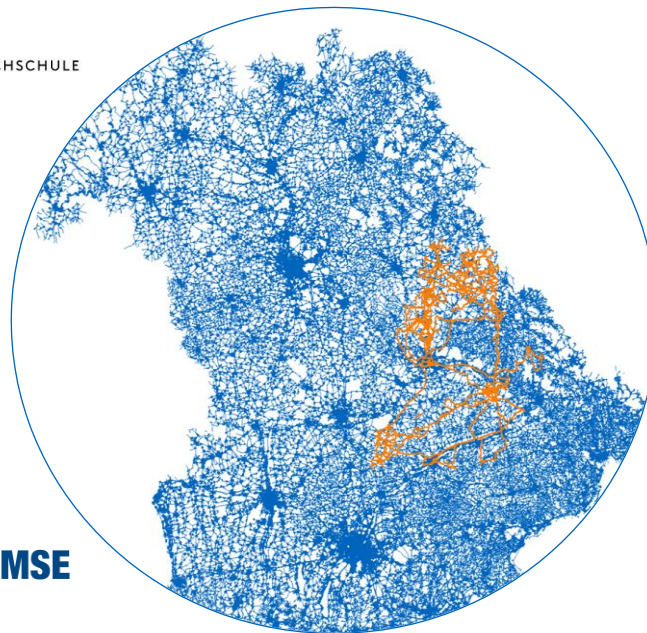

Status Report 2016

Gefördert durch:



Bayerische
Forschungsförderung



KÜHNE+NAGEL

Bayerische Kooperation für Transporteffizienz - Truck 2030

Projektbezeichnung

Bayerische Kooperation für Transporteffizienz - Truck 2030

Technische Universität München

Christian Mährle, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

Dr.-Ing. Martin Härtl, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

Michael Fries, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Michael Sinning, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Wotan Wilden, Lehrstuhl für Industrial Design

Simon Rauchbart, Lehrstuhl für Industrial Design

Prof. Fritz Frenkler, Lehrstuhl für Industrial Design

Ostbayerische Technische Hochschule

Prof. Dr.-Ing. Werner Bick, Fakultät Betriebswirtschaftlehre Schwerpunkt Logistik

Prof. Dr. rer. Pol. Bianca Gänßbauer, Fakultät Betriebswirtschaftlehre Schwerpunkt Logistik

AVL Software & Functions GmbH

Dr.-Ing. Moritz Frobenius

Sebastian Kascha

Samuel Swamidass

Elflein Spedition & Transport GmbH

Rüdiger Elflein

Matthias Dürrbeck

Manuel Greb

Knorr-Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH

Dr.-Ing. Johannes Scharpf

Christian Stahl

Kögel Trailer GmbH & Co. KG

Reinhard Kreis

Gerhard Schmutz-Eggert

Kühne + Nagel (AG & Co.) KG

Wolfgang Herrling

Steffen Achenbach

Regensburg/ München, September 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzbeschreibung	1
2	Einleitung	2
3	Kunde/Markt/Gesetzgeber	3
3.1	Analyse der Gütergruppen und der Kundenstruktur	3
3.1.1	Transportaufgaben und Trends	3
3.1.2	Mobilitätsdatenanalyse	5
3.2	Infrastruktur	6
3.2.1	Be- und Entladekonzepte im modernen Industrieumfeld.....	6
3.2.2	Kraftstoffinfrastruktur	9
3.3	Gesetzliche Rahmenbedingungen in Europa	10
3.3.1	Abmessungen und Massen	10
3.3.2	Emissionsgesetzgebung.....	12
4	Fahrzeug	15
4.1	Gesamtfahrzeugkonzepte	15
4.2	Aerodynamik	17
4.3	Antrieb.....	18
4.3.1	Effizienzmaßnahmen am Verbrennungsmotor.....	18
4.3.2	Dauerbremsanlage.....	20
4.3.3	Hybridisierung von Nutzfahrzeugantrieben	20
5	Zusammenfassung und Ausblick	24
6	Glossar	26
7	Anhang A: Mobilitätsdaten	28
8	Anhang B: Aerodynamik	30
9	References	41

1 Kurzbeschreibung

Projektbezeichnung:

Bayerische Kooperation für Transporteffizienz – Truck 2030

Zusammenfassung:

Ergebnis der ersten Projektphase ist ein realistisches Transportszenario für Deutschland und die EU im Jahr 2030. Das Szenario berücksichtigt wichtige Trendstudien zu den Gütergruppen sowie aktuelle und künftige Rahmenbedingungen zur Kundenstruktur, Infrastruktur und Gesetzgebung.

Das Ergebnis der Trendstudie zeigt drei wesentliche Gütergruppen: Sammelgut, Automotive-Güter sowie Nahrungs- und Genussmittel. Die häufigsten Transportkonzepte für die fokussierten Gütergruppen sind Direktverkehre mit hohem Transportvolumen auf langen Strecken und regionale Rundlaufverkehre. Zur Erstellung realistischer Fahrprofile wird das Bewegungsmuster repräsentativer Fahrzeugflotten aufgezeichnet.

Die Be- und Entladung erfolgt bei den Gütergruppen Nahrungs- und Genussmittel sowie Sammelgut aktuell noch weitestgehend ohne Automatisierungstechnik. Dagegen findet man im Bereich Automotive zumindest teilweise eine optimierte Be- und Entladeinfrastruktur mit automatisierter Toranmeldung, Rangierhilfen sowie intelligenten Ladungsträgern und Docking-Systemen vor.

Die Kraftstoffinfrastruktur der EU für das Jahr 2030 beinhaltet ein ausgebautes Flüssigerdgasnetz (Blue Corridor). Außerdem kann die bereits vorhandene Tankstelleninfrastruktur für synthetische Kraftstoffe (bspw. OME) verwendet werden.

Im Rahmen des Szenarios wird eine Absenkung der Schadstoffgrenzwerte auf etwa 50 % der heutigen gültigen Höchstwerte durch den Gesetzgeber erwartet. Die kommende CO₂-Ausstossgrenze für Nutzfahrzeuge unterliegt den EU-Einsparungszielen für das Jahr 2050 im Transportsektor von 60 % gegenüber 1990. Durch den Gesetzgeber werden auf europäischer Ebene aerodynamische Anbauten zur Verbesserung des Verbrauchs erlaubt und verlängerte Fahrerinnen zur Verbesserung von Aerodynamik und Verkehrssicherheit ermöglicht. Zusätzlich werden alternative Antriebe durch die Erhöhung der zulässigen Gesamtmassen begünstigt.

Auf Basis aktueller wissenschaftlicher Veröffentlichungen, Studien und eigener Berechnungen werden die ökologischen und ökonomischen Einsparpotenziale verschiedener Gesamtfahrzeugkonzepte, Aerodynamikmaßnahmen und Antriebstechnologien analysiert und bewertet. Diese bilden die Grundlage für die spätere Modellierung des Truck 2030, welcher in Summe eine Reduktion der aktuellen Gesamtkosten von ca. 20 - 30 % erreichen wird.

Homepage: www.truck2030.tum.de

Vorgesehene Projektlaufzeit: 02/2016 – 01/2019

Berichtszeitraum: 02/2016 – 07/2016

Sprecher:

Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister
Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen
Technische Universität München (TUM)
Boltzmannstraße 15
85748 Garching bei München

2 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird ein Gesamtfahrzeugkonzept für den Straßengüterverkehr in Europa für das Jahr 2030 erarbeitet. Ziel dabei ist es, die Gesamtkosten für den Fahrzeugbetreiber deutlich zu reduzieren. Vor dem Hintergrund verschärfter Anforderungen durch das Marktumfeld, im Hinblick auf Technologiekosten, Kraftstoffpreise und gesetzliche Rahmenbedingungen stellt die Lösung der Problemstellung eine interdisziplinäre Herausforderung dar.

Von Seiten der Spediteure unterstützen Elflein und K+N das Projekt mit Telemetriedaten und Erfahrungen aus der Praxis. In Zusammenarbeit mit dem FTM wurde in der ersten Projektphase ein Flottenversuch zur Erfassung der Mobilitätsdaten durchgeführt. Des Weiteren wurden die am häufigsten transportierten Gütergruppen und wichtigsten Logistiktrends für das Jahr 2030 gemeinsam mit der OTH Regensburg abgeleitet. Die Entwicklungsarbeit zur Erschließung von technischen Potentialen wird fachlich von AVL, Knorr-Bremse und Kögel forciert. Im bisherigen Projektverlauf wurden gemeinsam mit der TUM unbearbeitete Themenfelder zur Verbesserung von Gesamtfahrzeug-, Brems- und Antriebskonzepten quantifiziert. Die Partner der TUM und der OTH liefern den wissenschaftlichen Unterbau des Kooperationsprojektes zu Forschung und Dokumentation der Ergebnisse.

Im Anschluss an die abgeschlossene erste Projektphase wird auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse und der definierten Rahmenbedingungen für das Jahr 2030 ein Lkw simulativ ausgelegt, bewertet, detailliert und validiert. Anhand von Feedback durch die Fachöffentlichkeit wird das Konzept nochmals überarbeitet und anschließend in einem digitalen Modell visualisiert.

Der vorliegende Zwischenbericht gliedert sich in die Bereiche Kunde/Markt/Gesetzgeber und Fahrzeug. Er fasst den aktuellen Forschungsstand der Kooperationspartner zusammen. Im ersten Teil des Berichts werden die Rahmenbedingungen für Nutzfahrzeuge im Jahr 2030 genauer betrachtet. Dazu zählt die Entwicklung des Transportaufkommens und der typischen Routenverlauf. Des Weiteren wird die vorhandene, zukünftige sowie erforderliche Infrastruktur für Nutzfahrzeuglogistik und –betrieb analysiert. Die gesetzlichen Anforderungen an Nutzfahrzeuge im Jahr 2030 werden in das Szenario miteinbezogen. Der zweite Teil des Berichtes beschreibt die wichtigsten Aspekte zur Effizienzsteigerung innerhalb der Fahrzeugtechnik. Ausgehend von Gespannkonzepten, über aerodynamische Maßnahmen zur Fahrwiderstandsreduzierung bis hin zu komplexen Antriebstechnologien und einer Hybridisierung werden die voraussichtlichen Ersparnisse und Kosten analysiert. Der Bericht schließt mit einer Zusammenfassung der Erkenntnisse und der daraus folgenden Definition des Szenarios im Jahr 2030. Im Anhang finden sich erste Ergebnisse der Mobilitätsdatenanalyse des FTM, sowie eine ausführliche Studie von Designkonzepten für schwere Nutzfahrzeuge des Lehrstuhls für Industrial Design.

3 Kunde/Markt/Gesetzgeber

Im Folgenden wird ein wahrscheinliches Szenario aus den Rahmenbedingungen Gütergruppen und Kundenstruktur, Infrastruktur sowie gesetzliche Vorschriften skizziert. Der Fokus liegt auf der Erfassung der wichtigsten Trends für das Fahrzeugkonzept.

3.1 Analyse der Gütergruppen und der Kundenstruktur

3.1.1 Transportaufgaben und Trends

Gütergruppen - Trends

Über eine Einteilung in Gütergruppen lassen sich Waren artverwandt zusammenfassen, kategorisieren und vergleichen. Die beschriebenen Gütergruppen richten sich nach der Einordnung NST-2007 [1], die auf der CPA (Classification of Products by Activity) basiert und sich in 20 Haupt- und verschiedene Untergruppen gliedert.

Aufgrund der Tatsache, dass kein Fahrzeugkonzept erstellt werden kann, das für sämtliche Gütergruppen (gleichermaßen) geeignet ist, haben sich die Projektpartner darauf verständigt, sich auf Stückgüter zu konzentrieren. Diese umfassen allgemein Güter wie Palettenware, Fässer, Ware in Gitterboxen oder auf bzw. in anderen Mehrweg- oder Einwegbehältern. Ausgeschlossen werden sämtliche Güterkategorien, die Sonderaufbauten zum Transport benötigen. Dazu zählen Schütt- und Flüssiggüter, sowie Gase, landwirtschaftliche Erzeugnisse und Abfälle. Gütergruppen, wie Sammelgut oder Automotive-Güter müssen differenziert betrachtet werden, weil für den Transport teilweise Spezialequipment erforderlich ist (z.B. Autotransporter für fertige Fahrzeuge). Für die Abschätzung des vom Truck 2030 abgedeckten Transportvolumens werden daher die Transporte, die Spezialequipment erfordern, herausgerechnet. Damit verbleiben für das Projekt folgende Gütergruppen, die gemäß der NST-2007-Hauptgruppen zusammengefasst werden:

- Sammelgut¹
- Automotive-Güter²
- Nahrungs- und Genussmittel

Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung

Nachfolgend werden die oben genannten Gütergruppen näher betrachtet. Die Zahlen sind der Verkehrsverflechtungsprognose des Bundesministeriums für Verkehr und Infrastruktur entnommen [2].

Tabelle 1: Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr. Quelle: [2]

Gütergruppe	Verkehrsaufkommen (Mio. t)		Wachstumsprognose		Verkehrsleistung (Mrd. tkm)		Wachstumsprognose	
	2010	2030	% p.a.	% absolut	2010	2030	% p.a.	% absolut
NST-2007 Güter gesamt	3116,1	3639,1	0,8	16,8	437,3	607,4	1,7	38,9
Nahrungs- und Genussmittel	341,7	442,1	1,3	29,4	66,8	96,4	1,8	44,3
Sammelgut	315,9	409,6	1,3	29,7	71,7	101,3	1,7	41,3
Automotive-Güter	366,7	472,4	1,3	28,8	82,5	116,5	1,7	41,2

Nach den Prognosen des BMVI wächst das Gesamtverkehrsaufkommen für den Straßenverkehr bis 2030 um 523,0 Mio. t. Damit liegt hinsichtlich des Basisjahres 2010 ein Gesamtwachstum von 16,8 %

¹ Dazu gehören neben dem Sammelgut die Untergruppen: Papier und Druckerei, Geräte und Material für die Güterbeförderung (Berücksichtigung jeweils mit 50 %), Post und Pakete, Umzugsgut, sonstige nicht marktbestimmte Güter

² Dazu gehören: Metalle und Metallerzeugnisse, Fahrzeuge (mit 80 % berücksichtigt), Maschinen und Ausrüstungen sowie Geräte und Material für die Güterbeförderung (mit 50 % berücksichtigt)

vor. Die für diese Studie relevanten Gruppen machen 2030 mit einem Anteil von 1324,1 Mio. t 36,4 % des Gesamtaufkommens aus. 2010 lag dieser Anteil bei 32,9 %. Jede der drei Kategorien kann ein überdurchschnittliches Wachstum vorweisen, wodurch deren Bedeutung weiter unterstrichen wird.

Nahrungs- und Genussmittel: In der 20-jährigen Betrachtungszeit ist ein Zuwachs des Verkehrsaufkommens von 100,4 Mio. t zu erwarten. Damit fällt die Gesamtmenge 2030 um 29,4 % höher aus als im Jahr 2010. Bei der Verkehrsleistung belegt die Gütergruppe die letzte Position. Mit einem Zuwachs von 29,6 Mrd. tkm auf insgesamt 96,4 Mrd. tkm bis 2030 weisen die Güter das stärkste prozentuale Wachstum von 44,3 % auf.

Sammelgüter: Bei der absoluten Veränderung des Verkehrsaufkommens verzeichnet das Sammelgut das geringste Wachstum, bezogen auf den prozentualen Zuwachs von 29,7 % zum Basisjahr 2010 jedoch das größte. Beim erwarteten Verkehrsaufkommen liegt das Sammelgut voraussichtlich auch 2030 noch hinter den anderen beiden Gütergruppen. Die Bedeutung hinsichtlich der Transportleistung ist höher. Im Vergleich zu den Volumentransporten liegt die absolute Veränderung der Sammelgüter mit 29,6 Mrd. tkm darunter, das prozentuale Wachstum mit 41,3 % knapp darüber.

Automotive-Güter: Das Aufkommen der Volumentransporte liegt in Mio. t an erster Stelle. Jedoch muss bedacht werden, dass sich dies aus einer Kombination von verschiedenen Gütergruppen zusammensetzt. Jede dieser Gruppen verzeichnet ein überdurchschnittliches Wachstum. Das prozentuale Wachstum liegt mit 28,8 % leicht unter dem der beiden anderen Gütergruppen. Die hohe Relevanz von Volumengütern ist auch künftig bezüglich der Verkehrsleistung hoch. Mit einer absoluten Veränderung um 34,0 Mrd. tkm liegt die Gütergruppe auch 2030 vor den anderen. Zu beachten ist wieder die Zusammensetzung der Werte aus den Werten der vier beachteten Unterkategorien.

Transportkonzepte

Innerhalb der relevanten Gütergruppen haben sich verschiedene Transportkonzepte etabliert, die sich in unterschiedlichen Streckenprofilen äußern und diverse Fahrzeugtypen und -ausstattungen erfordern. Grundsätzlich kann zwischen Verteiler- und Fernverkehr unterschieden werden.

Im **Verteilerverkehr** werden abhängig vom Sendungsaufkommen und der Tour beim *Sammelgut* entweder Klein- oder Großfuhrparkfahrzeuge eingesetzt. Zum Kleinfuhrpark zählen 7,5 und 12 Toner, zum Großfuhrpark 7,20 und 7,82 High Cube Wechselbrückenfahrzeuge. Beim Kleinfuhrpark liegt die Anzahl der Stopps bei ca. 17 pro Fahrzeug, beim Großfuhrpark bei ca. 5. Die durchschnittliche Fahrstrecke beträgt 250 km. Die Gewichtsauslastung beim Kleinfuhrpark liegt im Mittel bei 6.000 kg, beim Großfuhrpark bei etwa 19.000 kg pro Fahrzeug. Je nach Infrastruktur bei der Be- bzw. Entladestelle sind die Fahrzeuge zum Teil mit Hebebühnen ausgestattet.

Im *Automotive-Bereich* kommen beim Verteilerverkehr – speziell sog. Milk-Runs oder Zwischenwerksverkehre - Trailer und Megatrailer mit Planenaufbau zum Einsatz, weil bei der Gütergruppe Automotive häufig seitlich be- und entladen wird. Die Transportstrecke beträgt v.a. bei der Verteilerverkehrsvariante Zwischenwerksverkehr in der Regel 50 km bis maximal 250 km. Die durchschnittliche Gewichtsauslastung liegt bei den eingesetzten Fahrzeugen bei 12 Tonnen.

Bei der Gütergruppe *Nahrungs- und Genussmittel* ist mit Verteilerverkehren die Filialbelieferung gemeint. Dafür werden ebenfalls Trailerfahrzeuge, aber auch Tandemzüge und Gliederzüge – mit oder ohne Hebebühne, je nach Filialeninfrastruktur – aber immer mit Kofferaufbau und Kühlaggregat verwendet. Wichtigstes Kriterium bei der Fahrzeugwahl ist in dem Fall die Anzahl der Stellplätze auf der Ladefläche. Bis auf wenige Produkte, wie z.B. Getränke liegt die durchschnittliche Gewichtsauslastung bei 15 Tonnen. Die durchschnittliche Transportstrecke beträgt 250 km.

Im **Fernverkehr** kommen bei der Gütergruppe *Sammelgut* in erster Linie 7,82 High Cube Wechselbrücken, Trailer, Megatrailer sowie Doppelstocktrailer zum Einsatz. Die durchschnittliche Auslastung liegt bei allen Fernverkehrsvarianten (Direktverkehren, Begegnungsverkehren, Hubverkehren und Rundlaufverkehren) bei ca. 11 Tonnen, die durchschnittliche Fahrstrecke bei 400 bis 600 km, wobei die Fahrten meist im sog. Nachtsprung erfolgen, so dass die Fernverkehrsfahrzeuge bis spätestens

5 Uhr beim Empfangsspediteur ankommen. Die Be- und Entladung erfolgt typischerweise über Heck. Außerdem sind zumindest die Trailerfahrzeuge i.d.R. mit einer Schlafkabine ausgestattet. Bei der Gütergruppe *Automotive* wird im Fernverkehr mit Trailer, Megatrailer, Lang-Lkw und Jumbo-Gliederzügen gearbeitet, jeweils mit Schlafkabine und Planenaufbau, weil die Be- und Entladung wie bei den Verteilerverkehren im Automotive-Bereich meist seitlich erfolgt und die Automotive-Güter typischerweise sehr voluminös aber vergleichsweise leicht sind. Die Transportstrecke beträgt innerdeutsch max. 700 km, durchschnittlich ca. 550 km bei einer Auslastung von ca. 15 Tonnen. Bei der Gütergruppe *Nahrungs- und Genussmittel* werden die Fernverkehrstransporte (i.d.R. Direktverkehre zur Versorgung der Zentral- und/oder Regionalläger) im Non-Food-Bereich mit Trailerfahrzeugen mit Planenaufbau und im Food-Bereich mit Trailerfahrzeugen mit Kofferaufbau und Kühlaggregat durchgeführt. Die durchschnittliche Transportstrecke beläuft sich innerdeutsch ebenfalls auf ca. 550 km bei einer durchschnittlichen Gewichtsauslastung um die 15 Tonnen. Wichtigstes Kriterium für die Fahrzeugwahl ist - wie beim Verteilerverkehr - die Stellplatzanzahl. Die oben aufgeführten Transportkonzepte unterscheiden sich sowohl bei den Verteilerverkehren als auch bei den Fernverkehren insbesondere im Hinblick auf den Fahrzeugaufbau. Hauptziel ist jeweils eine bestmögliche Auslastung des eingesetzten Nutzfahrzeuges. Bis zum Jahr 2030 werden keine revolutionären Veränderungen der Abläufe und damit der Transportkonzepte erwartet. Es wird aber mit Verbesserungen durch technologische Neuerungen gerechnet, das Anforderungsprofil an die Fahrzeuge erfährt auf lange Sicht keine gravierende Veränderung.

3.1.2 Mobilitätsdatenanalyse

Im Zeitraum vom 14.04.2016 bis zum 24.06.2016 wurden bei den beteiligten Speditionen (K+N und Efllein) insgesamt 16 Fahrzeuge im Fern- und Nahverkehr mit Smartphones ausgestattet. Die Smartphones können, durch eine eigens am FTM für die Flottenaufzeichnung entwickelte App, die GPS- und Beschleunigungsdaten der Fahrzeuge mitloggen und übermitteln. Tabelle 2 gibt eine Übersicht der vermessenen Fahrzeugflotte.

Tabelle 2: Übersicht Fahrzeugflotte

Transportkonzept	Fernverkehr	Linie	Verteilerverkehr
Anzahl der Fahrzeuge	5	5	6
Aufbau	5x Auflieger	1x Lang-Lkw 2x Auflieger Big Maxx 1x Auflieger 1x Solo	6x Plane
zul. Gesamtgewicht. Zugmaschine	4x 18t 1x 7,5t	4x 18t 1x 7,5t	5x 12t 1x 7,5t
Ladung	5x Stückgut	5x Automotive	6x Stückgut
Zurückgelegte Kilometer	95.279 km	106.391 km	34.977 km

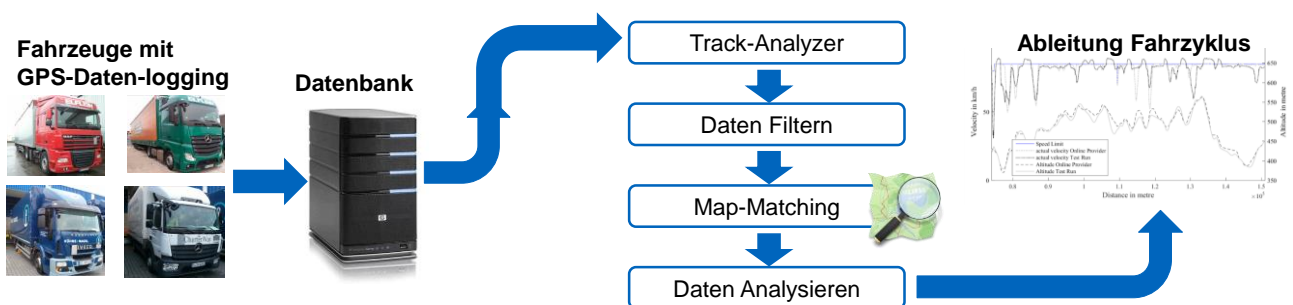


Abbildung 1: Toolkette zur Ableitung repräsentativer Fahrzyklen

Abb. 1 zeigt das Vorgehen zur Aufbereitung der erhobenen Daten mit der Hilfe einer Toolkette. Das Ziel der Datenaufbereitung ist die Ableitung von repräsentativen Fahrzyklen nach jeweiligem Transportkonzept. Auf Basis der abgeleiteten Fahrzyklen können die Nutzfahrzeugkonzepte ausgelegt und optimiert werden.

Workflow der Toolkette: Nachdem Aufzeichnen der GPS-Daten sendet die App automatisiert bei Verbindung mit WLAN die Daten an einen FTM-Server. Der erste Schritt des Postprocessings der Rohdaten ist der Track-Analyzer. Die aufgezeichneten Datenabschnitte werden in sinnvolle Teilabschnitte zusammengeführt oder getrennt. Danach werden die Daten entsprechend der Transportkonzepte gefiltert. Das Map-Matching passt die aufgezeichneten GPS-Daten an die exakten Straßendaten von Open street map [3] an. Die Datenanalyse ist der letzte Schritt zur Aufbereitung der durchschnittlichen Tageslaufleistungen, durchschnittlichen Stop & Go Vorgänge und der Geschwindigkeitsprofile nach Transportkonzept.

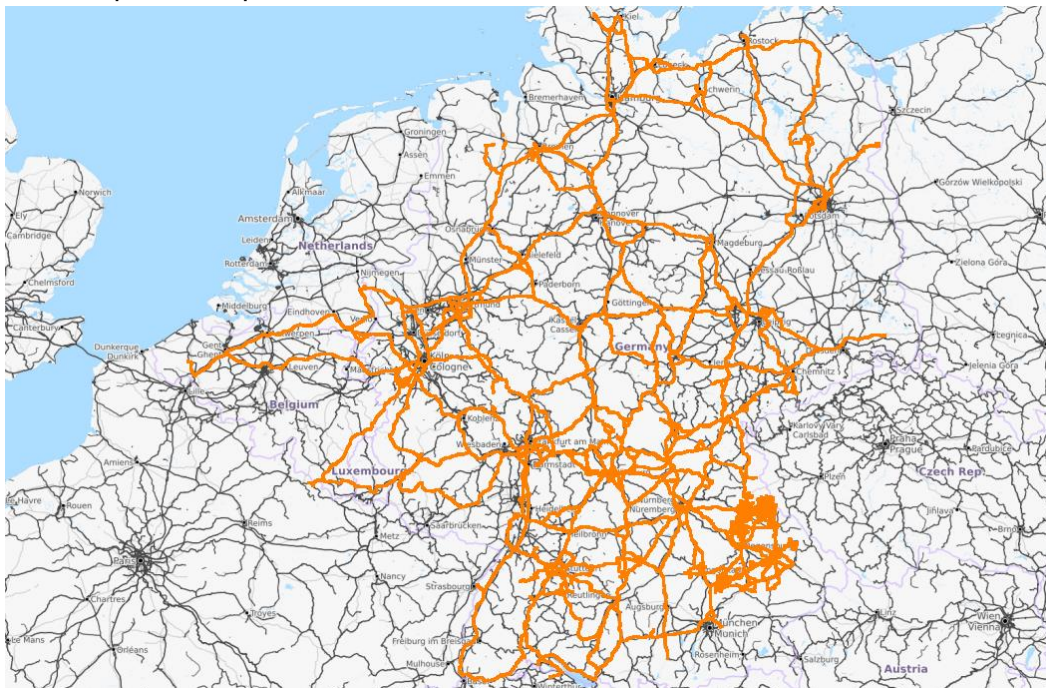


Abbildung 2: Gesamtes Bewegungsmuster des Flottenversuches

Ausblick

Eine detaillierte Datenanalyse zur Auswertung der Stopps, Tageslaufleistungen, Geschwindigkeitsverläufe, etc. erfolgt im weiteren Projektverlauf. Aus den aufbereiteten Daten wird mit Hilfe statistischer Untersuchungen ein repräsentatives verkürztes Geschwindigkeits- und Höhenprofil für die häufigsten Transportkonzepte abgeleitet. Die erstellten Fahrzyklen dienen zur Auslegung der Fahrzeugkonzepte. Erste Ergebnisse zur Tageskilometeranalyse sind dem Anhang A zu entnehmen.

3.2 Infrastruktur

3.2.1 Be- und Entladekonzepte im modernen Industrieumfeld

Zur Optimierung der aktuellen Be- und Entladekonzepte im Kontext von Industrie 4.0 wird exemplarisch der Automotive-Bereich herangezogen. Die wesentlichen Elemente der nachfolgenden Erläuterungen können jedoch auch auf die anderen Gütergruppen übertragen werden. Die Anforderungen an die Fahrzeugausstattung zur Be- und Entladung bezogen auf die unterschiedlichen Gütergruppen wurden bereits im Kapitel Transportkonzepte näher betrachtet.

Ausgangssituation

Wareneingang/Entladung

Der Lieferant bucht beim Kunden ein Zeitfenster für die Entladung des Lkw. Danach erfolgt der Warentransport zum Kunden. Bei Ankunft meldet sich der Lkw am Leitstand, wo der Fahrer den Passierschein ausfüllt, den er für die Weiterfahrt benötigt. Im Werk nimmt der administrative Wareneingang die Lieferpapiere entgegen und prüft die Einhaltung des Zeitfensters und die Frachtpapiere auf Vollständigkeit.³ Die per DFÜ übermittelten Transport- und Lieferscheindaten werden im Warenwirtschaftssystem verbucht. Sind alle Daten korrekt und steht die Entladereihenfolge fest, wird der Lkw einer Entladestelle zugesteuert, abgeplant und entladen. Die Ware wird nach der Entladung sortiert und zur Warenvereinnahmung bereitgestellt. Im operativen Wareneingang findet eine Prüfung auf Fehlmengen oder Beschädigungen und je nach Lieferant und Material zusätzlich eine Qualitätsprüfung statt. Der Empfang der Ware wird quittiert, der Status des Materials auf Wareneingang gesetzt und zum Schluss das Material in die Produktion (JIT/JIS) oder das Lager abtransportiert.

Leergut

Nachfolgend kann der Lkw mit leeren Ladungsträgern beladen und wieder beplant werden. Leergutstempel auf dem Frachtbrief geben Auskunft über Anzahl und evtl. Beschädigungen von Ladungsträgern. Zurück im administrativen Wareneingang endet die Wareneingangsbearbeitung. Nach Prüfung der Leergutstempel und Abgabe des Passierscheins verlässt der Lkw das Werk.

Warenausgang/Beladung

Eine Kundenbestellung erzeugt beim Lieferanten einen Transportauftrag, der die Daten der benötigten Artikel enthält und auch als Kommissionierliste bezeichnet wird. Die bestellten Artikel werden kommissioniert, am Ausgabepunkt bereitgestellt [4] und der Warenbegleitschein (Lieferschein) nach VDA 4913 vorab elektronisch übermittelt. Diese Nachricht entspricht der Transportankündigung (Lieferavis). Zeitgleich erfolgt eine Abbuchung aus dem Bestand des Warenausgangslagers und der Lkw-Fahrer erhält die Lieferpapiere. Nach dem Beladen beginnt der Lkw seine Fahrt [5].

Abwicklung unter Einsatz von Industrie 4.0 Bausteinen

Integration von RFID im Materialein- und Ausgangsprozess

Ein verfügbares technisches Hilfsmittel, das noch nicht flächendeckend in der Transportlogistik eingesetzt wird, ist die RFID-Technologie. Denkbar ist eine Verwendung im Warenaus- und -eingang, indem die Ladung an sich oder Ladungsträger sowie Lkw mit RFID-Transpondern versehen werden. Die Chips können an der Rampe sekundenschnell automatisch im Pulk gelesen und der Warenfluss im System verbucht werden. Zudem wird auf den Transponder am Lkw der Ladungsinhalt in Form eines Lieferscheins gespeichert und elektronisch an den Kunden übermittelt. Sobald der Lkw beim Kunden eintrifft, wird er automatisch gelesen und mit Systemdaten abgeglichen. Die manuelle Kontrolle entfällt. Der Mitarbeiter erhält vom System auf ein mobile device die Entladungsfreigabe oder wird bei Unstimmigkeiten informiert. Die Transponderdaten werden nach Entladung gelöscht und ggf. neue Daten gespeichert, z.B. wenn der Lkw mit Leergut beladen wird.

Zeitfenstermanagementsysteme

Für eine bestmögliche Auslastung der Rampenressourcen kommen Zeitmanagementsysteme zum Einsatz. Sie geben an, zu welchen Zeitfenstern eine Rampe frei ist, glätten die Aufkommensspitzen von ankommenden Lkw beim Kunden und erhöhen die Transparenz bei der Frequentierung der Laderampen. Es gibt zurzeit 3 Arten solcher Systeme: Zeitvorgabe durch den Rampenbetreiber, telefonisches Zeitfenstermanagement und Zeitfenstermanagement über elektronische Plattformen.

³ Das heißt: Lkw Passierschein, Frachtbrief und Lieferschein bzw. die Datenfernübertragungs- (DFÜ) Warenbegleitscheine im Original, bei Zollsendungen zudem Zollpapiere müssen vorliegen.

Warehouse on Wheels & Trailer Yard-Konzept

Beim *Warehouse on Wheels* erfolgt die Materialbereitstellung direkt aus einem Volllast-Lkw, der verbauortnah angedockt wird. Voraussetzung ist die fertigungssynchrone Bereitstellung von vorsequenzierten Teilen (JIS). Das Leergut wird in einem zweiten Lkw, der sich neben dem Voll-Lkw befindet, gesammelt. Sobald der Leergut-Lkw voll und der Voll-Lkw vollständig entladen ist, findet ein Austausch der Trailer statt. D.h. ein neuer Voll-Lkw wird angeliefert und der inzwischen leere Voll-Lkw wird zum Leergut-Lkw. Ein sog. *Trailer Yard* ist ein verbauortnah liegender Lkw-Auflieger-Puffer, bestehend aus mehreren Aufliegern vom Lieferanten. Sobald ein voller Auflieger abgestellt wird, kann im Anschluss ein Leergut-Auflieger mitgenommen werden. Die vollen Trailer werden von der Fertigung des Kunden mit kleinen Zugmaschinen selbst abgerufen.

Be- und Entladung mittels Lkw-Anpassung und stationäre Fördersysteme

Bei einer Verladung durch Anpassung des Lkw und der stationären Fördersysteme kommt meist zusätzlich zu den stationären Aufbauten an der Rampe eine Ladeflächenfördertechnik auf dem Lkw-Auflieger zum Einsatz. Bei anderen Systemen erübrigt eine spezielle ausziehbare Fördertechnik im Be- und Entladebereich die zusätzliche technische Anpassung des Lkw. Dadurch werden die Standzeiten reduziert.

Optimierte Toranmeldung mittels Smartphone

Alle relevanten Informationen, die am Leitstand bzw. Werkstor bisher durch ein Formular erfragt wurden, können mittels Near-Field-Communication direkt im Smartphone des Fahrers gespeichert und am Tor des Kunden über eine Schnittstelle automatisch übertragen werden. Fehler beim händischen Ausfüllen oder Sprachbarrieren werden somit verringert und Zeit eingespart.

App als Rangierhilfe

Lang-Lkw sind im Rangierverkehr schwieriger zu handhaben als Standardfahrzeuge. Eine App, mit der durch ein Tablet der komplette Lkw ferngesteuert rangiert werden kann, soll helfen. Dabei werden Bluetooth-Low-Energy-Tags und Kameras verwendet und durch Touch-Eingabe am Tablet der Lkw in die richtige Position bewegt. Auch bei *Nahrungs- und Genussmitteln* wäre die Rangierhilfe bei den Verteilerverkehren sinnvoll, da die Schadenshöhe durch Beschädigungen an parkenden Fahrzeugen hier nicht unerheblich ist. Ebenso würde im Sammelgutbereich ein automatisiertes Umsetzen der Wechselbrücken durch Wechselbrücken-Rangierfahrzeuge der Spedition einen Mehrwert bieten.

Intelligente Ladungsträger

Auch der Ladungsträger kann als Informationsträger eingesetzt werden, indem ein RFID-Transponder verbaut wird, auf dem gespeichert wird, was sich auf dem Ladungsträger befindet, sowie der Herkunfts- und Zielort innerhalb der Supply-Chain. Erfassung und Verbuchung erfolgen automatisch an der Rampe. Wenn alle Prozesspartner der Supply-Chain zusammenarbeiten und bei jeder Chiperrfassung eine Datenbank aktualisiert wird, auf die über die Cloud zugegriffen werden kann, kennt jeder Prozesspartner den aktuellen Aufenthaltsort der Ware. Zudem wird der Leergutprozess vereinfacht, da selbst der Aufenthaltsort von leeren Paletten noch erfasst wird und z.B. ein Lkw automatisch bestellt wird, wenn sich genug Leergut angesammelt hat. Der intelligente Behälter für Industrie 4.0, ist mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, energieautark und kommunikationsfähig, versorgt sich über Solarzellen mit Energie und weiß immer, wo er sich gerade befindet. Über M2M und HMI kann er seiner Umwelt gespeicherte Informationen mitteilen.

Geofencing (GPS-Überwachung)

Durch Geofencing und Apps auf mobile devices, sollen Staus an der Rampe vermieden und Wartezeiten verkürzt werden. Lkw-Fahrer nutzen dazu ein Smartphone, das in Echtzeit seine Position an die Leitstelle übermittelt. Dadurch kann man schon frühzeitig auf Verzögerungen reagieren und ggf. Zeitfenster anderweitig vergeben. Die manuelle Lieferscheinprüfung am Werk entfällt, alle relevanten

Informationen sind in der App hinterlegt, die durchschnittliche Durchlaufzeit eines Lkw wird verkürzt. An die Fahrer können personalisierte Informationen übermittelt werden, die sich an der aktuellen Position des Lkw und dessen Fahrweg orientieren; z.B. zum Auftragsstatus (kundenseitige Verspätung (Bandstillstand)), Verkehr (Stau, Umleitungen), Zufahrtsbefugnisse für Werksgelände und die Be- und Entladesteuerung (welche Rampe, welches Zeitfenster für Be- und Entladung) [6].

Anforderungen an den Truck 2030

Unter Beachtung von Industrie 4.0 und den drei ausgewählten Warengruppen, ergeben sich verschiedene Anforderungen an den Truck 2030. Um Echtzeitinformationen zu generieren, sollte er über GPS-Technologie verfügen und für den flächendeckenden RFID-Einsatz geeignet sein, z.B. durch verbaute Transponder. Zudem sollte er durch Anbindung an das Internet der Dinge eigenständig mit selbstfahrenden Transportsystemen kommunizieren können. Für Lebensmitteltransporte ist ein Kühlaggregat notwendig, das mit Energie versorgt werden muss.

3.2.2 Kraftstoffinfrastruktur

Bis ins Jahr 2030 ist eine Diversifizierung der im Nutzfahrzeugsektor eingesetzten Kraftstoffe zu erwarten. Treiber für den Einsatz anderer Kraftstoffe als des etablierten Dieselmotors nach DIN EN 590 (vgl. [7]) sind für den Fahrzeugbetreiber die Kosten und die Emissionsgesetzgebung (vgl. Kap. 3.3.2). Alternative Dieselmotoren wie HVO (engl. hydrotreated vegetable oil) und Biodiesel (FAME) können in geringfügig angepassten Motoren eingesetzt werden. Etherkraftstoffe (Dimethylether DME, Oxymethylenether OME) setzen stärker modifizierte Triebwerke voraus. DME ist bei Normbedingungen gasförmig, was die Nutzung der bestehenden Kraftstoffversorgungsinfrastruktur erschwert. Für den Betrieb mit Oxygenatkraftstoffen spricht die schadstoffarme Verbrennung der Stoffe, woraus ein deutlich verringerter Aufwand für Abgasnachbehandlung resultiert. Nachteilig ist die Notwendigkeit für einen nahezu doppelt so großen Kraftstofftank. Eine Kraftstoffinfrastruktur für Etherkraftstoffe ist in Europa noch nicht vorhanden. Für DME existiert seit 2015 eine Kraftstoff-ISO-Norm [8]. In Kalifornien betreibt Volvo eine Versuchsflotte mit DME-Lkw [9]. Der LVK ist an zwei Forschungsprojekten zur Erforschung von DME und OME beteiligt [10–15].

Methanol und Ethanol stellen eine Alternative zu Ottokraftstoffen dar. Sie zeichnen sich durch eine sehr hohe Klopfestigkeit aus [16]. Dies ermöglicht es, den Wirkungsgrad von Motoren durch geeignete Maßnahmen (Steigerung des Verdichtungsverhältnisses, Optimierung des Zündzeitpunktes) zu erhöhen. Je nach Herstellungspfad kann ein großer Teil des bei der Verbrennung freiwerdenden Kohlenstoffdioxids aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden (vgl. Tabelle 3). Die Verwendung von Alkoholkraftstoffen bringt einige Nachteile mit sich. Dazu zählen die Toxizität von Methanol, das korrosive Verhalten der Stoffe, sowie ein mangelhaftes Kaltstartverhalten bei niedrigen Temperaturen [17, 18]. Methanol dient als Ausgangsstoff für die Synthese von Oxymethylenethern [18].

Gasförmige Kraftstoffe wie Erdgas und Propan/Butan bieten sich als weitere Alternative zu herkömmlichem Ottokraftstoff an. Compressed Natural Gas (CNG) wird in Hochdruckbehältern bei 200 bar gespeichert. Bei Liquefied Natural Gas (LNG) wird Methan bei -162 °C verflüssigt [19]. LPG (Liquefied Petroleum Gas) besteht aus einem Gemisch von Propan und Butan, welches bei geringem Überdruck (8-10 bar) verflüssigt wird [20]. Die Kraftstoffe unterscheiden sich in der Energiedichte und dem Speicherkonzept voneinander (vgl. Tabelle 3). Für CNG und LPG besteht in Europa bereits ein ausgebautes Tankstellennetz. Die Initiative LNG Blue Corridors treibt einen europaweiten Ausbau von LNG-Tankstellen voran. In [21] ist der Ausbau eines solchen Netzes in Europa bis 2025 festgeschrieben. Am LVK wurde bereits eine Studie zu LNG durchgeführt, auf die zurückgegriffen werden kann [22].

Wasserstoff ist als Treibstoff für Verbrennungsmotoren bis zum Jahr 2030 nur in Nischenanwendungen zu erwarten. Die Leistungsdichte von Wasserstoffmotoren ist im Vergleich zu Diesel- und Gas-

motoren gering. Die Speicherung von Wasserstoff ist aufgrund seiner geringen volumetrischen Energiedichte von ca. 7 MJ/l bei 700 bar aufwendig. Die Verflüssigung von Wasserstoff erfordert Temperaturen von -253°C und somit hohen Energieeinsatz. Die Kostenschätzungen für Brennstoffzellenfahrzeuge unterscheiden sich drastisch (vgl. [23, 24]). Eine Studie der CE Delft [25] kam zu dem Schluss, dass Brennstoffzellenfahrzeuge auch unter günstigen Bedingungen bis 2030 keinen Kostenvorteil gegenüber Nutzfahrzeugen mit Verbrennungsmotor aufweisen.

Tabelle 3: Kraftstoffe für Nutzfahrzeuge

Kraftstoff	Heizwert [MJ/kg]	Energiedichte [MJ/l]	CO ₂ -Emission [g/MJ]	CO ₂ -Anteil aus erneuerbaren Quellen [%]	Tanktechnologie	Quelle
Diesel	43,1	35,9	73,2	1 – 6 %	Stahl-/Kunststoff	[26, 27]
HVO	44,0	34,3	70,8	26 – 65 %	Stahl-/Kunststoff	[26, 27]
FAME	37,2	33,1	76,2	19 – 83 %	Stahl-/Kunststoff	[26, 27]
LPG	46,0	25,3	65,7	0 %	Niederdrucktank	[26, 27]
CNG	45,1	35,6	56,2	0 %	Hochdrucktank	[26, 27]
LNG	48,5	20,3	58,5	0 %	Kryobehälter	[27, 28]
DME	28,4	19,0	67,3	92 – 95 %	Niederdrucktank	[26, 27]
Methanol	20,0	15,8	68,7	91 – 94 %	Stahl-/Kunststoff	[27, 28]
Ethanol	27,0	21,2	70,8	16 – 85 %	Stahl-/Kunststoff	[27, 28]
OME (Gemisch)	19,1	20,5	76,2	Ähnlich DME	Stahl-/Kunststoff	[18, 27]

In Tabelle 3 sind Stoffdaten der betrachteten Kraftstoffe aufgeführt. Neben der gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte, welche entscheidend für das notwendige Tankvolumen ist, ist der CO₂-Ausstoß pro MJ freigesetzter Brennstoffenergie aufgeführt. Dies stellt die lokale Emission des Fahrzeugs dar. Der aufgeführte Anteil an CO₂ aus erneuerbaren Quellen ist in [27] definiert. Je nach Herstellungspfad variiert dieser stark. Nicht berücksichtigt ist der Einfluss der Landnutzungsänderung.

3.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen in Europa

3.3.1 Abmessungen und Massen

Die für die europaweite Zulassung notwendigen Homologationsvorschriften sind in der Rahmenrichtlinie 2007/46/EG [29] zusammengefasst. Darüber hinaus werden die Effizienz und der Nutzwert von Nutzfahrzeugen im besonderen Maße von den gesetzlichen Rahmenbedingungen bezüglich der höchstzulässigen Abmessungen und Massen von Fahrzeugen beeinflusst. Diese sind in der EG-Richtlinie 96/53/EG [30] sowie in der Verordnung Nr.1230/2012 [31] der EU-Kommission geregelt und demensprechend in nationales Recht der Mitgliedsstaaten umgesetzt. Demnach dürfen Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen, einschließlich Ladung, eine Breite von 2,55 m bzw. 2,60 m bei klimatisierten Fahrzeugen und eine Höhe von 4,00 m nicht überschreiten. Die Gesamtlänge von Fahrzeugkombinationen ist in Abhängigkeit der Konfiguration und der verwendeten Komponenten wie folgt geregelt:

Ein Sattelzug, bestehend aus einer Zugmaschine mit Sattelkupplung sowie einem Sattelanhänger, darf eine Gesamtlänge von maximal 16,50 m nicht überschreiten. Abbildung 3 zeigt die höchstzulässigen Abmessungen des Sattelzugs, die Werte in Klammern sind abgeleitete Höchstmaße.

Ein Lastzug bestehend aus Lastkraftwagen und Anhänger darf eine Gesamtlänge von 18,75 m nicht überschreiten, wobei die Summe der Längen der Ladeflächen 15,65 m nicht überschreiten darf. Abbildung 4 zeigt die höchstzulässigen Abmessungen des Lastzugs, die Werte in Klammern sind abgeleitete Höchstmaße.

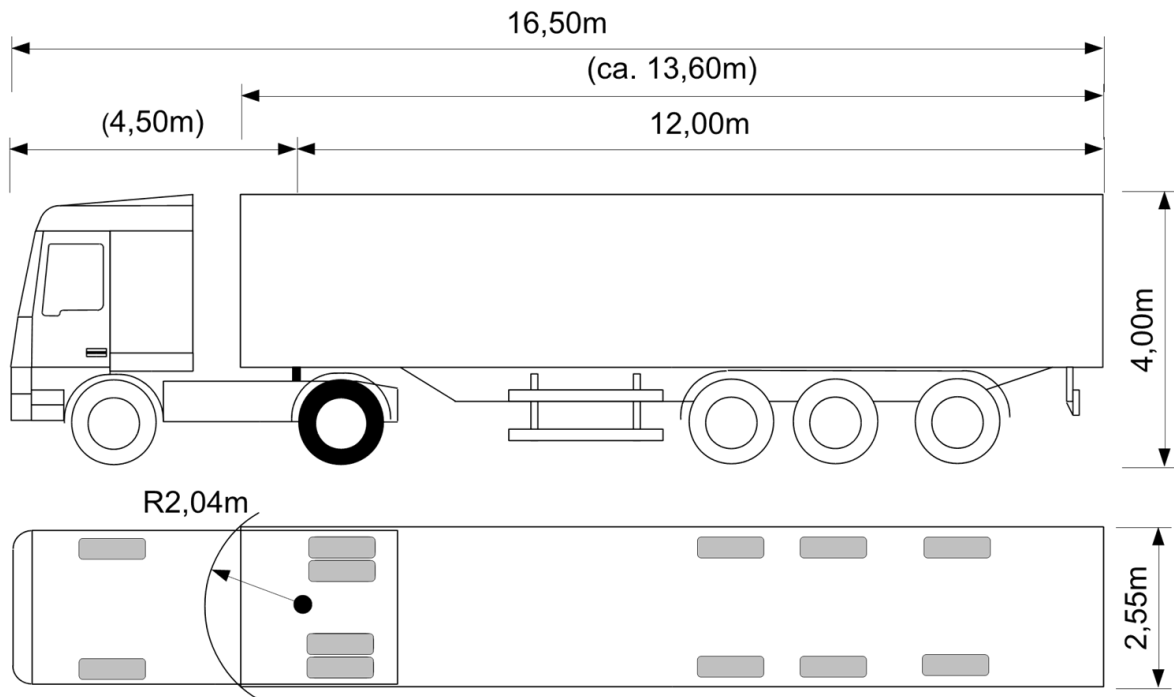


Abbildung 3: Höchstzulässige Abmessungen des Sattelzugs

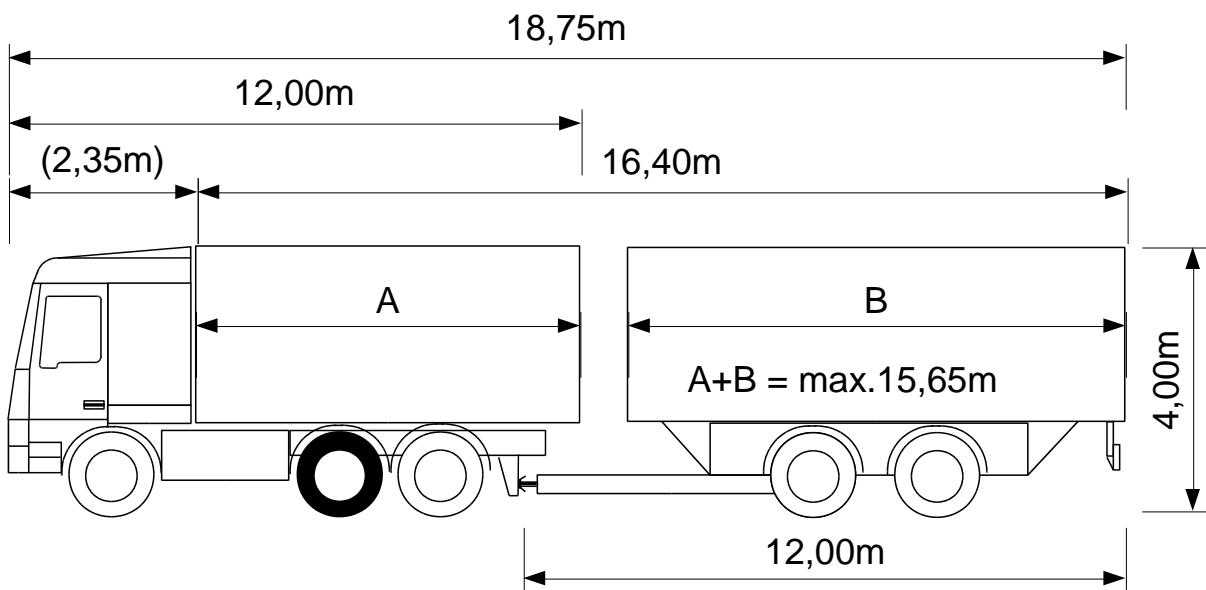


Abbildung 4: Höchstzulässige Abmessungen des Lastzugs

Für die zulässigen Gesamtmassen sind in der Richtlinie 96/53/EG Grenzwerte in Abhängigkeit der Achszahlen festgelegt. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über die wichtigsten Grenzwerte.

Tabelle 4: Höchstzulässige Gesamtmassen für Kraftfahrzeuge, Anhänger und deren Kombinationen

Fahrzeug	Kfz und Anhänger mit 2 Achsen	Anhänger mit 3 Achsen	Kfz mit 3 Achsen	Kfz mit 4 Achsen	Lastzüge/Sattelzüge mit 4 Achsen	Lastzüge/Sattelzüge mit 5 oder mehr Achsen	Lastzüge/Sattelzüge mit 5 oder mehr Achsen im KV
Zul. Gesamtmasse	18 t	24 t	26 t	32 t	36 t	40 t	44 t

Die Richtlinie 96/53/EG erlaubt den Mitgliedsstaaten zusätzlich, national längere und schwerere Fahrzeugkombinationen zuzulassen. In einigen Staaten sind diese bereits im Regelbetrieb unterwegs oder werden zurzeit in Feldversuchen getestet, wie z.B. der Feldversuch mit Lang-Lkw in Deutschland. In diesen Einsätzen sind jeweils Fahrzugkombinationen bis zu einer Länge von 25,25 m zugelassen, sofern diese aus regulär zugelassenen Einzelmodulen kombiniert werden (Europäisches Modulares System). Tabelle 5 zeigt eine Übersicht über laufende Feldversuche bzw. Regelbetrieb mit überlangen Nutzfahrzeugkombinationen in den einzelnen Staaten. Ein grenzüberschreitender Verkehr dieser Fahrzeuge ist zurzeit noch nicht vorgesehen, wird aber auf EU-Ebene diskutiert.

Tabelle 5: Versuche mit längeren und schwereren Fahrzeugkombinationen in Europa

Land	Gesamtlänge	Zulässige Gesamtmasse	Einsatz
Deutschland	25,25 m	40/44 t	Länderebene, Feldversuch
Dänemark	25,25 m	60 t	Landesweit, Feldversuch
Niederlande	25,25 m	60 t	Landesweit, Feldversuch
Schweden	25,25 m	60 t (ab 06/2016: 76 t)	Landesweit, Regelbetrieb (Versuche mit 32 m und 90 t)
Finnland	25,25 m	76 t	Landesweit, Regelbetrieb
Spanien	25,25 m	60 t	Sondergenehmigung, Feldversuch

Für die zukünftige Verminderung der Treibhausgasemissionen und zur Verbesserung der Verkehrssicherheit wurden die Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 sowie die Richtlinie (EU) 2015/719 [32] erlassen. In der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 wurde erstmals festgelegt, dass aerodynamische Luftleitvorrichtungen am Fahrzeugheck bis zu einer zusätzlichen Länge von 500 mm zulässig sind, sofern diese bei Nichtgebrauch einklappbar sind und die Verwendung im intermodalen Verkehr nicht behindern. In der Richtlinie (EU) 2015/719 ist zusätzlich erstmals geregelt, dass Fahrzeuge die höchstzulässigen Gesamtlängen überschreiten dürfen, sofern das Führerhaus eine verbesserte Aerodynamik und Sicherheit bietet und sich dadurch die Ladelänge nicht erhöht. Explizit werden hier in der Richtlinie als Ziele und Zulassungsbedingungen eine verbesserte Sichtbarkeit schutzbedürftiger Verkehrsteilnehmer und eine Reduktion der toten Winkel genannt. Außerdem sollen durch die verlängerte Fahrerkabine Kollisionsschäden vermindert und Sicherheit und Komfort für den Fahrer erhöht werden. Die genauere Spezifizierung, vor allem mit Zahlenwerten, wurde in der Richtlinie in das Jahr 2017 verschoben und die endgültige Umsetzung auf einen Zeitraum von 3 Jahren nach Spezifizierung.

Als weiterer Baustein zur Verminderung der Treibhausgasemissionen ist in der Richtlinie (EU) 2015/719 eine Unterstützung der weiteren Verbreitung alternativer Antriebe vorgesehen. Zu diesem Zweck wird eine Überschreitung der zulässigen Gesamtmasse für Fahrzeuge mit alternativen und/oder Hybridantrieben um bis zu eine Tonne erlaubt. Die Richtlinie nennt dazu als mögliche alternative Antriebe: Strom in allen Arten von Elektrofahrzeugen, Wasserstoff, Erdgas, einschließlich Biomethan, gasförmig (komprimiertes Erdgas — CNG) und flüssig (Flüssigerdgas — LNG), Flüssiggas (LPG) sowie mechanische Energie aus bordeigenen Speichern/bordeigenen Quellen, einschließlich Abwärme. Unter Verwendung einer oder mehrerer dieser Techniken dürfen zweiachsige und dreiachsige Lastkraftwagen die zulässige Gesamtmasse von 18 t bzw. 26 t um den tatsächlichen Betrag der durch den alternativen Antrieb bedingten, zusätzlichen Massen um maximal eine Tonne überschreiten.

3.3.2 Emissionsgesetzgebung

Die von der europäischen Union für den Nutzfahrzeugsektor festgelegte Emissionsgesetzgebung der Zukunft stellt eine schwer abschätzbare Größe dar. Kurzfristig auftretende Ereignisse können die Strategie der Legislative nachhaltig verändern. Um ein plausibles Szenario zu entwickeln, wird davon

ausgegangen, dass sich die Grenzwerte in Anlehnung an die in den USA vorgeschlagenen Emissionsgrenzen entwickeln.

Stickstoffoxide sind seit dem Abgasskandal im PKW-Sektor stärker in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung gerückt. Auf Basis bestehender und vorgeschlagener Grenzwerte in den USA [33] ist davon auszugehen, dass die zulässigen Höchstwerte in der EU auf etwa die Hälfte der heutigen Grenze von 0,4 g/kWh absinken werden. Für Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonoxid und die Partikelmasse, sowie -anzahl ist von einer ähnlichen Tendenz auszugehen.

Eine Veränderung in der Erfassung der von Nutzfahrzeugen emittierten Schadstoffe zeichnet sich ab. Gemäß der EU-Richtlinie 64/2012 [34] werden sog. PEMS (Portable Emissionsmesssysteme) bei schweren Nutzfahrzeugen erprobt, um deren realen Schadstoffausstoß zu erfassen. Bis 2030 ist zu erwarten, dass die Fahrzeuge im gesamten Kennfeldbereich und realen Fahrbetrieb (sog. Real Driving Emissions, kurz RDE) die Emissionen durch PEMS nachweisbar erfüllen müssen. Dies stellt eine indirekte Verschärfung der Grenzwerte dar, da bisher lediglich ein repräsentativer Zyklus für die Zertifizierung der Emissionsstufe genutzt wird. Eine bereits geltende Verschärfung dieser Art ist mit dem Inkrafttreten des WHTC-Prüfzyklus als Ersatz für den ETC durchgeführt worden. Im aktuellen WHTC stoßen Nutzfahrzeugmotoren aufgrund des höheren Lastniveaus etwas mehr Stickoxide aus als im abgeschafften ETC-Zyklus. Versuche zeigen, dass der Übergang zu RDE für Nutzfahrzeuge zeitnah realisierbar ist, da sie bereits heute in Versuchen mit PEMS die gültigen Grenzwerte weitestgehend einhalten [35].

Eine Herausforderung bei der gleichzeitigen Absenkung der Emissionsgrenzen und Messung mit Hilfe von portabler Messtechnik ist die Genauigkeit, mit der die Abgaswerte erfasst werden können. Es wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2030 die Genauigkeit von PEMS der heutiger Labormesstechnik entspricht und die Emissionswerte zuverlässig erfasst werden können. Eine stärkere Absenkung der Grenzwerte unter 50 % der aktuell gültigen Höchstwerte wird aus Gründen der Messgenauigkeit dennoch ausgeschlossen.

Neben der Absenkung gültiger Grenzwerte für Nutzfahrzeugmotoren ist eine Erweiterung der reglementierten Abgasbestandteile zu erwarten. Für Lachgas (chem. N₂O), welches ein CO₂-Äquivalent von 298 besitzt [36], besteht in den USA bereits eine Emissionsgrenze von 0,134 g/kWh [37]. Es entsteht in SCR-Systemen durch Oxidation von Stickstoff [38]. Eine Adaption des Grenzwerts in Europa wird als wahrscheinlich betrachtet. Formaldehyd stellt einen weiteren nicht reglementierten Abgasbestandteil von Fahrzeugmotoren dar. Es wird als „wahrscheinlich krebserregend“ [39] eingestuft. Eine Reglementierung des Ausstoßes bis 2030 ist zu erwarten. In den USA ist die Emission auf 0,034 g/kWh begrenzt [40]. Die Einflüsse der Formaldehydentstehung wurden bereits am LVK erforscht (vgl. [41]) und ist weiterhin Gegenstand von Untersuchungen.

Emissionsgrenzwerte wirken sich auf die weitere Auslegung des Antriebsstrangs durch die erforderliche Nachbehandlung des Motorabgases aus. Kosten, Gewicht, Bauraum und Rückwirkungen auf den Motorbetrieb (bspw. Erhöhung der Ladungswechselarbeit durch erhöhten Abgasgegendruck) stellen wichtige Parameter dar. Je aufwendiger die Abgasnachbehandlung durch Komponenten wie Oxidationskatalysatoren, SCR-Systeme und Partikelfilter ist, umso höher sind die Kosten für den Motor. Die notwendige Abgasnachbehandlung hängt zusätzlich vom Kraftstoff ab, da die Schadstoffentstehung in hohem Maß von dessen chemischer Zusammensetzung beeinflusst wird.

Besonderes Augenmerk ist auf die gesetzliche Regulierung des CO₂-Ausstoßes zu richten. Die europäische Union verfolgt das Ziel, den CO₂-Ausstoß des Verkehrssektors bis 2050 um 60 % gegenüber dem Stand von 1990 zu verringern. Das Zwischenziel bis 2030 beläuft sich auf eine Reduktion um 20 % gegenüber dem Jahr 2008, was einem Anstieg von etwa 8 % zu den Werten von 1990 entspricht. Dies resultiert aus dem starken Anstieg des Verkehrsaufkommens und umfasst den gesamten Verkehrssektor der EU [42].

Bevor jedoch verbindliche Grenzwerte festgelegt werden können, ist zunächst die Kenntnis des tatsächlichen CO₂-Ausstoßes von schweren Nutzfahrzeugen notwendig. Dieser wird in der EU mit Hilfe des sog. VECTO (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool) Berechnungsprogramms simulativ ermittelt [43]. Auf Basis der Erkenntnisse kann eine Grenze für Gesamtfahrzeuge unter Berücksichtigung von allen CO₂-Vermeidungsmaßnahmen eingeführt werden. Für das Projekt werden auf Basis der Verbrauchsdaten der Speditionen Kühne+Nagel und Ellein die Gesamtfahrzeugmodelle in AVL Cruise kalibriert, um eine fundierte Grundlage für Optimierungen zu erhalten, [44].

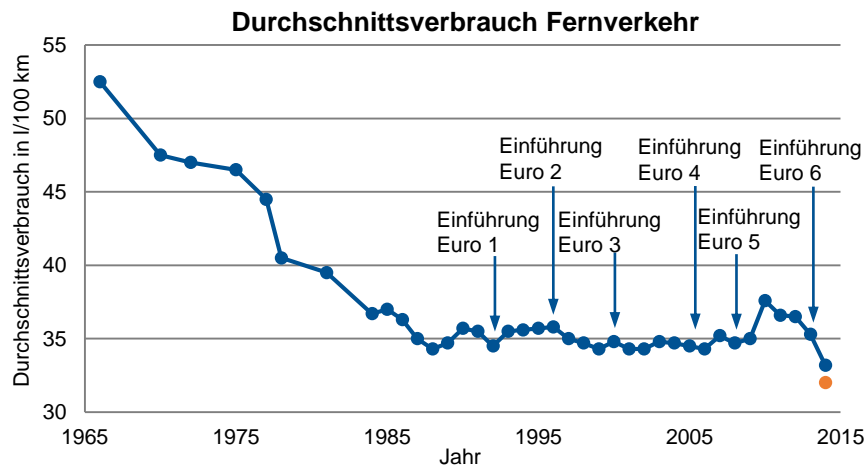


Abbildung 5: Durchschnittsverbrauch im Fernverkehr. Quelle: [45]

Obige Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des von der Zeitschrift „Lastauto Omnibus“ ermittelten Durchschnittsverbrauchs von Sattelzügen seit 1966. Der starke Abfall bis in die Mitte der 1980er Jahre ist auf technologische Neuerungen wie Abgasturboaufladung, Ladeluftkühlung und Hochdruckeinspritzung zurückzuführen. Seit Einführung der Euro-Abgasnorm ist der Verbrauch nahezu konstant geblieben. Der Anstieg der Verbrauchswerte im Jahr 2010 resultiert aus einer Routenänderung der Teststrecke. Der orangefarbene eingetragene Punkt repräsentiert die aktuelle Kalkulation von Speditionen für den Fernverkehr. Die Diskrepanz zu den Messwerten der Zeitschrift ergibt sich aus der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Gewichtsauslastung der Lkw. Im Test wiegen die Fahrzeuge 40 t. Aus den Verbrauchswerten ergeben sich für den Fernverkehr CO₂-Emissionen von umgerechnet 820 – 890 g/km. Im Verteilerverkehr mit dem Kleinfuhrpark beläuft sich der Ausstoß nach Angabe der Speditionen auf etwa 660 g/km.

Eine weitere Möglichkeit zur Begrenzung des CO₂-Ausstoßes ist die Einbindung des Straßenverkehrssektors in den Emissionshandel der europäischen Union. Diese Methode wird als sicherster Weg zur Reduzierung der europäischen Klimagasemissionen im Gesamten betrachtet [46]. Allerdings ist damit keine Verringerung der Nutzfahrzeugemissionen garantiert. Eine Teuerung von fossilen Kraftstoffen ist eine Folge der Ausweitung des Emissionshandels, die betrachtet wird, wobei der CO₂-Preis die Teuerung bestimmt. In [47] wird eine signifikante Preissteigerung der Emissionszertifikate prognostiziert, was sich in einer Teuerung fossiler Kraftstoffe widerspiegelt.

4 Fahrzeug

Die Ergebnisse der Szenarienrecherche bilden den Rahmen für die Entwicklung und Bewertung der Fahrzeugtechnologien. Aus der Analyse der Gütergruppen und Kundenstrukturen ergeben sich zwei relevante Anwendungsbereiche: Im Fernverkehr die Direktverkehre mit hohem Transportvolumen auf langen Strecken und im Verteilerverkehr regionale Rundlaufkonzepte.

Die relevanten Fahrzeugkonzepte werden, ausgehend vom Gespann über die Aerodynamik bis hin zu Effizienzmaßnahmen im Antrieb inklusive Hybridkonzepten, analysiert und bewertet. Die Bewertung erfolgt auf Basis von Kennzahlen zur Vollkostenrechnung und Energieeinsparung.

4.1 Gesamtfahrzeugkonzepte

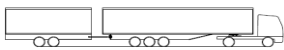
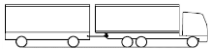


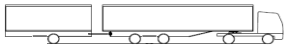

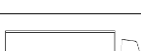
Die aktuell vorherrschenden Gesamtfahrzeugkonzepte werden grundsätzlich nach der Einsatzart unterschieden. In der Marktanalyse, vgl. 3.1.1, wurden für die relevanten Ladegutarten und Einsatzszenarien der Einsatz im Nah- und Verteilerverkehr sowie der Fernverkehr zur Verbindung von Knotenpunkten identifiziert.

Für die identifizierten, relevanten Ladegutarten werden im Nah- und Verteilerverkehr 2- oder 3-achsige Lkw mit Ladepritsche verwendet. Zum Einsatz kommen die Tonnageklassen 7,5 t, 12 t oder 18 t, teilweise auch Dreiachsfahrzeuge mit bis zu 26 t zulässiger Gesamtmasse.

Im Fernverkehrseinsatz sind heute in Europa Sattelzüge vorherrschend, (Abbildung 3). Diese bieten eine Ladekapazität von bis zu 34 Europaletten mit den Normmaßen von 1,2 m x 0,8 m. Lastzugkombinationen, bestehend aus Lkw und Anhänger, können unter regulären Bedingungen bis zu 38 Europaletten transportieren (Abbildung 4). Auch hier kommen je nach Ladegut und Einsatzzweck Koffer- oder Planenaufbau zum Einsatz.

Tabelle 6 zeigt einen Überblick der aktuellen Standardkonzepte für den Fernverkehrseinsatz, inklusive eines üblichen Lang-Lkw-Konzepts aus dem deutschen Feldversuch. Direkt im Vergleich zeigt Tabelle 6 vier Vorschläge möglicher, auf bestimmte Nutzlasten optimierter Lastzugkonzepte.

Tabelle 6: Vergleich der Eigenschaften aktueller Standardkonzepte und vorgeschlagener Optimierungen für den Fernverkehr

Name	Silhouette	Zul. Gesamtmasse	Nutzlast	Palettenstellplätze	Gesamtlänge
Lang-Lkw (Deutschland)		40,0t	22,5t	53	25,25 m
EU Lastzug		40,0 t	26,3t	38	18,75 m
EU Sattelzug (5 Achsen)		40,0 t	26,3t	34	16,50 m
EU Sattelzug (4 Achsen)		38,0 t	24,8t	34	16,50 m
Lang-Lkw (optimiert)		40,0t	24,0t	45	21,0 m
Euro-Trailer (14,90 m, 4 Achsen, optimiert)		38,0 t	24,5t	37	17,80 m
Ultraleicht-Sattelzug (12,80 m, 3 Achsen)		28,0t	17,0t	32	15,70 m

Zur ersten Abschätzung der Kosten im Betrieb der verschiedenen Fahrzeugkonzepte wurden überschlägige, parametrische Berechnungsmodelle zu den Gestehungskosten entwickelt, [48]. Die Kraftstoffverbräuche wurden auf repräsentativen Fahrzyklen simuliert. Mit diesen Kennzahlen erfolgt die Berechnung der Vollkosten nach der Methode von Wittenbrink [49]. Abbildung 6 zeigt die Total Cost

of Ownership (TCO) in Euro pro 100 Tonnenkilometer für die verschiedenen Grundkonzepte in Abhängigkeit der mittleren Ladegutmasse pro Palettenstellplatz bei voller Belegung.

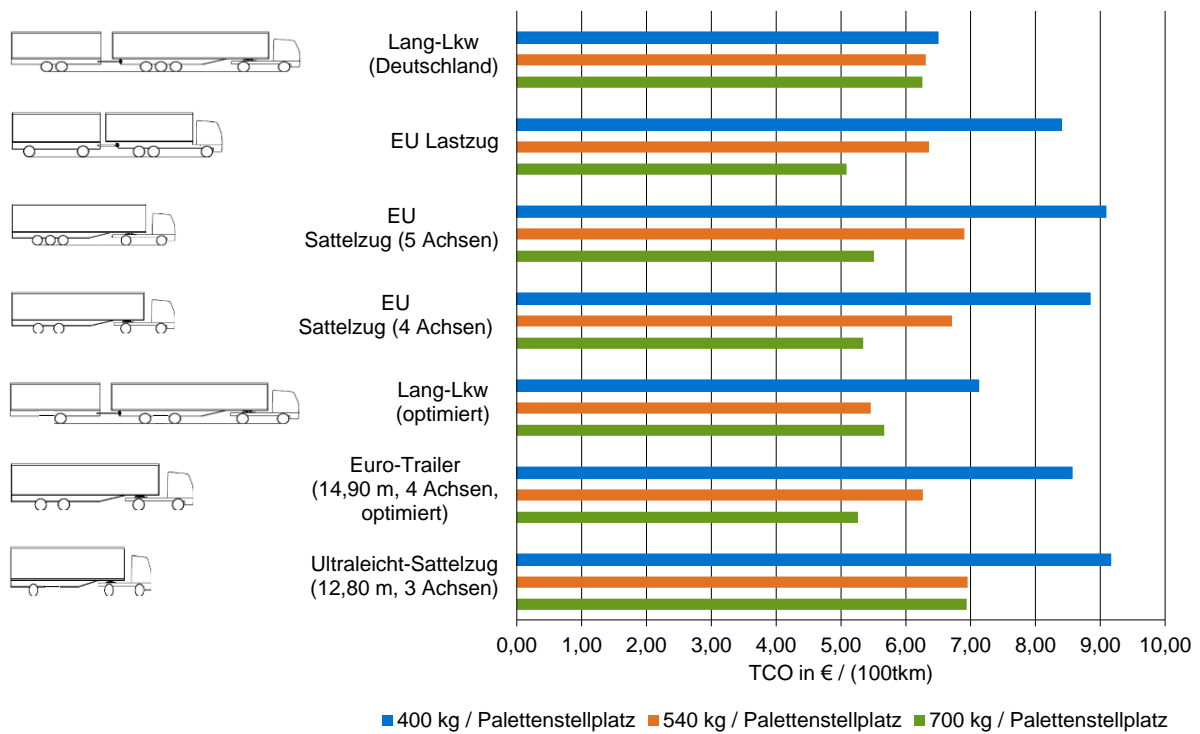


Abbildung 6: TCO-Abschätzungen in € / (100 tkm) für verschiedene Fahrzeugkonzepte und Ladegutdichten

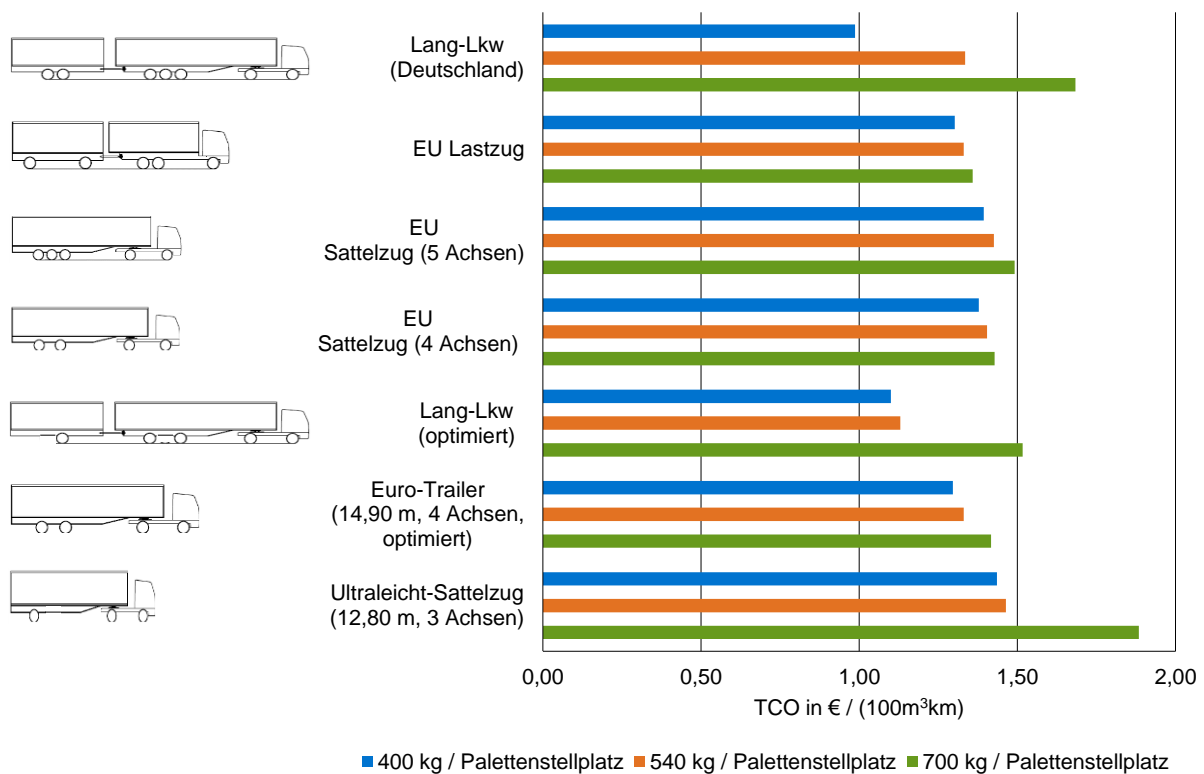


Abbildung 7: TCO-Abschätzungen in € / (100 m³km) für verschiedene Fahrzeugkonzepte und Ladegutdichten

Abbildung 7 zeigt die TCO in Euro pro 100 Kubikmeter-Kilometer. Es zeigt sich, dass die verbreiteten Sattel- und Lastzugkonzepte nur bei sehr hohen Ladungsdichten Vorteile haben. Wie die Marktanalysen gezeigt haben, werden in der Praxis jedoch in der Regel nur deutlich niedrigere Ladungsdichten erreicht.

Die Überschlagsrechnungen zeigen, dass für übliche, niedrigere Ladungsdichten mit speziell darauf ausgerichteten Lang-Lkw-Konzepten Einsparungen bei den Gesamtkosten von über 15 % erzielt werden können. Erste Anwendungen dieser Erkenntnisse lassen sich als Trends bei den Speditionen erkennen. So ist eine Zunahme 2-achsiger Sattelanhänger zu erkennen, die eine einfache Spezialisierung auf niedrigere Ladegutdichten darstellen und darüber hinaus durch die achsweise Berechnung der Mautgebühren in Deutschland Vorteile aufweisen [50].

4.2 Aerodynamik

Der c_w -Wert ist ein dimensionsloses Maß für den Luftwiderstand eines umströmten Körpers. Bei modernen Lkw beträgt dieser Koeffizient ungefähr 0,5. Es ist jedoch realistisch, dass der Wert sich in den nächsten Jahren auf 0,3 reduzieren lässt, was enorme Auswirkungen auf die Effizienz zukünftiger Lkw haben wird. Der Luftwiderstand berechnet sich wie folgt: $F_L = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2$. Daraus wird klar, dass der Luftwiderstand linear vom c_w -Wert abhängt. Wenn der Strömungswiderstandskoeffizient sich um 40 % von 0,5 auf 0,3 verringert, wird sich auch die Luftwiderstandskraft um 40 % verringern (Annahme: Dichte, Stirnfläche und Geschwindigkeit bleiben gleich). Wenn man nun noch annimmt, dass die zurück gelegte Strecke s gleich bleibt, kann man darauf schließen, dass sich der Energieverlust $\Delta E = W = F_L s$ ebenfalls um 40 % verringern wird. Das folgende Diagramm zeigt die prozentualen Energieverluste eines modernen 40 t-Sattelzugs auf ebener Strecke bei konstanten 85 km/h und die Einsparung des Leistungsverlustes durch einen geringeren c_w -Wert.

Energieverluste bei $c_w = 0,5$

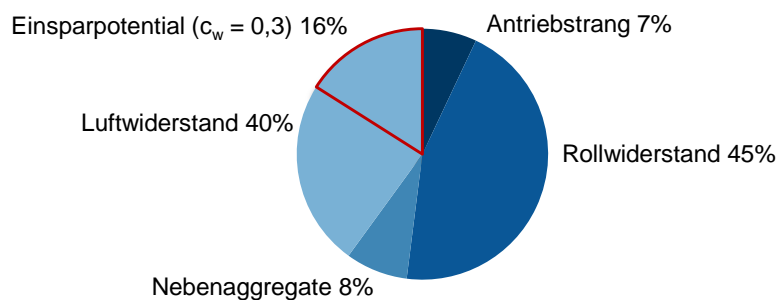


Abbildung 8: Einsparpotential bei einer Verringerung des c_w -Werts auf 0,3 [51]

Aus der Recherche der Designkonzepte für zukünftige Lkw (Anhang B: Aerodynamik) ergeben sich für den Truck 2030 mehrere aerodynamische Optimierungsmöglichkeiten. Das größte aerodynamische Energieeinsparpotential wird ermöglicht, wenn das Gesamtfahrzeug eine Stromlinienform erhält. Dabei wird versucht, dem Lkw eine möglichst runde Front und ein schmales Heck zu verleihen, damit es nicht zu Luftverwirbelungen kommt. Ein gutes Beispiel ist der „MAN Concept S“ (2). Durch diese Gesamtfahrzeugform ergeben sich allerdings Nachteile durch einen sich in der Höhe und Breite verändernden Laderaum über die gesamte Fahrzeuglänge sowie einem kleineren Laderaumzugang. Zudem wird der Fahrer mittig platziert.

Man kann sich der Stromlinienform auch durch Einzelmaßnahmen annähern. So zeigen die Konzepte „TOROS advanced truck concept“ (9) und „Walmart Futuristic Truck“ (1) eine stromlinienförmige Zugmaschine mit Standard Anhängerform. Die Konzepte „Mercedes Aero Trailer“ (8) und „Marks & Spencer Teardrop Trailer“ (24) nähern sich der Stromlinienform im Bereich des Anhängers, bzw. verändern die Anhängerform durch angehängte Flügel.

Weitere Detaillösungen findet man in den Bereichen Front, dem Übergang Zugmaschine-Anhänger, sowie dem Heck und dem Unterboden des Anhängers. Die Front sollte mit sehr glatten und geschlossenen Flächen ausgearbeitet sein, ein gutes Beispiel ist hierfür das Konzept „Mercedes-Benz Future Truck 2025“ (5). Die Studie „Renault CX/03“ (13) zeigt, dass nötige Kühleröffnungen bei Bedarf geöffnet werden können. Der Übergang Zugmaschine-Anhänger kann wie in der Studie „Renault CX/03“ (13) durch ausfahrbare Flügel geschlossen werden. Eine Abrundung der vorderen Anhängerkante wie bei dem „Walmart Futuristic Truck“ (1) führt auch zu weniger Luftverwirbelungen. Der am Heck des Anhängers entstehende Unterdruck kann durch Flügel, die das Heck verlängern, reduziert werden. Den gleichen Effekt hat ein Diffusor im Heckbereich des Unterbodens. Dies wird in den Konzepten „Mercedes Aero Trailer“ (8) und „Aerodynamics Truck & Trailer“ (23) gezeigt. Das Konzept „Freightliner Inspiration“ (31), das durch autonomes Fahren Platooning ermöglicht, könnten diese Flügel sogar den Luftstrom um das nachfolgende Fahrzeug leiten. Weitere Möglichkeiten der Optimierung liegen in der Verkleidung der Räder, und eines durchgängig glatten Unterbodens von Zugmaschine und Anhänger.

Im nächsten Schritt werden diese potentiellen Verbesserungsmaßnahmen mit den Anforderungen der anderen Projektpartner kombiniert, um ein funktionales Gesamtfahrzeugkonzept zu erarbeiten. Dabei könnten neue Rahmenbedingungen wie z.B. eine längere Front zur Verbesserung der Crashsicherheit einen positiven Einfluss auf die Aerodynamik haben. Einen großen Einfluss auf die Wahl der Maßnahmen hat die Usability. Hier ist die Akzeptanz des Fahrers, z.B. der Ein- und Ausstieg bei zentraler Fahrposition, ein sehr wichtiger Faktor. Zudem muss jede Maßnahme auch auf mögliche Funktionsprobleme, z.B. Eisbildung, überprüft werden.

4.3 Antrieb

4.3.1 Effizienzmaßnahmen am Verbrennungsmotor

In der Literatur werden zahlreiche technische Neuerungen diskutiert, die die Effizienz von Nutzfahrzeugen steigern sollen. Die prognostizierten Einsparungen unterscheiden sich stark voneinander. Einzelmaßnahmen können nur in wenigen Fällen allein betrachtet werden, weil das System Motor als Ganzes untersucht werden muss, [52]. Änderungen an einer funktionellen Gruppe ziehen meist Anpassungen im gesamten Triebwerk nach sich, um ein Optimum zu erreichen. Des Weiteren müssen bei der Antriebsentwicklung meistens Kompromisse gefunden werden, weil Maßnahmen neben positiven auch negative Rückwirkungen auf den Motor haben können.

Zu motorischen Maßnahmen zählen Downsizing und Downspeeding. Mit Downsizing wird die Verringerung des Hubraums und der Zylinderzahl eines Motors bezeichnet. Damit der Motor die gleiche Leistung erzeugt wie ein größeres Aggregat, muss der effektive Mitteldruck erhöht werden. Dies gelingt durch verstärkte Aufladung. Beim Downspeeding [53] wird die Drehzahl eines Motors im Betrieb durch eine veränderte Antriebsübersetzung abgesenkt. Mit der Maßnahme werden die Reibungsverluste gesenkt. Um das Leistungsniveau zu halten, wird das Drehmoment des Triebwerks bei geringen Drehzahlen erhöht. Die mechanische Festigkeit der Motoren muss durch die mit der Mitteldrucksteigerung verbundenen erhöhten Brennraumdrücke ansteigen. Um einen Effizienzvorteil durch die Maßnahme zu erhalten, ist ein angepasstes Auflade- und Einspritzsystem notwendig.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung der innermotorischen Verluste stellt die Reibungsoptimierung dar. Dabei handelt es sich um ein breites Forschungsfeld. Eine Absenkung der Reibleistung verbessert direkt den Wirkungsgrad des Motors. Am LVK wird intensiv an der Verringerung der Kolbengruppenreibung gearbeitet [54–58]. Weitere Ansatzpunkte betreffen die Reduzierung von Lagerreibung und Planschverlusten. Die Verbesserung von Motorölen trägt ebenfalls zur Minimierung der Reibleistung bei. Die Simulation von Reibverlusten ist hochkompliziert und übersteigt den Detaillierungsgrad, der bei der Gesamtfahrzeugauslegung für Motorkomponenten realisierbar ist. Daher wird, basierend auf Veröffentlichungen, eine Minderung der Reibungsverluste bis 2030 festgelegt, die sich durch diverse Maßnahmen realisieren lassen. Diese sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Eine Herausforderung für die Motorenentwicklung ist die Diversifizierung des Kraftstoffangebots bis zum Jahr 2030. Für jeden Energieträger muss ein möglichst effizientes Brennverfahren appliziert werden, um die vorhandene Energie zu nutzen und Verbrauchsvorgaben zu erfüllen. Für konventionellen Dieseldieselkraftstoff ist die Brennverfahrensentwicklung sehr weit fortgeschritten, wird allerdings weiterhin fortgeführt, um Wirkungsgrad und Emissionen zu verbessern. Für alternative Kraftstoffe wie DME und OME existieren bereits auf Dieseldieselverfahren basierende Ansätze, die für einen großflächigen Serieneinsatz noch optimiert werden müssen [59]. Ottobrennverfahren haben gegenüber Dieseldieselmotoren einen Wirkungsgradnachteil, welcher bei Nutzfahrzeugen mit Gasantrieb nachteilig ist [60]. Gasmotoren mit dieseldieselmotorischer Prozessführung, die im Wirkungsgrad nahe an Dieseldieselmotoren herankommen, befinden sich in Entwicklung [61]. Im weiteren Projektverlauf werden entsprechende Motormodelle aufgebaut, mit deren Hilfe die Effizienz der Aggregate im Gesamtfahrzeug beurteilt und mit den von den untersuchten Studien (vgl. [62–64]) abgeschätzten Einsparpotentialen verglichen wird.

Auf Basis der Motormodelle können verschiedene Maßnahmen zur Entdrosselung des Ladungswechsels, wie Atkinson- und Millersteuerzeiten für den Nutzfahrzeugmotor simuliert werden. Der Einfluss auf den Motorbetrieb von Zusatzeinrichtungen wie Turbocompound (mechanisch und elektrisch), Organic Rankine Cycle, Hybridturbolader und thermoelektrischem Generator kann über verschiedene Fahrzyklen abgebildet werden. Es ist davon auszugehen, dass die Systeme bis 2030 flächendeckend verfügbar sind, da sie bereits jetzt in der Entwicklung sind oder bereits in Serienanwendungen vorliegen. Anhand der Einsparungen und der branchenüblichen Abschreibungsdauer können Grenzkosten für die Komponenten definiert werden.

Tabelle 7: Einsparpotential ausgesuchter motorischer Maßnahmen

Maßnahme	Einsparpotential [%]	Quelle
Mechanischer Turbocompound	1,8 – 5	[65]
Elektrischer Turbocompound	2,0 – 10	[62]
Rankine Cycle	1,5 – 10	[62, 65–67]
Ladungswechsel und Abgasrückführung	1,1	[65]
Brennverfahren	1,1	[65]
Reibungs- und Schmierungsoptimierung	1,4	[65]
Downsizing	0,3	[65]
Abgasnachbehandlung	0,6	[65]
Wasserpumpe	0,7 – 4	[62]
Ölpumpe	1,0 – 3	[62]
Luftpresser	1,0 – 4	[62]
Nebenaggregate	0,0 – 8	[62]

Die in Tabelle 7 dargestellten Einsparpotentiale beziehen sich teilweise auf dem US SET (Supplementary Emissions Test), der dem europäischen ESC ähnelt, während Abschätzungen aus [62] auf Annahmen zum realen Betriebsverhalten von schweren Nutzfahrzeugen basieren. Anhand der in den Studien angegebenen Spannweiten des Einsparpotentials ist zu erkennen, wie groß die Unsicherheit bei der Beurteilung der Maßnahmen ist. Im weiteren Projektverlauf werden die Einsparungen in einem realitätsnahen Fahrzyklus für den Fern- oder Verteilerverkehr anhand von abgeleiteten Fahrprofilen aus der Mobilitätsdatenanalyse des FTM ermittelt.

Die Kostenschätzungen für die jeweiligen Maßnahmen (vgl. [62–65]) unterscheiden sich teils sehr stark voneinander. Manche Autoren betrachten Einzelmaßnahmen als evolutionäre Entwicklungen ohne Zusatzkosten, während in anderen Werken Gesamtkosten für Pakete aus Einzelmaßnahmen angegeben werden.

4.3.2 Dauerbremsanlage

Zur Entlastung der Betriebsbremsanlage bei Bergabfahrten ist bei schweren Nutzfahrzeugen eine Dauerbremsanlage verbaut. Diese arbeitet verschleißfrei und ist in der Lage, ihre Leistung über einen langen Zeitraum hinweg zur Verfügung zu stellen. Gängige Systeme umfassen Motorbremssysteme wie eine Dekompressionsbremse und eine Stauklappe im Abgastrakt. Darüber hinaus sind hydraulische Retarder und Wirbelstrombremsen verfügbar, um weiteres Bremsmoment bereitzustellen. Allen Systemen ist der vollständige Verlust der Bremsenergie gemein. Die Systeme geben diese in Form von Wärme an die Umgebungsluft und das Motorkühlwasser ab. Ziel für zukünftige Entwicklungen ist es, einen möglichst großen Anteil der Dauerbremsenergie zwischen zu speichern, um sie später im Gesamtfahrzeug nutzen zu können.

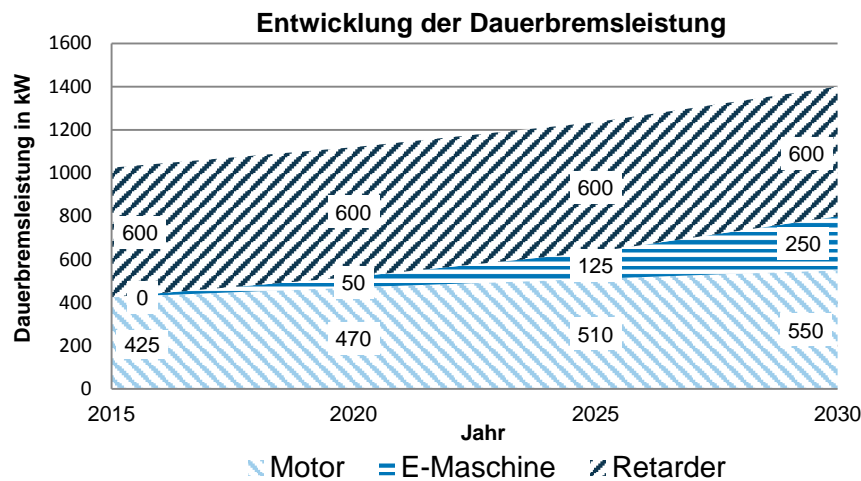


Abbildung 9: Leistung von verfügbaren Dauerbremssystemen

In Abbildung 9 ist die von Knorr-Bremse abgeschätzte Entwicklung der Dauerbremsleistung an schweren Nutzfahrzeugen dargestellt. Die Erhöhung der maximalen Motorbremsleistung ergibt sich aus Weiterentwicklungen am Motorblock, wie bspw. Festigkeitssteigerungen. Die Bremsleistung der Retarder wird als konstant angenommen. Die Systeme sind in verschiedenen Ausführungen und Leistungsstufen erhältlich. Eine Neuerung stellt die Einführung von elektromotorischen Dauerbremssystemen dar. Sie bieten die Möglichkeit der Rekuperation bei Bergabfahrt. Eine Elektromaschine ist nicht in der Lage, die notwendige Bremsleistung alleine darzustellen. Gründe hierfür sind die sehr hohe Dauerbremsleistung, die Begrenzung der Motorleistung, sowie die Aufnahmefähigkeit des Bordnetzes (für die elektrische Leistung). Retardersysteme werden im betrachteten Zeitraum weiterhin für Nutzfahrzeuge erhältlich sein. Für Anwendungen mit hohen Fahrzeuggewichten und großen Höhenunterschieden auf den Routen sind sie nach wie vor notwendig.

4.3.3 Hybridisierung von Nutzfahrzeugantrieben

Für leichte Nutzfahrzeuge (< 3,5 t) wurde bereits eine CO₂-Obergrenze von 147 g CO₂ pro km für das Jahr 2020 festgelegt, [68]. Die Verteiler- und Fernverkehrsfahrzeuge werden mit der Einführung von Vecto (Vehicle Energy Consumption Tool) auf strengere CO₂-Grenzen vorbereitet [69]. Die vorgegebenen CO₂-Einsparziele der EU bis 2050 sind mit dem Einsatz konventioneller Antriebe kaum zu

schaffen [42]. Hinsichtlich der Batteriepreisdegression, Rekuperations- und CO₂-Einsparungspotential wird eine mögliche Hybridisierung in den Konzeptauslegungen als Alternativlösung berücksichtigt. Für eine Hybridisierung im Straßengüterverkehr ist der Einsatz von elektrischen, hydraulischen und kinetischen Wirkprinzipien technisch möglich.

Energiespeicherkonzepte

Aktuelle Energiespeicherkonzepte für Fern- und Verteilerverkehr werden im Folgenden zwischen der erfolgten Umsetzung als Konzept oder Serie unterschieden. In Serie wurde der elektrische Hybrid im Verteilerverkehr und der kinetische Hybrid als Pkw-Anwendung bereits eingesetzt, [70], [71]. In der Konzeptphase befindet sich der von Bosch Rexroth entwickelte hydraulische Hybrid, [72]. Im Fernverkehr (40 t) wurde bisher nur der elektrische Hybrid als Konzept von MAN und ZF vorgestellt [73].

Auswahl eines Energiespeichersystems

Die Auswahl eines geeigneten Energiespeicherkonzeptes wird auf der Basis technischer Leistungsdaten Stand heute getroffen, siehe Tabelle 8.

Tabelle 8: Technische Bewertung der Energiespeicherkonzepte.

Funktionsfähigkeit	Physikalisches Wirkprinzip		
	Kinetisch	Hydraulisch	Elektrisch
Selbstentladung in %	ca. 100 pro 30 min	2 - 10 pro Tag	≈ 0,1% pro Tag
Zyklusfestigkeit	> 1 Mio.	≈ 1Mio.	ca. 1.000 bis 5.000
η (Rad bis Energiespeicher) in %	70 – 90	80 – 90	70 – 85
Energiedichte in Wh/kg	bis zu ca. 90	bis zu ca. 6	bis zu ca. 240 ca. 480 (BEV)
Leistungsdichte in W/kg	bis zu ca. 2000	bis zu ca. 900000	ca. 3000 (HEV)
Quellen	[62], [63], [64], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82]		

Kinetische Antriebe verfügen über hohe Energie- und Leistungsdichten, sind jedoch aufgrund der hohen Selbstentladung im Leerlauf für hohe Laufleistung ungeeignet [62]. Hydraulische Konzepte sind wegen ihrer geringen Energiedichte ebenso ungeeignet. Der elektrische Energiespeicher besitzt trotz seiner geringen Zyklusfestigkeit das größte Potential für eine kostenneutrale Umsetzung [64].

Betrachtung kritischer Parameter des elektrischen Energiespeichers für das Jahr 2030

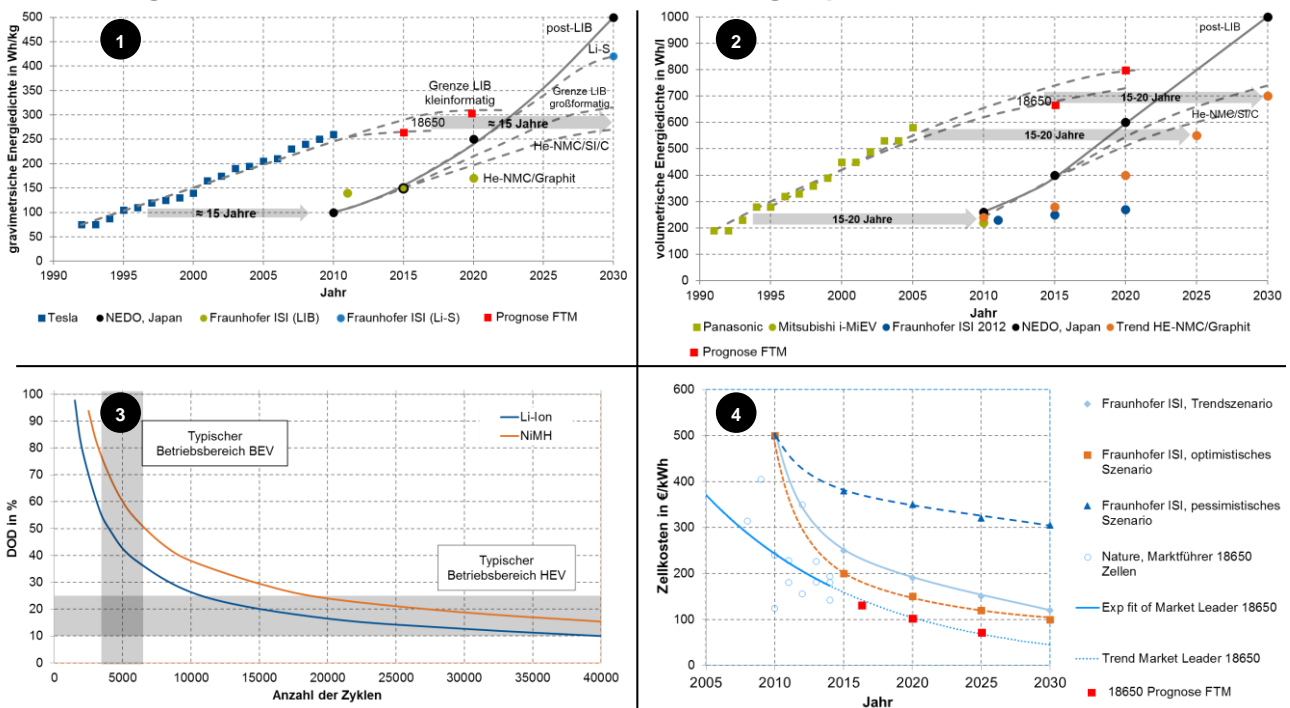


Abbildung 10: Kritische Parameter des elektrischen Energiespeichers [83], [84], [85]

Abbildung 10 zeigt eine Übersicht der kritischen Parameter für den elektrischen Energiespeicher. Die gravimetrische Energiedichte (Abbildung 10.1) wird nach [86] im Zellformat 18650 bis 2030 auf mindestens 300 Wh/kg ansteigen. Mit einer angepassten Zellgröße und veränderter Zellchemie, z.B. Nickel-Mangan-Cobalt (NMC) können sogar noch höhere Energiedichten erreicht werden. Die volumetrische Energiedichte (Abbildung 10.2) wird bis 2030 ein Niveau von mindestens 800 Wh/l erreichen. Auch hier kann durch die Post-Li-Ionen-Technologie ein noch größerer Sprung erfolgen. Abbildung 10.3 zeigt die Abhängigkeit der Zyklenfestigkeit von der Entladetiefe Depth of Discharge (DoD) des Batteriepacks. Hier ist es für spätere Berechnungen sinnvoll, die Entladetiefe des Batteriepacks auf die Haltbarkeit auszurichten, um ein vorzeitigen Austausch des Batteriepacks zu vermeiden. Die Kostendegression von Li-Ionen Zellen ist Abbildung 10.4 zu entnehmen. Das Fraunhofer ISI (Institut für System- und Innovationsforschung) prognostiziert in [83],[87], ein Szenario mit einer Kostendegression bis zu ca. 100 €/kWh auf Zellebene im Jahr 2030. Die Trendanalyse aus [85] zeigt eine optimistischere Prognose hinsichtlich der Kostendegression bis hin zu ca. 80 €/ kWh bereits im Jahr 2025.

Hybridtopologie

Die Vielfalt der Auslegungsmöglichkeiten erhöht sich mit Hybridkomponenten an Bord des Antriebsstrangs stark. Die Kombination aus Verbrennungskraftmaschine (VKM) und Elektromotor (EM) lässt die Auswahl einer optimalen Antriebsstrangtopologie entsprechend des Transportkonzeptes zu. Abbildung 11 zeigt drei vielversprechende Topologien (Seriell, Leistungsverzweigt, Parallel-P2) nach [74] nach ihrer Funktionalität. Die Hauptfunktionen sind Boosten (EM+VKM), Lastpunktanhebung (LPA), rein elektrisches Fahren und Rekuperieren. Die Auswahl der optimalen Hybridtopologie wird im weiteren Projektverlauf mit Hilfe der abgeleiteten Fahrzyklen aus der Mobilitätsdatenanalyse über Verbrauchssimulation und Parametervariation bestimmt.

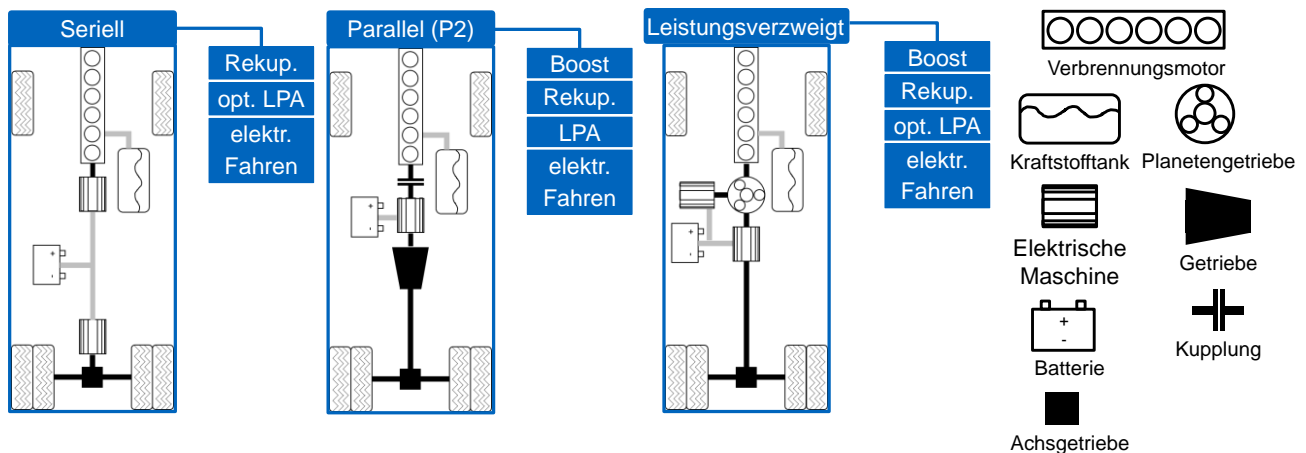


Abbildung 11: Überblick Hybridtopologien und Komponenten

Auslegung der Komponenten

Die Dimensionierung der E-Maschine und des Batteriespeichers legt den Umfang der rekuperierbaren Energie fest. Die wesentlichen Stellhebel bei der Auslegung sind Gewicht, Preis, Bauraum, Energie- und Leistungsdichte der Komponenten sowie die Belastbarkeit des Hochvoltnetzes (400 V – 800 V). Durch eine optimale Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten können Effekte wie Downspeeding und Downsizing verstärkt werden. Nach [79] und [77] ergeben sich Kraftstoffersparnisse von 3 % bis 15 % durch die Hybridisierung.

Betriebsstrategie

Die Auswahl einer auf die Topologie abgestimmten Betriebsstrategie hat großen Einfluss auf die erzielbaren Einspareffekte, [74], [77], [81]. Abbildung 12 gibt eine Übersicht der Komplexität in einer

Betriebsstrategie über die Steuerung der Komponenten zur Erfüllung der jeweiligen Funktion im Fahrzeug. Das Kraftstoffeinsparungspotential durch eine optimale Betriebsstrategie wird im weiteren Projektverlauf quantifiziert.

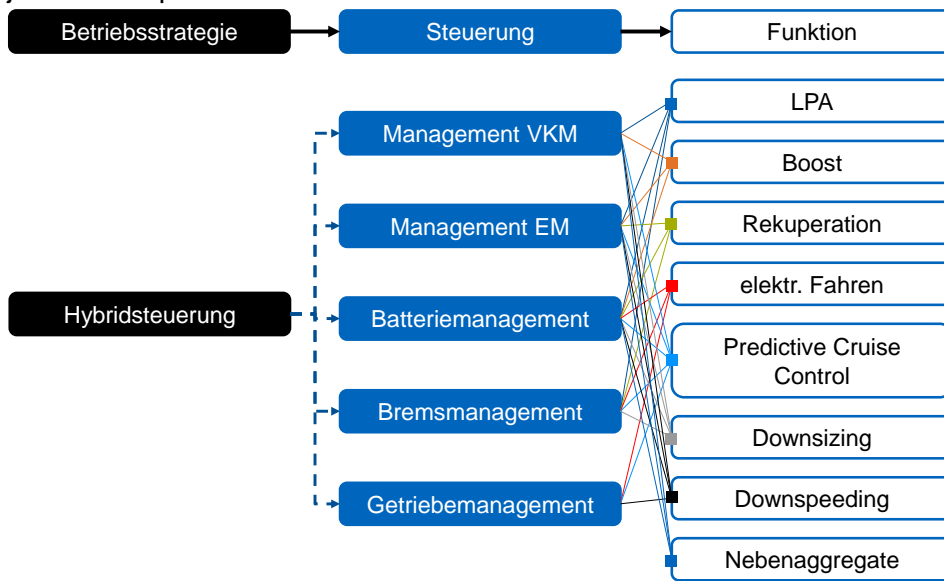


Abbildung 12: Komplexität der vernetzten Funktionen innerhalb der Betriebsstrategie

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Zukunftsszenario für 2030 zeigt eine um bis zu 44 % erhöhte Transportleistung gegenüber 2010 in allen betrachteten Gütergruppen. Dies erschwert besonders die Erfüllung der Klimaschutzvorgaben der Europäischen Union. Die zwei häufigsten Anwendungsfälle Fern- und Verteilerverkehr erfordern zwei grundsätzlich unterschiedliche Fahrzeugkonzepte für das Jahr 2030. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen ermöglichen aerodynamische Neuentwicklungen, veränderte Gesamtfahrzeugabmessungen, sowie alternative Antriebsformen. Synthetische Kraftstoffe und neue kombinierte Brennverfahren mit Erdgas- und Dieselmotoren erweitern die Möglichkeiten einer optimalen Antriebslösung. Neue elektrische Hybridkonzepte zur Rückgewinnung der Bremsenergie werden durch sinkende Zellkosten und verbesserte Energiedichte begünstigt. Die Kraftstoffinfrastruktur 2030 ermöglicht einen flächendeckenden Einsatz von flüssigerdgasbetriebenen Fahrzeugen in Europa sowie die Bereitstellung von synthetischen Kraftstoffen im herkömmlichen Tankstellennetz.

Die Be- und Entladeprozesse, unterstützt durch vernetzte Systeme, erlauben dem Fahrzeugbetreiber geringere Standzeiten und optimierte Routenplanung. Daraus ergeben sich neue Anforderungen an die Konnektivität der Fahrzeuge und die Gestaltung und Materialien der Aufbauten.

In Summe ergeben sich disruptive Anforderungen, die ein revolutionäres Fahrzeugkonzept bedingen, um optimale Kosteneinsparungen erzielen zu können.

Das Gesamtziel von 20 % bis 30 % Verringerung der Gesamtkosten kann durch Verbesserungen der Teilziele Energieeffizienz, Transporteffizienz und Kosteneffizienz erreicht werden.

Der aktuelle Projektstand zeigt zwei relevante Einsatzgebiete. Dafür werden zwei mögliche Fahrzeugkonzepte für das gezeigte Szenario diskutiert. Die untenstehenden Abbildungen zeigen Gesamtfahrzeugkonzeptskizzen für die beiden Anwendungsgebiete.

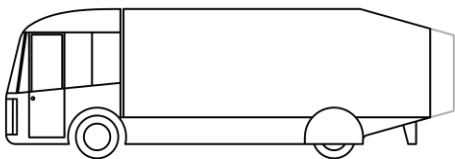


Abbildung 13: Konzeptskizze Verteilerverkehr 2030

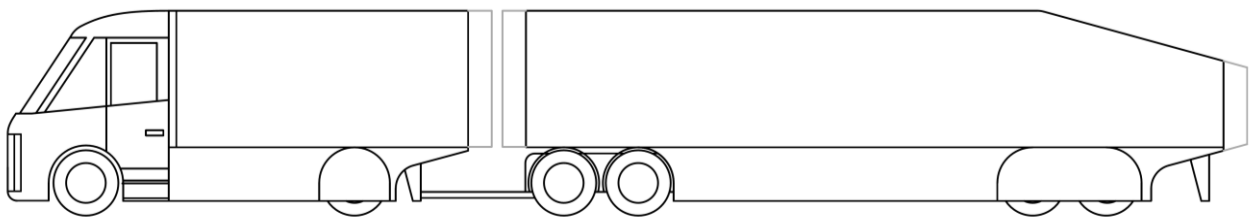


Abbildung 14: Konzeptskizze Fernverkehr 2030

Erste Ergebnisse der Diskussion zeigen auf Grund der höheren Laufleistungen das größere Einsparpotential im Fernverkehr. In der nächsten Projektphase wird aufbauend auf den Ergebnissen der Szenarioanalyse und den Teillösungen der Recherche das Einsparpotential auf Gesamtfahrzeugebene quantifiziert. Zu diesem Zweck werden die technischen Einzellösungen simulativ verknüpft. Dadurch können Synergieeffekte aus der Zusammenarbeit der verschiedenen Fachbereiche optimal genutzt werden. Diese ganzheitliche, monetäre Betrachtung des Fahrzeugkonzepts bietet einen Neuigkeitswert, der den beteiligten Herstellern und Spediteuren als Wegweiser für zukünftige Investitions- und Entwicklungsstrategien dient.

Geplantes Vorgehen

AP	Projektphasen	Verantwortlich	Beteiligt	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3						
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4			
	Berichte																	
	Projekttreffen																	
1	Analyse	M1: Szenarien 2030																
1,1	Kunde/ Markt/ Gesetzgeber	FTM	ID, OTH, K+N, Eiflein															
1,2	Be- u. Entladekonzept in der Industrie 4.0	OTH	ID, K+N, Kögel															
1,3	Transportaufgaben u. Trends	OTH	ID, FTM, K+N, Eiflein															
1,4	Fahrzeugkonzepte u. Technologien	FTM	ID, AVL, K+N, Eiflein, KB															
1,5	Energiebilanzen u. Wandeilungseffizienzen	LVK	FT, AVL, KB															
1,6	Gewichtsanalyse Fahrzeug- u. Anhänger	FTM	Kögel, KB															
1,7	Kostenstrukturen der Fahrzeug u. Anhängersysteme	FTM	Kögel, KB															
2	Auslegung	M2: Simulationsumgebung einsetzbar																
2,1	Definition Transportszenario 2030	OTH	ID, FTM, K+N, Eiflein, Kögel, AVL															
2,2	Auslegung Antrieb u. Rekuperation	LVK	FTM, AVL, KB, Kögel															
2,3	Reduktion des Fahrzeuggewichts	FTM	Kögel, KB															
2,4	Auslegung Aerodynamik u. Design	ID	Kögel															
2,5	Simulation der Gesamtfahrzeugeigenschaften	FTM	ID, LVK, K+N, Eiflein, Kögel, AVL, KB															
2,6	Preisdefinition/ TCO-Kalkulation	FTM	LVK, Kögel, Eiflein															
3	Feedback	M3: Optimiertes Fahrzeugmodell																
3,1	Demonstrator	ID	FTM, Kögel, AVL															
3,2	Darstellung der Berechnungsergebnisse	FTM	LVK, OTH, AVL															
3,3	Kundenfeedback	OTH	ID, K+N, Eiflein															
3,4	Diskussion u. Bewertung	FTM	alle															
3,5	Feedbackintegration in das Fahrzeugkonzept	FTM	alle															
4	Detaillierung	M4: evaluiertes Fahrzeugkonzept																
4,1	Leichtbaumaßnahmen	FTM	Kögel															
4,2	Systemwirkungsgrade bei Energiewandlung	LVK	AVL															
4,3	Fahrzeugarchitektur und Package	FTM	ID, LVK, K+N, Eiflein, AVL, KB															
4,4	Optimierung von Aerodynamik und Design	ID																
4,5	Detaillierung der Gesamtfahrzeugsimulation	FTM	LVK, AVL, Kögel, KB															
4,6	Detaillierung TCO-Berechnung	FTM	AVL, K+N, Eiflein															
5	Validierung	M5: Virtuelles Fahrzeug																
5,1	Verbrauchszyklenfahrten	FTM	LVK, AVL															
5,2	Emissionsvalidierung	LVK																
5,3	Ableiten von CAD-Daten	FTM	ID, KB, Kögel															
5,4	Digitale Straßenzulassung Gesamtfahrzeug	FTM																
5,5	Marktakzeptanz durch TCO-Vergleich	FTM	K+N, Eiflein, AVL															

6 Glossar

18650	Zellformat von Lithium-Ionen-Zellen 18 mm Durchmesser, 65 mm Länge
BEV	Engl. Battery Electric Vehicle
CNG	Compressed Natural Gas (engl.), unter Hochdruck gespeichertes Erdgas
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DME	Dimethylether
DoD	Depth of Discharge, Ladehub
EM	Elektrische Maschine
ETC	European Transient Cycle (engl.), ehemaliger Prüfzyklus zur Bestimmung der Emissionswerte von Nutzfahrzeugmotoren
FAME	Fatty Acid Methyl Ester (engl.), Dieselkraftstoff, durch Veresterung von Pflanzenöl gewonnen
Fraunhofer ISI	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung
FTM	Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
HE	Die Hochenergie-Entwicklung setzt auf Batteriematerialien mit höherer spezifischer Energie, ohne dabei die Zellspannung zu erhöhen. Entsprechende Batterietechnologien befinden sich heute in der Forschung und Entwicklung und werden in den kommenden Jahren als marktreif, insbesondere für den Einsatz in Elektrofahrzeugen erwartet [83].
HEV	Hybrid Electric Vehicle (engl.), Hybridfahrzeug mit Elektroantrieb
HMI	Human-Machine-Interface (engl.), Mensch-Maschine-Schnittstelle
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil (engl.), Hochwertiger Dieselkraftstoff, hergestellt aus Pflanzenöl
ID	Lehrstuhl für Industrial Design
K+N	Kühne + Nagel
LIB	Lithium-Ionen Batterie
Li-S	Lithium-Schwefel-Akkumulatoren besitzen eine Anode aus Lithium und eine Kathode aus Schwefel sowie Kohlenstoff, was eine sehr hohe Energiedichte ermöglicht [83].
LNG	Liquefied Natural Gas (engl.), durch Kühlung verflüssigtes Erdgas
LPG	Liquefied Petroleum Gas (engl.), durch leichten Überdruck verflüssigtes Gasgemisch aus Propan und Butan
LVK	Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen
M2M	Machine-to-Machine (engl.), Maschine-Maschine-Interaktion
Milk-Run	Kombination von Versand und Empfang im Rundlauf mit mehreren Stopps
NEDO	„New Energy and Industrial Technology Development Organization“ (engl.), die größte öffentliche Organisation Japans zur Förderung von Forschung und Entwicklung an und Bereitstellung von neuen industriellen, energie- und umweltbezogenen Technologien [83].
NiMH	Nickel-Metall-Hydrid, Batterietechnologie
NMC	„Lithium nickel manganese cobalt oxide“ (engl.), Abkürzung für Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid mit der Summenformel $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{CO}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ bezeichnet ein ganzes Stoffsystem. Batterien auf der Basis dieses Kathodenmaterials vereinen mehrere Vorteile anderer Batterietechnologien auf sich: die hohe Kapazität von Lithium-Kobaltoxid, die gute Hochstromfähigkeit von Lithium-Nickeloxid und die Überladestabilität sowie die Preisvorteil von Lithium-Manganoxid. Sie

	bieten außerdem eine hohe mittlere Entladespannung und können relativ schnell geladen werden [83].
NMC:XYZ	Innerhalb der Summenformel $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{CO}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ für NMC gelten verschiedene Zusammensetzungen von Nickel, Kobalt und Mangan als besonders vielversprechend für den Einsatz in Lithium-Ionen-Batterien [83].
OME	Oxymethylenether
opt. LPA	Optimale Lastpunktanhebung
PEMS	Portable Emissionsmesssysteme
PHEV	Engl.: Plug in Hybrid Electric Vehicle
RDE	Real Driving Emissions (engl.), von Fahrzeugen im realen Fahrbetrieb ausgestoßene Menge an Schadstoffen
Si/C-Komposite	Silizium-Kohlenstoff-Komposite als Anodenmaterialien gelten als vielversprechend für den Einsatz in Lithium-Ionen-Batterien und stellen eine Kombination von Graphit mit Anteilen von Silizium dar [83].
TCO	Total Cost of Ownership
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WHTC	World Harmonized Transient Cycle (engl.), Relevanter Prüfzyklus für reglementierte Abgasbestandteile von Nutzfahrzeugen

7 Anhang A: Mobilitätsdaten

Aufgezeichnete Daten der Fahrzeugflotte

Tabelle Anhang A: Übersicht Server-ID und Flottenfahrzeuge nach Transportkonzepten

Zugfahrzeug	Transportkonzept			
	Fernverkehr	Linie	Verteilerverkehr	
Lkw1	Iveco 12 t		Plane 7,2m	
Lkw2	Iveco 12 t		Plane 7,2m+ Anhänger 7,2m	
Lkw3	Iveco 12 t		Plane 7,2m	
Lkw4	Iveco 12 t		Plane 7,2m	
Lkw5	Atego 7,5 t		außer Betrieb	
Lkw6	Atego 12 t		Plane 7,2m	
Lkw7	Atego 7,5 t		Plane 6,1m	
Lkw8	Actros18t	Lang-Lkw Wechselbrücke		
Lkw9	Actros 18t	Auflieger Big Maxx		
Lkw10	Actros18t	Auflieger Big Maxx		
Lkw11	DAF XF 18t	Auflieger		
Lkw12	DAF LF 7,5t			
Lkw13	Actros 18t	Solo		
Lkw14	Actros 18t	Auflieger		
Lkw15	Actros 18t			
Lkw16	Actros 18t			
Lkw17	DAF XF 18t	Auflieger		
Gesamtkilometer (14.04.16 bis 26.06.16)		95.279 km	106.391 km	34.977 km

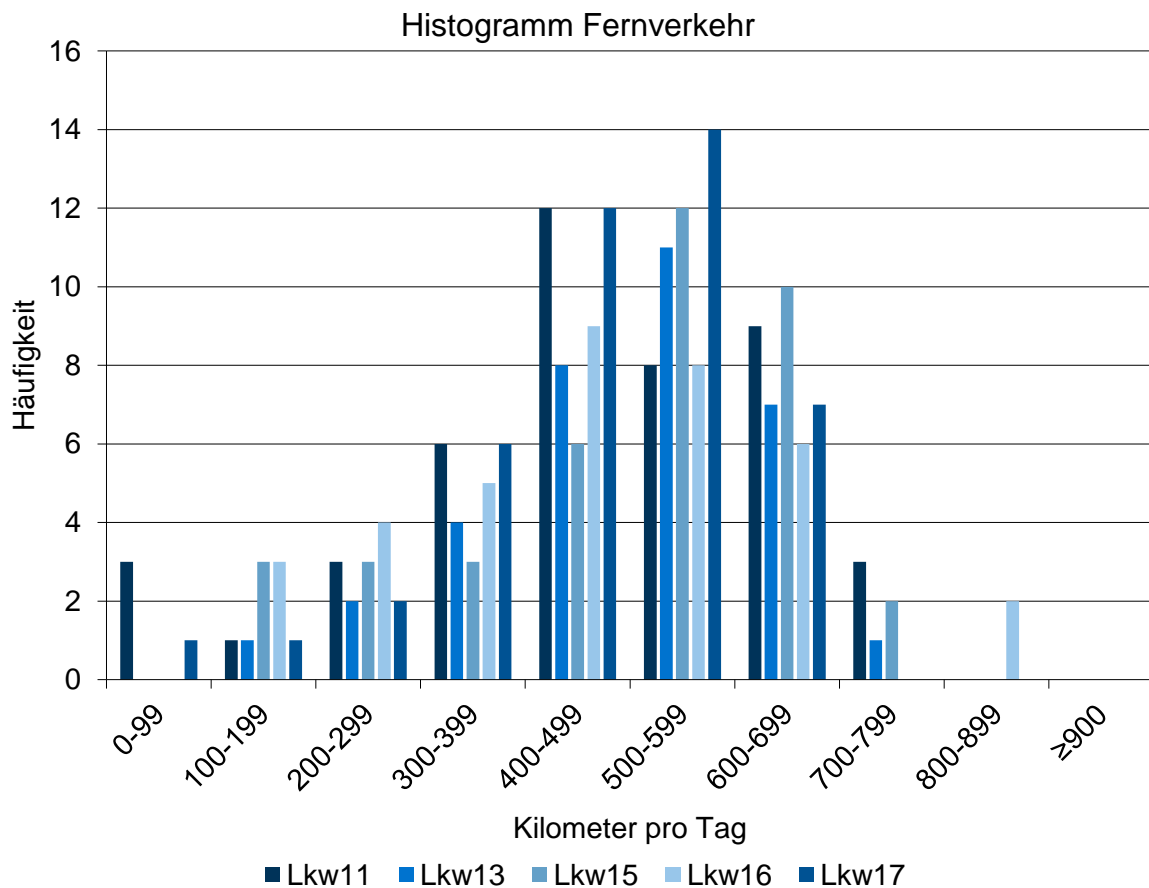


Abbildung 15: Verteilung der Tageskilometer im Fernverkehr

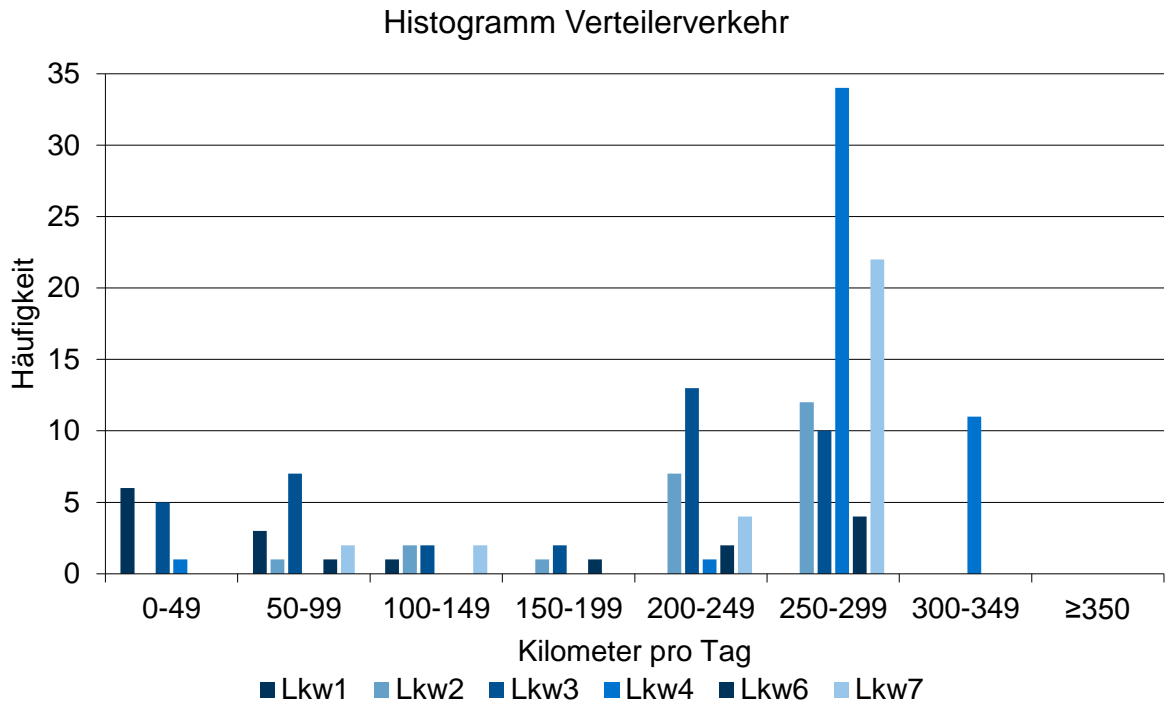


Abbildung 16: Verteilung der Tageskilometer im Verteilerverkehr

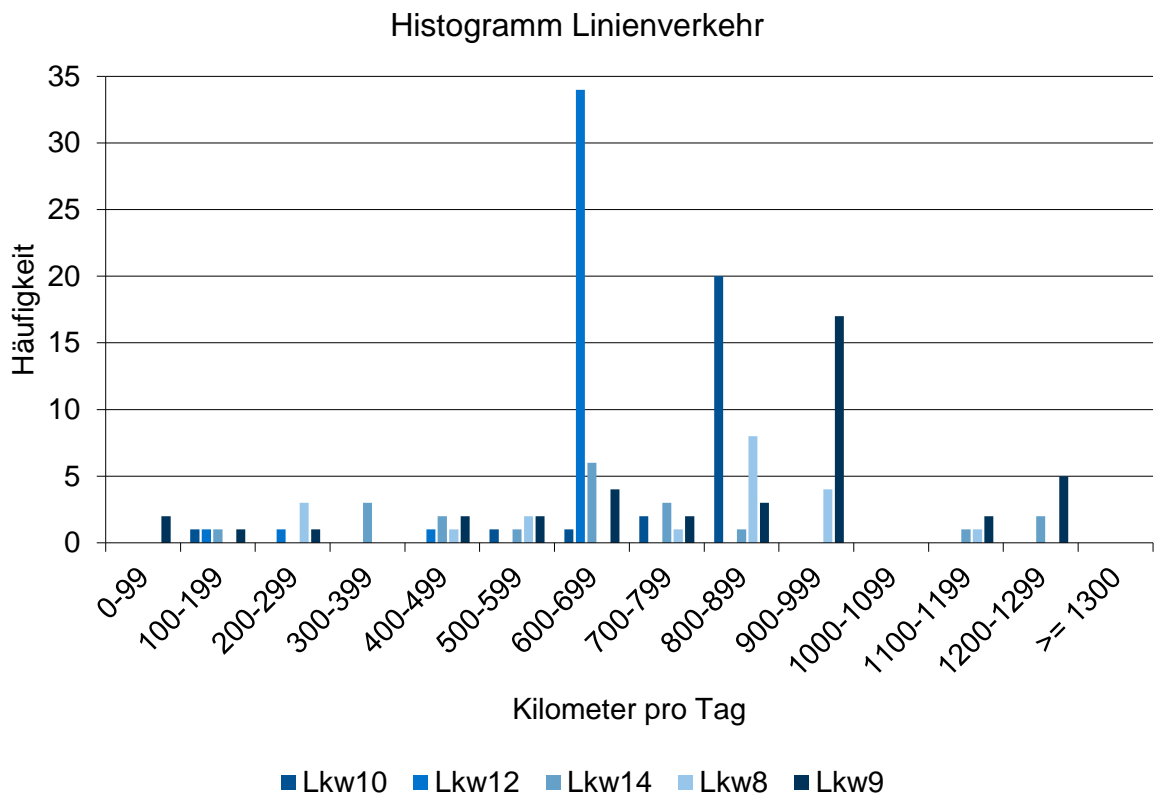


Abbildung 17: Verteilung der Tageskilometer im Linienverkehr

8 Anhang B: Aerodynamik

1. Walmart Futuristic Truck (2014) - Aerodynamik, Antriebskonzept



Merkmale: Turbinengetriebener Hybrid-Antriebsstrang; CFK Bauweise; Luftwiderstand um 20 % gegenüber dem Peterbilt Model 386 reduziert; Technologieträger für Einzeluntersuchungen [88]

2. MAN Concept S (2010) - Aerodynamik



Merkmale: Zugmaschine und Auflieger aufeinander abgestimmt aerodynamisch optimiert; 25 % Verbrauchersparnis als Ziel; Gesetzlich zulässige Gesamtlänge (16,50 m) wird überschritten; Konzeptstudie; Exterieur 1:1 Modell [89]

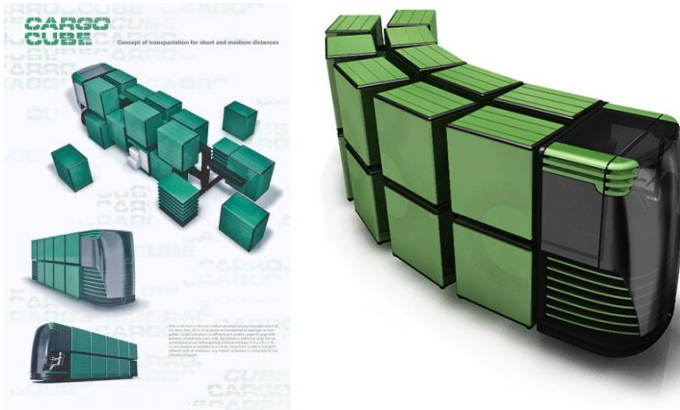
3. King Kong von Xin Liu (2008) - Beladungskonzept, Fahrdynamik



Powerfu

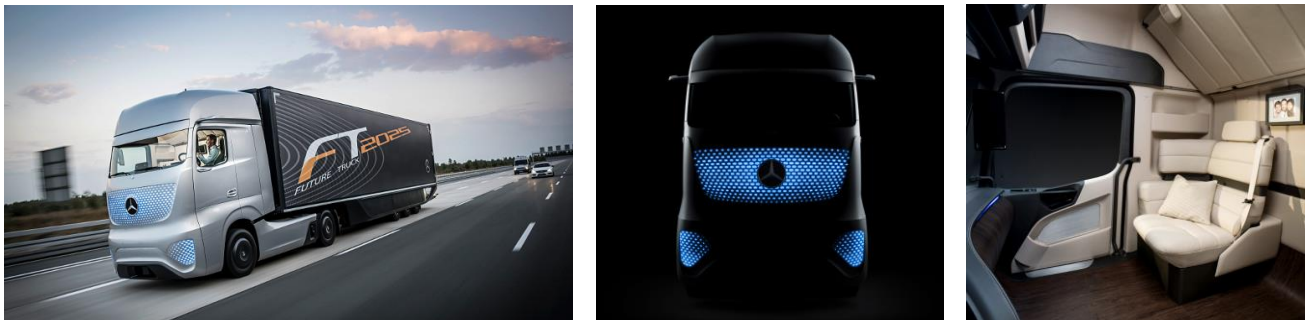
Merkmale: Radnabenmotoren für optimiertes Package mit einfachem Antriebsstrang; Vorderräder flexibel ausstellbar für erhöhte Manövrierfähigkeit; Fahrerkabine in der Höhe verstellbar. Schnelle Umwandlung von der Beförderung von Stückgut im geschlossenen Kasten bis 20 Fuß Länge zur Beförderung eines 40 Fuß-Containers und anderer Fracht; Ideenskizze [90]

4. Cargo Cube (2008) - Beladungskonzept



Merkmale: Modulares Transportsystem mit einheitlichen Transportboxen ermöglicht ständigen Zugriff auf alle Ladungsgüter; flexibles Be- u. Entladen; Verzicht auf eine zusätzliche Hülle. Prinzip „rollende Kleiderstange“; Ideenskizze [91]

5. Mercedes-Benz Future Truck 2025 (2014 → 2025) - Ästhetik, Reisekomfort, Aerodynamik, autonomes Fahren, Mensch-Maschine-Interaktion



Merkmale: Aerodynamikverbesserungen durch verlängerte Front; Optimierungen im Dachbereich und kompakte Kameras statt Außenspiegel; Autonomes Fahren; Der Fahrer erhält dabei an seinem Arbeitsplatz zusätzliche Aufgaben („Mobiles Büro“); Prototyp Gesamtfahrzeug [92]

6. „Space Truck“ von Luigi Colani (1980er) - Ästhetik, Aerodynamik



Merkmale: Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von 30 % als Ziel des Konzepts; Abgerundete, organische Formen bestimmen das Exterieur; Karosserie aus leichten Kunststoffen und Karbonfaser; Prototyp, Designstudie [93]

7. Freightliner Revolution (2012), Aerodynamik, Ästhetik



Merkmale: Leichtbauweise und aerodynamische Optimierungen bestimmen das Konzept; Kameras anstatt Außenspiegel; Aerodynamische Linienführung; Chassis aus Aluminium; Variable Antriebskonfiguration; Zugang zum Auflieger zusätzlich über Schiebetür in der Fahrerkabine; Konzeptfahrzeug, Technologieträger für Einzelaspekte [94]

8. Mercedes Aero Trailer (2011), Anhänger, Aerodynamik



Merkmale: Einsparung von 2000 Litern Diesel und mehr als 5 Tonnen CO₂ pro Jahr (bei jährlicher Fahrleistung von 150.000 Kilometern); Aerodynamische Optimierung wie Anströmkörper, abgerundete Kanten, zusätzliche Verkleidungselemente sowie Front- und Heckanzüge reduzieren den Luftwiderstand um 18 % ohne das Ladevolumen zu verringern; Prototypenstatus für Anhänger [95]

9. TOROS advanced truck concept (2014), Reisekomfort, Aerodynamik, Effizienz



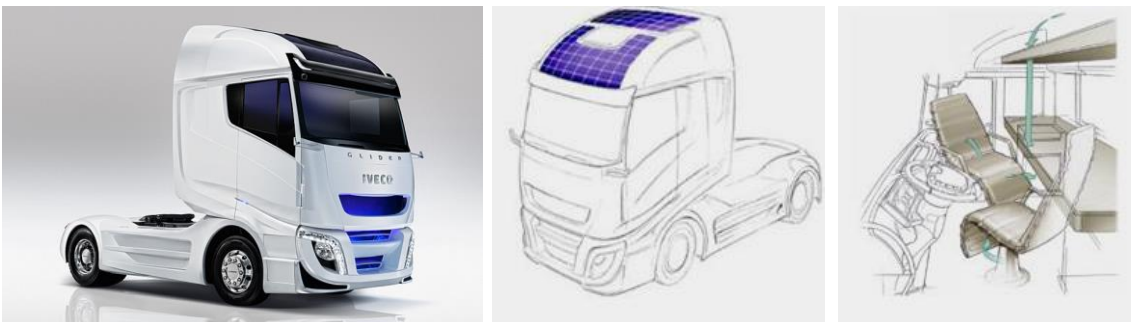
Merkmale: CFK-Monocoque Chassis auf einem Verbundleiterrahmen; 200 kW Mikroturbine versorgt 6 Radnabenelektromotoren für Kraftstoffeffizienz und erhöhtes Innenvolumen. Aktive Aerodynamikelemente im Unterboden reduzieren nach Bedarf den Luftwiderstand oder stabilisieren das Fahrzeug; Küche, Toilette, Schlafraum und geräumiger Wohn-/Arbeitsbereich erhöhen den Reisekomfort; Virtuelle Ideenskizze [96]

10. Isuzu T-Next Concept (2011) – Ästhetik, Aerodynamik



Merkmale: Exterieurstudie zur Designidentität der Marke "Clean, Solid, Emotional" - verbindet herkömmliche Elemente wie Fenster und vordere Öffnungen mit neuartigen aerodynamischen Elementen wie Rückfahrkameras und geneigtem Dach; Virtuelle Designstudie [97]

11. Iveco Glider (2010) - Effizienz, Aerodynamik



Merkmale: Konzept für den Transport großer Ladungen über weite Strecken; Energieeffizienz und Langlebigkeit stehen im Vordergrund; Sonnenkollektoren (Leistung bis zu 2 kW, Kraftstoffersparnis von maximal 1 %); Energierückgewinnung (Kraftstoffersparnis von bis zu 7 %); Verringerter Rollwiderstand (Aerodynamik-Paket und Unterbodenverkleidung); Konzeptstudie, 1:1 Modell [98]

12. Freightliner SuperTruck (2015) - Reisekomfort, Aerodynamik, Effizienz



Merkmale: Verbrauch von 19,3l/100 km Dieselmotorkraftstoff bei 105 km/h etwa 30 % niedriger als der Klassendurchschnitt; Fahrwerk mit variabler Bodenfreiheit; Kühlergrill mit aktiven Lamellen (Luftklappensteuerung); Ausgeprägte Radverkleidungen; Zusätzliche Solarzellen auf dem Trailer; Hybridmodul mit Energierückgewinnung; Prototyp Gesamtfahrzeug [99]

13. Renault CX/03 (2012) - Aerodynamik



Merkmale: Variable Abdeckung des Kühlers mittels Luftklappensteuerung; Auflieger mit aerodynamisch geformtem Dach; seitliche Radverkleidungen; aerodynamische Verlängerung des Hecks; Abdeckklappen zwischen Zugmaschine und Auflieger verbinden bei Geradeausfahrt das Gespann zu einer aerodynamischen Einheit; virtuelle Konzeptstudie [100]

14. Scania Truck Concept (2009) - Ästhetik, Reisekomfort



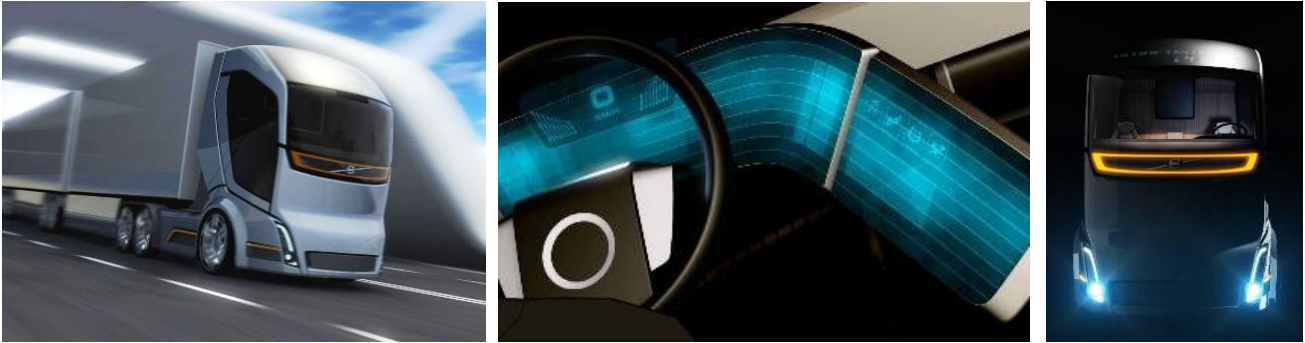
Merkmale: Ergonomischer Innenraum; Exterieurgestaltung versucht die „einschüchternde“ Wahrnehmung der LKWs als „laute Spritfresser“ zu verbessern; LEDs an Radabdeckungen zeigen aktuelle Fahrzeit seit der letzten Pause an; virtuelle Ideenskizze [101]

15. Terrain Adventurer (2009) - Beladungskonzept, Fahrdynamik



Merkmale: Speziell für Off-Road und schwere Klimabedingungen; Flexibler und verlängerbarer Bereich in der Mitte; Schutz von empfindlichen Teilen ohne den Zugang für Wartung einzuschränken. Verschiedene Einzelaspekte zur Optimierung von Be- und Entladung; virtuelle Ideenskizze [102]

16. Volvo 'Vision 2020' Concept Truck (2010 → 2020) - Reisekomfort



Merkmale: Konzentriert sich auf Entwicklung der Fahrerumgebung; Traditionelles Armaturenbrett durch dünnes Film-Panel ersetzt, das wichtige Informationen für den Fahrer darstellt; Designstudie [103]

17. Mitsubishi FUSO-Concept II (2012 → 2032) - Reisekomfort, Anhänger, Aerodynamik



Merkmale: Solar-Panel Hybrid-Technologie und automatisierte Gruppenbildung (Platooning); Schlanke Front zur Verringerung des Luftwiderstands; Kabine und Frachtraum nicht getrennt; Kabine als Glaskuppel für verbesserte Rundumsicht und Komfort; Virtuelle Gesamtfahrzeugstudie [104]

18. NMC Nikola One (2016) - Antriebskonzept



Merkmale: Serieller Hybrid mit sechs elektrischen Radnabenmotoren; Energiebereitstellung durch Gasturbine; Batterie mit 320 kWh Kapazität; Regeneratives Bremsen; Vollständig ausgestatteter Wohnbereich für den Fahrer; Markteinführungstermin unbekannt; 7000 Vorbestellungen (Stand: Juni 2016) [105]

19. Hybrid-Lkw mit Oberleitung (2015) - Antriebskonzept



Merkmale: Hintergrund: Ziel Schwedens, bis 2030 von fossilen Brennstoffen unabhängigen Transportsektor aufzubauen; Lkw kann bis 90 km/h automatisch an Oberleitungssystem Energie entnehmen. Bügel gleichen alle Bewegungen des Fahrzeuges aus. Gebiete ohne Oberleitungsausbau können batterieelektrisch oder mit gasmotorisch angefahren werden [106]

20. Hylo Hybrid Truck Concept (2011) - Reisekomfort



Merkmale: Diesel-Elektro-Truck; Elektromotoren in jedem Rad; Niedrige Fahrerposition. Ermöglicht leichteren Ein-/Ausstieg und ausreichend Platz für zwei-Ebenen Kabine (doppelstöckig) [107]

21. TUM Innotruck (2012) - Mensch-Maschine-Interaktion, Ästhetik, Aerodynamik



Merkmale: Entwurf von Colani. Hybrid-Lastwagen (70 km elektrische Reichweite; Biodiesel Range Extender). Neugestaltung der Nahtstelle Mensch-Maschine: Bedienelemente passen sich dem typischen Verhalten und den individuellen Fähigkeiten des Fahrers an und reagieren auf wechselnde Bedingungen (z.B.: Verkehrsverhältnisse oder Aufmerksamkeit des Fahrers); Forschungsprojekt wird über die TUM-IAS (Institute for Advanced Study) und die IGSSE (International Graduate School of Science and Engineering) von der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder unterstützt. c_w -Wert ca. 0.3; Effizienzmaßnahmen (Aerodynamik, Reifen, u.ä.) halbieren den Fahrwiderstand nahezu [108]

22. Nachkriegs - Lkw Konzepte (1940er) - Ästhetik



Merkmale (Links): „Bohn Aluminium and Brass Corporation“: Poster aus Serie von Werbungen, die Ingenieure zu neuen Ideen anregen sollten [109]

Merkmale (rechts): Idee stammt aus Gegend um Detroit; Kleine Führerkabine auf der Oberseite; Aerodynamische Kabine wurde durch Seitentür betreten [110]

23. Aerodynamics Truck & Trailer (2012) - Aerodynamik



Merkmale: Geht auf Designstudie Aero-Trailer zurück (Konzept 8); Truck für den Fern- und Verteilerverkehr; Aerodynamik um ca. 12 % verbessert; Verbrauchseinsparung von ca. 3 % auf Fernstraßen. Bei 50.000 km/Jahr Ersparnis von rund 350 Liter/Jahr; Basis des Aerodynamics Truck ist Fahrgestell mit dem Fahrerhaus des Actros Classic Space. [111]

24. Marks & Spencer Teardrop Trailer (2007) - Anhänger, Aerodynamik



Merkmale: CO₂-Emissionen um 20 % verringert; Entwickelt und hergestellt von Don-Bur; Nachahmung der Tropfenform; Erhöhung des Laderaums; abgerundete Kanten; Übergang zwischen Lkw und Anhänger verkleinert [112]

25. MAN Fulda (2000) - Reisekomfort, Aerodynamik



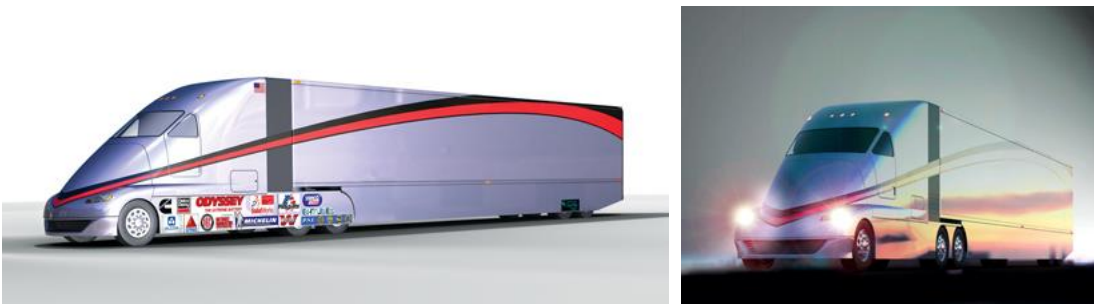
Merkmale: Geneigte Windschutzscheibe; Abgerundete Front und vollständig geschlossenes Gehäuse; Kabine in drei Teile unterteilt: Arbeitsbereich, Wohnraum (vergrößert gegenüber heutigen Lkw) und Motorraum; Große Schiebetür auf beiden Seiten der Kabine; Ergonomischer flacher Kabinenboden; Höhe vom Boden bis zur Decke erreicht 2 m; Tiefliegender passiver Spoiler verhindert Turbulenzen unter dem Lkw [113]

26. VOLVO Skylon (2010 →2020) - Ästhetik, Aerodynamik



Merkmale: Inspiriert von Le Mans LMP-1 Fahrzeugen; Voll elektrischer Antrieb; Solarpaneleinheit auf dem Fahrzeugdach; Radnabenmotoren für den Antrieb; Aufgewerteter Wohnraum für den Fahrer [114]

27. Supertruck von Sliwa und Singley (2011) - Aerodynamik



Merkmale: Herkömmliche Außenhaut des Lkw wird durch neue aerodynamische Hülle ersetzt. Antriebstechnik und Laderaumkonzept nicht verändert (klassischer „Class 8 Truck“). Einsparung von 25 % Kraftstoff angestrebt [115]

28. Futuretruck von Jeremy Singley (2011) - Aerodynamik, Hänger



Merkmale: Weiterentwicklung des Supertrucks; Völlig neues Design; CFD-Ergebnis (numerische Strömungssimulation): Verringerung des Strömungswiderstandes gegenüber einem herkömmlichen Lkw um 63 % [116]

29. Airflow Truck Company – BulletTruck (2012) - Aerodynamik



Merkmale: Durchschnittsverbrauch von 13,4 mpg (17,6 l/100 km); Verlängerte Bugnase und geglättete Seiten; Hybridisierter Klimakompressor und Servolenkungspumpe reduzieren motorische Verluste [117]

30. Airflow Truck Company – Starship (2015 → 2017) - Aerodynamik



Merkmale: Neues Design mit dem Ziel aktuelle Kraftstoff-Effizienzrekorde für „Class 8“ Lkw zu brechen; StarShip Zugmaschine und Anhänger in einer Einheit; Konzept erhält Straßenzulassung in den USA [118]

31. Freightliner Inspiration (2015 →2025) - autonomes Fahren, Reisekomfort, Aerodynamik



Merkmale: Basiert auf US-Serienmodell Freightliner Cascadia Evolution; Zulassung für autonomes Fahren in Nevada; Platooning in Zukunft als Konzept zur Effizienzsteigerung in Entwicklung [119]

32. Isuzu FL-4 (2002) - Beladungskonzept, Aerodynamik



Merkmale: Mittelgroßer Lkw bietet optimales Design für Stadt- und Überlandtransport; Thema hinter dem FL-4-Design: "Performance created by design"; Konisches Kabinendesign leitet frontalen Luftstrom effektiv seitlich ab; Luftstrom fließt ohne Trennung über die Seiten des Fahrzeugs, was Kraftstoffeffizienz und Vorwärts-Stabilität verbessert; Stoßfänger und bündiger Unterboden derart konzipiert, um Auftrieb zu minimieren und große Aufprallzone zu schaffen; Konische Windschutzscheibe bietet dem Fahrer ein großes Sichtfeld; Layout minimiert Kabinenlänge bei maximierter Ladelänge [120]

33. Steinwinger Cab-Under (1983) - Antriebskonzept, Beladungskonzept, Hänger



Merkmale: Zugmaschine unter dem Auflieger; Gesetzlich festgelegte Maximallänge von rund 18 Metern kann für das Gespann allein für Laderaum ausgeschöpft werden. Zwischen 20 und 50 Prozent zusätzliches Ladevolumen; Beidseitiger Zugang zur Ladefläche; Konzept beruht auf Baukastenprinzip: zwei bis fünf Achsen, verschiedene Radstände und Motorvarianten [121]

9 References

- [1] Statistisches Bundesamt, "NST-2007 Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik," Wiesbaden, 2008.
- [2] M. Schubert, "Verkehrsverflechtungsprognose 2030," Jun. 2014.
- [3] OpenStreetMap, *OpenStreetMap Deutschland: Die freie Wiki-Weltkarte*. [Online] Available: <http://www.openstreetmap.de/>. Accessed on: Aug. 02 2016.
- [4] U. Knops, *Organisation und Ablauf: Warenausgang*. [Online] Available: <http://www.mawilog.de/warenausgang/?page=warenausgang>. Accessed on: Jul. 22 2016.
- [5] F. Klug, *Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. Berlin: Springer, 2010.
- [6] M. ten Hompel, Ed., *Software in der Logistik: Prozesse steuern mit Apps ; [Anforderungen, Funktionalitäten und Anbieter in den Bereichen WMS, ERP, TMS und SCM]*, 1st ed. München: Huss, 2013.
- [7] *Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Dieseldieselkraftstoff - Anforderungen und Prüfverfahren*, EN 590.
- [8] *Petroleum products -- Fuels (class F) -- Specifications of dimethyl ether (DME)*, 16861:2015, 2015.
- [9] AB Volvo, Ed., "The Volvo Group Annual and Sustainability Report 2015," Göteborg, 2016.
- [10] M. Werner and G. Wachtmeister, "DME - Alternative Kraftstoffe," Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V, Dresden, Jan. 2009.
- [11] K. Gaukel *et al.*, "Der Kraftstoff OME2: Ein Beispiel für den Weg zu emissionsneutralen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor," in *37. Internationales Wiener Motorensymposium*, 2016.
- [12] M. Härtl *et al.*, "Abschlussbericht EREKA (Emissionsreduktion durch erneuerbare Kraftstoffanteile)," Bayerische Forschungstiftung (BFS), Jan. 2014.
- [13] M. Härtl, *Emissionsreduktion bei Dieselmotoren durch den Einsatz sauerstoffhaltiger Kraftstoffe*. München: Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Technische Universität München, 2015.
- [14] M. Härtl, P. Seidenspinner, E. Jacob, and G. Wachtmeister, "Oxygenate screening on a heavy-duty diesel engine and emission characteristics of highly oxygenated oxymethylene ether fuel," *Fuel*, vol. 153, pp. 328–335, 2015.
- [15] M. Härtl, P. Seidenspinner, G. Wachtmeister, and E. Jacob, "Synthetischer Dieseldieselkraftstoff OME1 — Lösungsansatz für den Zielkonflikt NOx-/Partikel-Emission," *MTZ Motortech Z*, vol. 75, no. 7, pp. 68–73, 2014.
- [16] H. Menrad and A. König, *Alkoholkraftstoffe*. Vienna: Springer, 1982.
- [17] E. Wendler-Kalsch and H. Gräfen, *Korrosionsschadenkunde*, 1st ed. Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [18] U. Albrecht, P. Schmidt, W. Weindorf, R. Wurster, and W. Zittel, "Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen: Eine Expertise für die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV)," Frankfurt, 2013.
- [19] S. Mokhatab, J. Y. Mak, J. V. Valappil, and D. A. Wood, *Handbook of Liquefied Natural Gas*. Burlington: Elsevier Science, 2013.
- [20] C. Heidt *et al.*, "CNG und LPG - Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs: Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima," Heidelberg, Berlin, Ottobrunn, Leipzig, Jul. 2013.
- [21] *RICHTLINIE 2014/94/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe: RL 2014/94/EU*, 2014.

- [22] B. Uhlig and S. Wohlgemuth, Eds., *LNG - liquefied natural gas: Förderung, Transportkette und motorische Verbrennung*. München: Techn. Univ. LVK, 2012.
- [23] A. Lajunen and T. Lipman, "Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses," *Energy*, vol. 106, pp. 329–342, 2016.
- [24] California Environmental Protection Agency Air Resources Board, "Draft Technology Assessment: Medium- and Heavy-Duty Fuel Cell Electric Vehicles," Sacramento, Kalifornien, 2015.
- [25] E. d. Boer, S. Aarnink, F. Kleiner, and J. Pagenkopf, "Zero emissions trucks: An overview of state-of-the-art technologies and their potential," CE Delft, Delft, 2013.
- [26] R. Edwards *et al.*, *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context: Tank-to-wheels (TTW) report, version 4, July 2013*. Luxembourg: Publications Office, 2013.
- [27] *RICHTLINIE 98/70/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Qualität von Otto- und Dieselkraftstoffen und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EWG des Rates in der durch RI. 2015/1513/EU vom 9. September 2015 (ABl. L239 v. 15.9.2015) geänderten Fassung: Richtlinie 98/70/EG des europäischen Parlaments und des Rates*, 2015.
- [28] L. L. TIAX, "Full Fuel Cycle Assessment Well To Tank Energy Inputs, Emissions, And Water Impacts," Cupertino, Kalifornien, 2007.
- [29] *RICHTLINIE 2007/46/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge*, 2007.
- [30] *RICHTLINIE 96/53/EG DES RATES zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr*, 25 . 1996.
- [31] *Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission vom 12. Dezember 2012 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern bezüglich ihrer Massen und Abmessungen und zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*Text von Bedeutung für den EWR, 2012.
- [32] *RICHTLINIE (EU) 2015/ 719 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES - vom 29. April 2015 - zur Änderung der Richtlinie 96/ 53/ EG des Rates zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr*, 2015.
- [33] California Environmental Protection Agency Air Resources Board, *Final Regulation Order for Title 13, Sections 1900, 1956.8, 2036, 2037, 2112, 2139, 2140, 2147, and 2485*. [Online] Available: <http://www.arb.ca.gov/regact/2013/hdghg2013/hdghg2013.htm>. Accessed on: Jun. 17 2016.
- [34] *Verordnung (EU) Nr. 64/2012 der Kommission vom 23. Januar 2012*, 2012.
- [35] R. Vermeulen, J. Spreen, N. Ligterink, and W. Vonk, "The Netherlands In-Service Emissions Testing Programme for Heavy-Duty 2011-2013," TNO innovation for life, Delft, 2014.
- [36] T.F. Stocker, Ed., *Climate change 2013: The physical science basis ; Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, NY: Cambridge Univ. Press, 2014.
- [37] *Greenhouse Gas Emissions Standards and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles*, 2011.

- [38] I. Ellmers, "Selektive katalytische Reduktion von NO_x durch NH₃ an Fe-Zeolithen: Neue Erkenntnisse zu aktiven Zentren und Reaktionsmechanismen," Dissertation, Lehrstuhl für Technische Chemie, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2014.
- [39] *Verordnung (EU) Nr. 895/2014 der Kommission zur Änderung von Anhang XIV der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)*, 2014.
- [40] "Clean-fuel fleet emission standards for heavy-duty engines.: 40 CFR 88.105-94," in *Code of Federal Regulations*
- [41] M. A. Bauer, "Entstehung von Formaldehydemissionen in Magergasmotoren," Dissertation, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, Technische Universität München, München, 2014.
- [42] Europäische Kommission, Ed., "Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum - Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem," Brüssel, 2011.
- [43] G. Fontaras *et al.*, *Development of a CO2 certification and monitoring methodology for heavy duty vehicles: Proof of concept report*. Luxembourg: Publications Office, 2014.
- [44] M. Fries, M. Sinning, M. Höpfner, and M. Lienkamp, "Virtual Truck - A method for customer oriented commercial vehicle simulation," *Proceedings of the 4th International Commercial Vehicle Technology Symposium (CVT16)*, 2016.
- [45] F. Zeitzen, *Immer Abwärts: Lkw-Verbrauchswerte von 1966 bis 2014*. [Online] Available: http://www.eurotransport.de/bilder/lkw-verbrauchswerte-von-1966-bis-2014-immer-abwaerts-6550678.html?fotoshow_item=1. Accessed on: Aug. 26 2016.
- [46] Europäische Kommission, "Impact Assessment Accompanying the document Strategy for Reducing Heavy-Duty Vehicles Fuel Consumption and CO₂ Emissions," Brüssel, 2014.
- [47] P. Capros *et al.*, "EU Reference Scenario 2016: Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050," Europäische Kommission, Luxemburg, Jul. 2016.
- [48] Michael Fries, Michael Sinning, and Markus Lienkamp, "Virtual Combination of Commercial Vehicle Modules (Virtual Truck) for characterization of future Concepts," *Conference on Future Automotive Technology*, 2015.
- [49] P. Wittenbrink, *Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr: Grundlagen - Optimierungspotenziale - Green Logistics*, 2nd ed. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, 2014.
- [50] I. Lübs, *Das volle Programm mit 2 Achsen*. [Online] Available: http://www.krone-trailer.com/fileadmin/contentmedia/pdf/prospekte/2015-09-16_2-Achs_flyer.pdf.
- [51] S. Kopp, S. Schönherr, and H. Koos, "Design und Aerodynamik bei Nutzfahrzeugen," *ATZ Automobiltech Z*, vol. 111, no. 7-8, pp. 512–517, 2009.
- [52] M. Fries and M. Lienkamp, "Technology assesement based on growth functions for prediction of future development trends and the maximum achievable potential," in *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, pp. 1563–1568.
- [53] W. Schöffmann *et al.*, "Kraftstoffeffizienz als Herausforderung zukünftiger Nutzfahrzeugantriebe," in *Proceedings, Internationaler Motorenkongress 2014*, J. Liebl, Ed., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, pp. 639–655.
- [54] S. Kunkel, *Hochgenaue experimentelle Ermittlung der Reibungsverluste der Kolbengruppe eines gefeuerten Motors*. Techn. Univ., Diss.--München, 2011. München: Techn. Univ. Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, 2011.
- [55] M. K. Werner, *Entwicklung eines Motorprüfstands zur Untersuchung der Kolbengruppenreibung und deren Haupteinflussgrößen*. Techn. Univ., Diss., München, 2014, 1st ed. München: LVK Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, 2014.

- [56] A. Merkle, "Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen von Verbrennungsmotoren durch Reibungsoptimierung des tribologischen Systems Kolbengruppe," Dissertation, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, Technische Universität München, München, 2014.
- [57] C. Kirner *et al.*, "Experimental and simulative research advances in the piston assembly of an internal combustion engine," *Tribology International*, vol. 99, pp. 159–168, 2016.
- [58] C. Schneider, J. Halbhuber, and G. Wachtmeister, "Measuring and Simulating Friction between Piston Pin and Connecting Rod on a Tribometer Test Bench to Define Locally Resolved Friction Coefficients," in *SAE 2016 World Congress and Exhibition: SAE International* 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2016.
- [59] M. Münz *et al.*, "Oxymethylene ether (OME1) as a synthetic low-emission fuel for DI diesel engines," in *Proceedings, Internationaler Motorenkongress 2016*, J. Liebl and C. Beidl, Eds., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, pp. 537–553.
- [60] R. van Basshuysen and F. Schäfer, *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*, 7th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [61] "„Wir kratzen an der 45%-Marke des thermischen Wirkungsgrads“,“ *MTZ Motortech Z*, vol. 77, no. 7-8, pp. 24–27, 2016.
- [62] N. Hill *et al.*, "Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy: Final Report to the European Commission – DG Climate Action Ref: DG ENV. 070307/2009/548572/SER/C3," AEA, Didcot, 2011.
- [63] K. Law, M. D. Jackson, and M. Chan, "European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles: Report," Cupertino, California, 2011.
- [64] F. Dünnebeil, C. Reinhard, and U. Lambrecht, "Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminde rung bei schweren Nutzfahrzeugen: Im Auftrag des Umweltbundesamtes," ifeu- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH 32/15, 2015.
- [65] "Greenhouse Gas Emissions and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles - Phase 2 - Proposed Standard," in *Federal Register*, 2015.
- [66] M. G. Bernath, *Ganzheitliche Modellerstellung zur Wirkungsgraderhöhung von Nutzfahrzeugen durch thermische Rekuperation*. München: LVK Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen - Technische Universität München, 2015.
- [67] J. Liebl and C. Beidl, Eds., *Internationaler Motorenkongress 2015: Mit Nutzfahrzeugmotoren - Spezial*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [68] ATZ online, *Leichte Nutzfahrzeuge: EU-Umweltminister verordnen Reduzierung der Emissionen*. [Online] Available: <http://vortraege.atzlive.de/Aktuell/Nachrichten/1/13030/Leichte-Nutzfahrzeuge-EU-Umweltminister-verordnen-Reduzierung-der-Emissionen.html>. Accessed on: Jul. 28 2016.
- [69] European Commission, "Strategie zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge," <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2014/DE/1-2014-285-DE-F1-1.Pdf>.
- [70] ZEIT ONLINE, *Alternativer Antrieb: Volvo bringt das Spritsparen in Schwung*. [Online] Available: <http://www.zeit.de/auto/2013-06/volvo-schwungrad-antrieb>. Accessed on: Jul. 28 2016.
- [71] E. Hoepke and S. Breuer, "Nutzfahrzeugtechnik," vol. 2013.
- [72] E. Lindzus and Bosch Rexroth AG, "HRB – Hydrostatic Regenerative Braking System: The Hydraulic Hybrid Drive from Bosch Rexroth," vol. 2010.
- [73] ZF, "TraXon Hybrid macht Fernverkehr noch wirtschaftlicher: Presseinformation," vol. 2014.
- [74] K. Reif, *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- [75] M. Ecker and D. Sauer, "Lithium-Ionen-Batterien," *Motorentechnische Zeitschrift*, no. 01/2013, 2013.

- [76] W. J. Midgley and D. Cebon, "Comparison of regenerative braking technologies for heavy goods vehicles in urban environments," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 226, no. 7, pp. 957–970, 2012.
- [77] P. Hofmann, *Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*, 2nd ed. Wien: Springer Vieweg, 2014.
- [78] J. Hilton, "Schwungrad-Hybridfahrzeuge als Alternative zu Elektrofahrzeugen," *ATZ Automobiltech Z*, vol. 114, no. 11, pp. 874–878, 2012.
- [79] A. Lajunen, "Fuel economy analysis of conventional and hybrid heavy vehicle combinations over real-world operating routes," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 31, pp. 70–84, 2014.
- [80] M. Sterner and I. Stadler, *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [81] M. Nikowitz, *Advanced Hybrid and Electric Vehicles: System Optimization and Vehicle Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2016.
- [82] L. Horlbeck *et al.*, "Description of the modelling style and parameters for electric vehicles in the concept phase," vol. 2015, researchgate.com.
- [83] Fraunhofer ISI, "Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030," Fraunhofer ISI, Karlsruhe 5, Oktober/ 2012. Accessed on: May 25 2016.
- [84] T. Markel and A. Simpson: NREL, "Plug-In Hybrid Electric Vehicle Energy Storage System Design: Preprint,"
- [85] B. Nykvist and M. Nilsson, "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles," *Nature Climate change*, vol. 5, no. 4, pp. 329–332, 2015.
- [86] D. Rüdiger, *Studie zu alternativen Antriebsformen im Straßengüterverkehr: Status Quo und Entwicklungsperspektiven - 2014*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014.
- [87] Fraunhofer ISI, "Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030,"
- [88] *The future of fleet efficiency: Walmart Advanced Vehicle Experience concept truck*. [Online] Available: <http://blog.walmart.com/sustainability/20140305/the-future-of-fleet-efficiency>.
- [89] *Spritspar-Supertruck aus München: MAN Lkw-Studie Concept S*. [Online] Available: <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/man-lkw-studie-concept-s-spritspar-supertruck-aus-muenchen-2779463.html>.
- [90] *Xin Liu gewinnt VDA Design Award: für seine Arbeit "Allmächtig, so mächtig wie KingKong!"*. [Online] Available: <http://www.hbksaar.de/aktuell/news/news-lesen/article/xin-liu-gewinnt-vda-design-award/>.
- [91] Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, *HTW Dresden - Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden: VDA Design Award*. [Online] Available: <http://www.htw-dresden.de/de/fakultaet-gestaltung/awards/2008/vda-design-award.html>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [92] *Design der Zukunft – Future Truck 2025*. [Online] Available: <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/design/design-der-zukunft-der-future-truck-2025/>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [93] *Luigi Colani's Space Truck*. [Online] Available: <http://ultrafeel.tv/space-truck-colani/>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [94] *freightlinertrucks revolution*. [Online] Available: <https://www.freightlinertrucks.com/Revolution/>.
- [95] *Mercedes Aero-Trailer Designstudie - Windschnittiger Laster*. [Online] Available: <http://www.autobild.de/artikel/mercedes-aero-trailer-designstudie-2324060.html>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [96] *The TOROS advanced truck concept*. [Online] Available: http://blog.technicondesign.com/2014_12_01_archive.html.
- [97] *Isuzu T-Next Concept - Car Body Design*. [Online] Available: <http://www.carbodydesign.com/2011/12/isuzu-t-next-concept/>. Accessed on: Jul. 19 2016.

- [98] *IVECO Glider*. [Online] Available: <http://www.iveco.com/germany/unternehmen/pages/iveco-glider.aspx>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [99] *Freightliner SuperTruck*. [Online] Available: <http://freightlinersupertruck.com/#main>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [100] R. Trucks, *Designstudie CX/03 - Pressemitteilungen - ÜBER UNS - Renault Trucks*. [Online] Available: <http://www.renault-trucks.at/pressemitteilungen/2012-09-27-designstudie-cx03.html>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [101] *Giant Trucks Are No Longer Scary*. [Online] Available: <http://www.yankodesign.com/2009/06/19/giant-trucks-are-no-longer-scary/>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [102] *Terrain Adventurer | Concept Cars | Diseno-Art*. [Online] Available: http://www.diseno-art.com/encyclopedia/concept_cars/terrain_adventurer.html. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [103] *Volvo futuristic Concept Truck 2020*. [Online] Available: <http://www.carsguide.com.au/car-news/volvo-futuristic-concept-truck-2020-17583>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [104] *Design project Fuso Concept II by Mitsubishi Fuso Co. | Future Technology*. [Online] Available: <http://4leggedwiums.blogspot.de/2012/04/design-project-fuso-concept-ii-by.html>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [105] *1.200 Meilen mit einer Füllung*. [Online] Available: <http://www.eurotransport.de/news/elektro-lkw-fuer-die-usa-1-200-meilen-mit-einer-fuellung-7682359.html>.
- [106] *Siemens testet Hybrid-Lkw auf Autobahn mit Oberleitung*. [Online] Available: <http://www.ingenieur.de/Branchen/Verkehr-Logistik-Transport/Siemens-testet-Hybrid-Lkw-Autobahn-Oberleitung>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [107] Behance, *Hylo Hybrid Truck Concept*. [Online] Available: <https://www.behance.net/gallery/2387104/Hylo-Hybrid-Truck-Concept>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [108] S. AG, "Factsheet: Der Innotruck: Zukunft auf Achse im Außenbereich," <http://www.siemens.com/press/pool/de/events/2012/corporate/2012-08-ideenpark/factsheet-innotruck-move-d.pdf>.
- [109] *More wild Bohn Aluminum and Brass Corp. Designs | The Old Motor*. [Online] Available: <http://theoldmotor.com/?p=68768>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [110] *Post WWII Era Transportation Designs | The Old Motor*. [Online] Available: <http://theoldmotor.com/?p=66645>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [111] *Mercedes Benz Aerodynamics Truck & Trailer*. [Online] Available: <http://www.autobild.de/bilder/mercedes-benz-aerodynamics-truck-trailer-3604169.html#bild1>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [112] *Geograph:: Streamlined Marks & Spencer lorry, ... (C) Albert Bridge*. [Online] Available: <http://www.geograph.ie/photo/3939164>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [113] *MAN - MAN-Fulda (Concept vehicles) - history, photos, PDF brochures*. [Online] Available: <http://www.trucksplanet.com/catalog/model.php?id=704>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [114] N. Kalinin, *Volvo Skylon*. [Online] Available: <http://www.coroflot.com/nikitakalinin/volvo-skylon>.
- [115] *Simulating the SuperTruck with SolidWorks*. [Online] Available: <http://www.deskeng.com/de/simulating-the-supertruck-with-solidworks/>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [116] K. Barry, *Aero Improvements Give Big Rigs Bigger MPG*. [Online] Available: <http://www.wired.com/2011/06/36281/>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [117] *13.4 Average Miles Per Gallon: AirFlow BulletTruck achieves*. [Online] Available: http://www.airflowtruck.com/Prototype_Completed_.html.
- [118] *Shell partners with AirFlow Truck Co. to develop 'hyper' fuel-efficient 'StarShip' truck*. [Online] Available: <http://www.thetrucker.com/News/Stories/2015/3/27/ShellpartnerswithAirFlowTruck-Cotodevelophyperfuel-efficientStarShiptruck.aspx>.
- [119] *Unheimlich! So fährt es sich im Truck ohne Fahrer: Freightliner: Daimler testet autonomen LKW*. [Online] Available: http://www.focus.de/auto/neuheiten/freightliner-daimler-testet-autonomen-lkw-unheimlich-so-faehrt-es-sich-im-truck-ohne-fahrer_id_4665029.html.

- [120] *Isuzu FL-4 truck concept to debut at Tokyo Motor Show* - *Car Design News*. [Online]
Available: <http://www.carsdesignnews.com/articles/news/2002/10/isuzu-fl-4-truck-concept-to-debut-at-tokyo-motor-show/>. Accessed on: Jul. 19 2016.
- [121] C. Stockburger, *Konzeptfahrzeug Steinwinter Cab-Under: Irgendwie untergegangen*. [Online]
Available: <http://www.spiegel.de/auto/fahrkultur/steinwinter-cab-under-irgendwie-untergegangen-a-1098233.html>.