungskosten beim schweren Transporter im Vergleich zwischen Diesel und BEV; 2015–2030 .....	71
Abbildung 11: Inländerfahrleistung von schweren Nutzfahrzeugen nach Straßenkategorien für die Jahre 2005 bis 2015, in Mrd. Fzg.-km (StaLa BW 2017c) .....	34	Abbildung 28: TCO schwerer Transporter, Vergleich zwischen Diesel und BEV; 2015 und 2030.....	71
Abbildung 12: Entwicklung und Prognose der Güterverkehrsleistung (Mrd. tkm) nach Verkehrsträger; Prognos Referenzentwicklung .....	35	Abbildung 29: TCO schwerer LKW, Vergleich zwischen Diesel und FCEV; 2015 und 2030.....	72
Abbildung 13: Entwicklung und Prognose der Inländerfahrleistung (Mrd. Fzg.-km) der schweren Nutzfahrzeuge nach Fahrzeugart; Prognos Referenzentwicklung .....	35	Abbildung 30: TCO Stadtbus, Vergleich zwischen Diesel und FCEV; 2015 und 2030.....	73
Abbildung 14: Spezifischer Endenergieverbrauch im LKW-Güterverkehr 1995–2014 (Datenbasis: (UBA 2017)) .....	36	Abbildung 31: TCO Abfallsammler, Vergleich zwischen Diesel und FCEV; 2015 und 2030.....	74
Abbildung 15: Endenergieverbrauch des Verkehrs in Baden-Württemberg nach Verkehrsträgern im Jahr 2015 (StaLa BW 2017a) .....	36	Abbildung 32: TCO Radlader, Vergleich zwischen Diesel und BEV; 2015 und 2030.....	75
Abbildung 16: Endenergieverbrauch des Verkehrs in Baden-Württemberg nach Energieträgern von 2005 bis 2015 (Datenbasis: (StaLa BW 2017a)) .....	37	Abbildung 33: Vergleich der Energieeffizienz der Antriebsstränge für einen LKW im Fernverkehr, normiert auf fiktiven Verbrauch.....	84
Abbildung 17: CO <sub>2</sub> -Emissionen des Verkehrs in Deutschland im Jahr 2014 (ohne Biokraftstoffanteile) (BMUB 2016) .....	37	Abbildung 34: Gegenüberstellung der spezifischen Endenergieverbräuche der Diesel- und emissionsfreien Antriebe für die Beispielfahrzeuge.....	85
		Abbildung 35: Stromerzeugungsmix Baden-Württemberg 2015 (StaLa BW 2017d).....	86





Abbildung 36: Stromerzeugungsmix Baden-Württemberg 2030 nach (IEKK 2014)..... 86

Abbildung 37: THG-Emissionen aus der Stromerzeugung in Baden-Württemberg 2030 nach (IEKK 2014) ..... 87

Abbildung 38: Anteil der Energieträger an der Stromerzeugung 2030 mit vollständig erneuerbaren Energien ..... 87

Abbildung 39: Grundprinzip der Elektrolyse von Wasser ..... 88

Abbildung 40: Zusammensetzung des Diesekraftstoffs 2030 (auf Basis Heizwert, Datenbasis: (E4Tech 2013), eigene Berechnungen) ..... 88

Abbildung 41: Materialzusammensetzung schwerer Transporter, Diesel (links) und BEV (rechts) (in % Gewicht) ..... 89

Abbildung 42: THG-Emissionen über den Lebenszyklus für den schweren Transporter ..... 90

Abbildung 43: THG-Emissionen in Abhängigkeit von der Fahrleistung für den schweren Transporter ..... 90

Abbildung 44: Materialzusammensetzung schwerer LKW, Diesel (links) und FCEV (rechts) (in % Gewicht) ..... 91

Abbildung 45: THG-Emissionen über den Lebenszyklus für den schweren LKW ..... 92

Abbildung 46: THG-Emissionen in Abhängigkeit von der Fahrleistung für den schweren LKW ..... 92

Abbildung 47: Materialzusammensetzung Stadtbus, Diesel (links) und FCEV (rechts) (in % Gewicht) ..... 93

Abbildung 48: THG-Emissionen über den Lebenszyklus für den Stadtbus ..... 93

Abbildung 49: THG-Emissionen in Abhängigkeit von der Fahrleistung für den Stadtbus ..... 94

Abbildung 50: Materialzusammensetzung Abfallsammelfahrzeug, Diesel (oben) und FCEV (unten) (in % Gewicht) ..... 94

Abbildung 51: THG-Emissionen über den Lebenszyklus für das Abfallsammelfahrzeug ..... 95

Abbildung 52: THG-Emissionen in Abhängigkeit von der Fahrleistung für das Abfallsammelfahrzeug ..... 95

Abbildung 53: Materialzusammensetzung Radlader, Diesel (links) und BEV (rechts) (in % Gewicht) ..... 96

Abbildung 54: THG-Emissionen über den Lebenszyklus für den Radlader ..... 96

Abbildung 55: THG-Emissionen in Abhängigkeit von der Fahrdistanz für den Radlader ..... 97

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definition der Fahrzeugsegmente ..... 17–22

Tabelle 2: Auswahl an batterieelektrischen und Brennstoffzellennutzfahrzeugen mit Straßenzulassung ..... 25

Tabelle 3: Auswahl an batterieelektrischen und Brennstoffzellennutzfahrzeugen abseits öffentlicher Straßen ..... 25

Tabelle 4: Fahrzeugbestand zum 01.01.2016 nach Nutzfahrzeugsegment in Baden-Württemberg (KBA, mehrere Reihen, und eigene Schätzungen) ..... 28

Tabelle 5: Bedeutende Firmen der Nutzfahrzeugproduktion in Baden-Württemberg (ORBIS-Datenbank, IHK und Unternehmensangaben) ..... 41

Tabelle 6: Mautsätze (eigene Darstellung nach BMVI) ..... 47

Tabelle 7: Übersicht Interviewpartner Expertengespräche ..... 56

Tabelle 8: Qualitative Eignung von BEV und FCEV für verschiedene Nfz-Segmente ..... 60

Tabelle 9: Beispielsegmente und betrachtete Antriebsvarianten ..... 61

Tabelle 10: Fahrzeugdaten für die Beispielsegmente ..... 61

Tabelle 11: Komponenten nach Fahrzeugantrieb ..... 67

Tabelle 12: Spezifische Komponentenkosten ..... 68

Tabelle 13: Energieträgerpreise für 2015 und 2030 ..... 68

Tabelle 14: Angenommene TCO-Effekte durch Digitalisierung bis 2030 ..... 77

Tabelle 15: Batteriechemie der meistverkauften BEV und PHEV 2016 (Romare and Dahllöf 2017) ..... 81

Tabelle 16: Materialzusammensetzung einer Lithium-NMC-Batterie (Datengrundlage: (Romare and Dahllöf 2017)) ..... 82

# Abkürzungsverzeichnis

A	Ampere
BEV	Battery Electric Vehicle/Batterieelektrisches Fahrzeug
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CNG	Compressed Natural Gas/Komprimiertes Erdgas
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid (Treibhausgas)
DPF	Dieselpartikelfilter
FCEV	Fuel Cell Vehicle/Brennstoffzellenfahrzeug
Fzg.-km	Fahrzeugkilometer
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HV-Batterie	Hochvolt-Batterie
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KEP	Kurier-Express-Paketdienst
kg	Kilogramm
LKW	Lastkraftwagen
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
LNG	Liquified Natural Gas/Verflüssigtes Erdgas
LPG	Flüssiggas
LSVA	Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (der Schweiz)
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
PEMS	Portable Emissions Measurement System/Mobiles Emissionsmessgerät
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PJ	Petajoule
PKW	Personenkraftwagen
Pkm	Personenkilometer
PM	Partikel (Particulate Matter)
PM <sub>10</sub>	Partikel mit Durchmesser <10 Tausendstelmmillimeter
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
SZM	Sattelzugmaschinen
TCO	Total Cost of Ownership/Lebenszykluskosten
tkm	Tonnenkilometer
Tsd.	Tausend
TWh	Terawattstunde
UBA	Umweltbundesamt
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
WtW	Well-to-Wheel (von der Quelle bis zum Rad)
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

# Impressum

## **Herausgeber**

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und  
Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg

## **Autoren:**

Prognos AG:

Sven Altenburg, Alex Auf der Maur, Alexander Labinsky

thinkstep AG:

Dr. Stefan Eckert, Dr. Michael Faltenbacher,  
Dr. Benjamin Reuter

## **Redaktion und Koordination der Studie**

e-mobil BW GmbH

Max Bechler

Isabell Knüttgen

Dr. Manuel C. Schaloske

## **Layout/Satz/Illustration**

markentrieb

Die Kraft für Marketing und Vertrieb

## **Fotos**

Umschlag: Chesky\_W/istockphoto

Die Quellennachweise aller weiteren Bilder befinden  
sich auf der jeweiligen Seite.

## **Druck**

Karl Elser Druck GmbH

Kißlingweg 35

75417 Mühlacker

## **Auslieferung und Vertrieb**

e-mobil BW GmbH

Leuschnerstraße 45

70176 Stuttgart

Telefon +49 711 892385-0

Fax +49 711 892385-49

info@e-mobilbw.de

www.e-mobilbw.de

**Oktober 2017**

## **© Copyright liegt bei den Herausgebern**

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.



[www.e-mobilbw.de](http://www.e-mobilbw.de)

**e-mobil BW GmbH**

Landesagentur für Elektromobilität und  
Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg

Leuschnerstraße 45 | 70176 Stuttgart  
Telefon +49 711 892385-0 | Fax +49 711 892385-49  
[info@e-mobilbw.de](mailto:info@e-mobilbw.de)



 ZERO  
EMISSION

