7. Internationale
Energiewirtschaftstagung
an der TU Wien

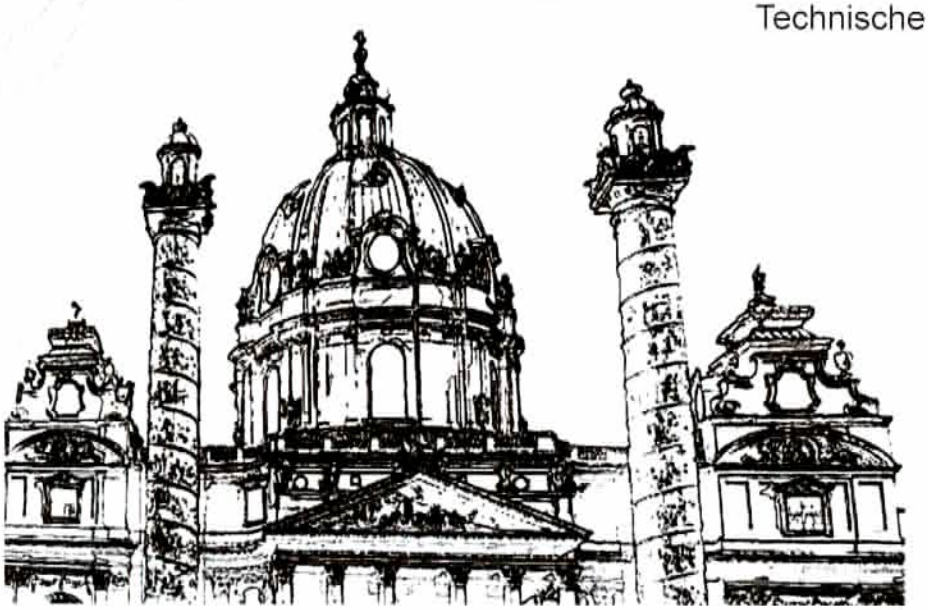
IEWT 2011

Kurzfassungsband

Energieversorgung 2011: Märkte um des Marktes Willen?

16. – 18. Februar 2011
Wien, Österreich

Tagungsort:
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13
1040 Wien



Veranstalter:

Institut für Energiesysteme und
Elektrische Antriebe der TU Wien

AAEE (Austrian Association for Energy Economics)

bmvit

Bundesministerium
für Verkehr,
Innovation und Technologie

- Tobias VEITH, Vigen NIKOGOSIAN (ZEW): „Der Einfluss öffentlichen Eigentums auf die Preissetzung in deutschen Haushaltsstrommärkten“
- Arne GREIN (TU Berlin): „Bewertung von Gebotsstrategien für den Einsatz thermischer Energiespeicher unter Preisunsicherheit am EPEX Spotmarkt“

Session 3 C: Elektromobilität

HS 6

- Christoph LEITINGER (EA, TU Wien): „Optimierte Ladeprozesse der Elektromobilität für die Integration erneuerbarer Energieträger“
- Wolfgang PRÜGGLER, Marion GLATZ (EEG, TU Wien), Friederich KUPZOG (Institut für Computertechnik, TU Wien), Hans Jürgen BACHER (ElectroDrive Salzburg GmbH): „Ökonomische Bewertung unterschiedlicher Business Cases zur Netzintegration von Elektromobilen“
- Martin BEERMANN, Gerfried JUNGMEIER (Joanneum Research): „Quo vadis Elektroauto? Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich“
- Maximilian KLOESS (EEG, TU Wien): „Potenziale alternativer Antriebsysteme zur Reduktion von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr“
- Gerd SCHAUER (Verbund AG): „Electric Vehicles, a Task for International Research Cooperation, International Activities“
- Ludwig PISKERNIK (ÖBB-INFRASTRUKTUR AG): „E-Mobility in Kombination mit der Eisenbahn als ein Baustein einer nachhaltigen Mobilität?“

Session 3 D: Fördersysteme für Erneuerbare

HS 8

- Birgit GÖTZ, Alfred VOß, Markus BLESL, Ulrich FAHL (IER, Universität Stuttgart): „Die Modellierung von Einspeisetarifen in Energiesystemmodellen am Beispiel des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) in Deutschland“
- Frank SENSFUSS (Fraunhofer Institute for Systems- and Innovation Research): „Weiterentwickeltes Fördersystem für die Vermarktung von erneuerbarer Stromerzeugung“
- Sebastian BUSCH, Gustav RESCH, Reinhard HAAS (EEG, TU Wien): „Towards an effective and efficient RES target fulfillment - from BAU to strengthened national support with proactive risk mitigation“
- Nolan RITTER, Manuel FRONDEL, Christoph M. SCHMIDT, Colin VANCE (Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung): „Die ökonomischen Wirkungen der Förderung erneuerbarer Energien: Erfahrungen aus Deutschland“
- Julieta SCHALLENBERG-RODRIGUEZ (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria): „The Cap & Floor System in refit: 3 years of Spanish experience“

Potenziale alternativer Antriebsysteme zur Reduktion von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr

Maximilian KLOESS[1]

TU Wien, Gusshausstraße 25-29/373-2, 58801370371., kloess@eeg.tuwien.ac.at, www.eeg.tuwien.ac.at

Kurzfassung:

Es werden konventionelle und alternative Antriebsysteme für LKW aus wirtschaftlicher Sicht untersucht. Ausgehen vom Stand 2010 wird die Entwicklung der Kosten bis 2050 abgeschätzt. Es zeigt sich, dass Hybridsysteme bis 2020 in allen Fahrzeugklassen in den Gesamtkosten günstiger werden als konventionelle Antriebe. Bei leichten LKW (<3,5t) sind auch elektrische Antriebe wirtschaftlich darstellbar.

Zur Ermittlung der Reduktionspotentiale für Energieverbrauch und Triebhausgasemissionen wird ein Modell der Österreichischen LKW Flotte verwendet anhand dessen Verbreitungsszenarien der Antriebsysteme entwickelt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass durch Einsatz alternativer Antriebe eine Reduktion des fossilen Energieverbrauchs um bis zu 33% und der Treibhausgasemissionen um bis zu 55% bis 2030 möglich ist.

Keywords: Alternative Antriebe, LKW, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Der Transport Sektor hatte in den letzten Jahren einen überproportionalen Zuwachs im Energieverbrauch zu verzeichnen. Dieser wurde vor allem durch den starken Anstieg des Straßenverkehrs verursacht wobei der Straßengüterverkehr dabei einen wesentlichen Treiber darstellte [1]. Diese Entwicklung bringt schwerwiegende ökologische, ökonomische und politische Probleme mit sich: steigende Schadstoff- und Treibhausgasemissionen, Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, Importabhängigkeit.

Effiziente und alternative Antriebsysteme können zur Lösung dieser Probleme beitragen. Ähnlich wie bei PKWs können auch bei Nutzfahrzeugen die Umweltauswirkungen durch effizientere und emissionsärmere Antriebsysteme reduziert werden. Je nach Fahrzeugkategorie kommen dabei unterschiedliche Konzepte in Betracht. Das Spektrum erstreckt sich von Erdgas- und Hybridantrieben bei schweren Nutzfahrzeugen (Klasse N2 & N3) bis hin zu voll elektrischen Systemen bei leichten Fahrzeugen (Klasse N1).

[1] Jungautor

Da die Transportkosten im Güterverkehr ein entscheidendes Kriterium darstellen, müssen alternative Antriebsysteme auch aus wirtschaftlicher Sicht Vorteile bieten um sich am Markt zu behaupten. Ziel dieser Arbeit ist es daher die Antriebsysteme aus wirtschaftlicher Sicht zu untersuchen um daraus deren Marktpotential abzuleiten. Darauf aufbauend soll am Beispiel Österreichs untersucht werden welche Potenziale sich durch deren Verbreitung langfristig für die Reduktion von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr ergeben.

Die Untersuchung basiert auf den Ergebnissen des Projekts NANUPOT[2] in dem konventionelle und alternative Antriebsysteme für Nutzfahrzeuge aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht analysiert wurden.

2 Methodische Vorgangsweise

Die Antriebsysteme wurden einer detaillierten Wirtschaftlichkeitsanalyse unterzogen. Um die Antriebsysteme vergleichbar zu machen wurde in den in der Österreichischen Kraftfahrzeugstatistik definierten Nutzfahrzeugkategorien N1, N2 und N3 jeweils Referenzkriterien (Motorleistung, Nutzlast etc.) definiert die von allen Systemen erfüllt werden müssen.

Im ersten Schritt wurden die Investitionskosten aller Fahrzeuge basierend auf den Kosten ihrer Hauptkomponenten ermittelt. Mit Hilfe der Kraftstoffverbrauche, die im Rahmen des NANUPOT Projekts durch AVL List ermittelt wurden, wurden die Gesamtkosten der Antriebsysteme ermittelt. Die Kostenentwicklung der Antriebsysteme für den Zeitraum 2010-2050 wurde anhand von technologischen Lerneffekten und Kraftstoffpreisszenarien abgeschätzt.

Um die Reduktionspotentiale bei Energieverbrauch und THG Emissionen zu ermitteln wurden Modellbasierte Szenarien erstellt. Hierfür wurde ein Modell der Österreichischen Nutzfahrzeugflotte (Klassen N1, N2 & N3) verwendet welches die Struktur der Flotte, die Dynamik der Flottenerneuerung sowie den Energieverbrauch korrekt abbildet. In dem Modell lassen sich die Auswirkungen der Verbreitung alternativer Antriebsysteme auf den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen für den Zeitraum 2010-2050 simulieren. Die Marktanteile der Antriebsysteme wurde dabei über ein Logit Modell mit spezifischen Kosten als zentrales Entscheidungskriterium ermittelt (vgl. [2] & [3]).

2.1 Fahrzeugklassen und Antriebsysteme

In der Österreichischen Kraftfahrzeugstatistik sind Lastkraftwägen in nach den Kategorien N1, N2 und N3 erfasst. Diese Klassifizierung richtet sich nach dem maximalen Gesamtgewicht der Fahrzeuge und wurde auch in dieser Studie verwendet um die Antriebsysteme für verschiedene Fahrzeugkategorien zu analysieren.

[2] Potenziale Effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050 – NANUPOT: TU Wien; Joanneum Research; AVL List; gefördert im Rahmen des A3plus Impulsprogramms durch das BMVIT

Die Auswahl der alternativen Antriebsysteme, die in jeder Fahrzeugklasse untersucht wurden beruht auf den Einschätzungen der Experten von AVL List. Es wurden nur jene Antriebsysteme untersucht, die aus technischer Sicht realisierbar erschienen (siehe Tabelle 2-1).

2.1.1 Fahrzeugklasse N1

Die Fahrzeugklasse N1 umfasst leichte Lastkraftwägen mit einem Gesamtgewicht bis 3,5t. Hierunter fallen somit neben PKW-ähnlichen Fahrzeugen vor allem Kleintransporter. Die Fahrzeuge werden hauptsächlich im Werk- und Verteilverkehr eingesetzt. Die üblichen jährlichen Laufleistungen liegen zwischen 20 000 und 40 000km/Jahr. Die Fahrzeugklasse N1 ist von der Anzahl gesehen mit über 300 000 Fahrzeugen die größte LKW Kategorie in der Österreichischen Flotte.

In der Klasse N1 wurde ein breites Spektrum an Antriebsysteme untersucht. Neben konventionellen Diesel-Antrieben wurden auch CNG Antriebe sowie verschiedene Formen von Hybriden (Micro-, Mild- und Vollhybride) untersucht. Außerdem wurden auch rein elektrische Antriebsystem wie Plug-In Hybride, batterie-elektrische Anriebe und Brennstoffzellenantriebe Analysiert. Da Fahrzeuge der Klasse N1 verstärkt in dicht besiedelten Gebieten zum Einsatz kommen, werden emissionsarme Antriebsysteme hier in Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

2.1.2 Fahrzeugklasse N2

Die Fahrzeugklasse N2 umfasst Antriebe mit einem Gesamtgewicht zwischen 3,5 und 12t. Auch diese Fahrzeuge werden überwiegend im Werk- und Verteilverkehr eingesetzt und weisen ähnliche jährliche Laufleistungen wie die Klasse N1 auf. Mit etwa 14 000 Fahrzeugen spielt die Klasse N2 in der Österreichischen LKW Flotte nur eine untergeordnete Rolle.

Für die Klasse N1 wurden, neben dem konventionellen Dieselantrieb, ein CNG Antrieb, sowie ein Micro- und ein Mild-Hybrid untersucht.

2.1.3 Fahrzeugklasse N3

In der Fahrzeugklasse sind schwere LKWs mit einem Gesamtgewicht >12t zusammengefasst. Diese Fahrzeuge werden für sehr unterschiedliche Einsatzzwecken eingesetzt. So kommen sie neben dem Werk- und Verteil-Verkehr auch im Fernverkehr zum Einsatz. Somit ergeben sich auch sehr unterschiedliche jährliche Nutzungsintensitäten. În Österreich waren 2010 etwa 41 000 Fahrzeuge der Klasse N3 zugelassen.

In dieser Klasse wurden konventionelle Antriebe und Hybridantriebe untersucht.

2.1.4 Fahrzeugklasse N3-Sattelzug

In der Österreichischen Kraftfahrzeugstatistik sind Sattelzugmaschinen gesondert ausgewiesen (prinzipiell könnten sie aber auch zur Klasse N3 gezählt werden). Sattelzugmaschinen werden überwiegend im Fernverkehr mit sehr hohen jährlichen Kilomieterleistungen eingesetzt. In Österreich sind etwa 17 000 Sattelzugmaschinen registriert.

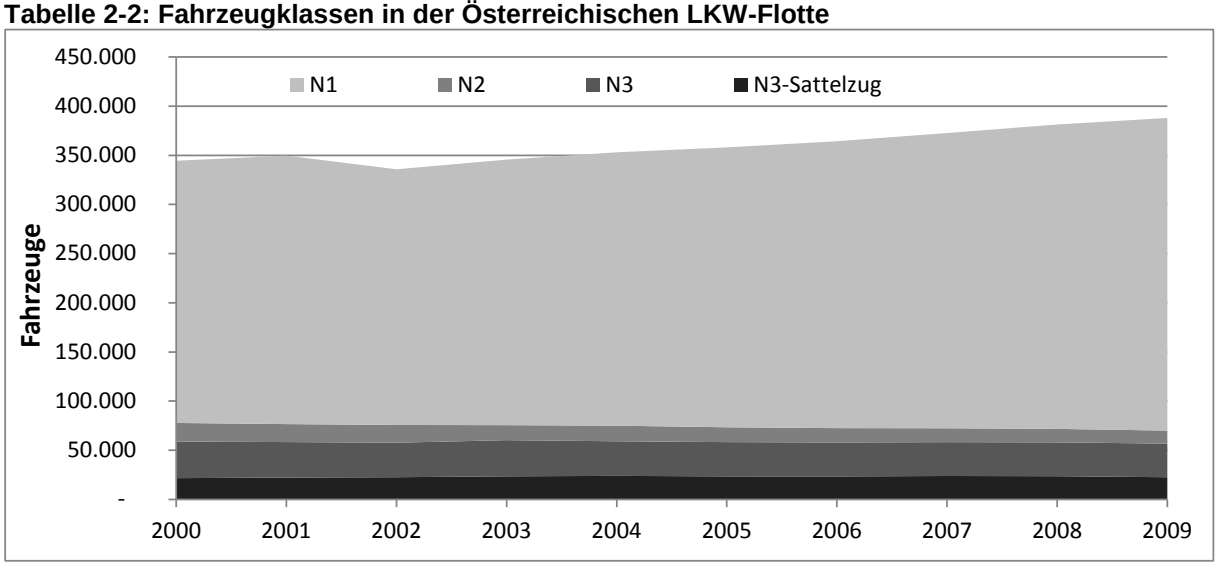
In der Analyse wurde neben dem konventionellen Diesel Anrieb auch ein Hybridantrieb untersucht. In dieser Fahrzeugklasse dient die Hybridisierung vor allem dem effizienteren

Betrieb der Verbrennungskraftmaschine. Durch die Unterstützung des elektrischen Antriebs bei Anstiegen und Energie-Rekuperation bei Bergabfahrten kann diese immer im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden. Dies ist vor allem bei der Topologie auf Europäischen Transitrouten relevant, wo teilweise recht große Höhenunterschiede überwunden werden müssen.

Tabelle 2-1: Fahrzeugklassen, Referenzfahrzeuge und Antriebsysteme

					Referenzfahrzeug		Antriebe aus Sicht 2010:							
	Gewichtskl.:		Leistung:	Zul. Gesamtgew.:	Gewicht:	Leistung:	Diesel	CNG	Micro-Hyb.	Mild-Hyb.	Full-Hyb.	E-Antr. + Range Extender	Batterie-E-Antrieb	BZ - E-Antrieb
Lastkraftwagen Kl. N	N1	<3,5t	75 - 150kW	2,5 - 3,5t	3t	100kW	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	N2	<12t	100 - 200kW	3,5 - 12t	9t	150kW	✓	✓	✓	✓				
	N3	>12t	150 - 500kW	12 - 40t	21t	250kW	✓			✓				
Sattelzugmaschinen	N3	>12t	250 - 500kW	12 - 40t	35t	300kW	✓			✓				

Tabelle 2-2: Fahrzeugklassen in der Österreichischen LKW-Flotte



2.2 Investitionskosten Antriebsysteme

In der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden sowohl Antriebssysteme untersucht die bereits am Markt erhältlich sind als auch solche die sich erst in der Forschungs- und Entwicklungsphase befinden. Um die Kapitalkosten letzterer zu ermitteln wurde eine Investitionskostenanalyse durchgeführt. Hierbei wurden die Kosten der Antriebsystems basierend auf den Kosten der Einzelkomponenten ermittelt. Dafür wurden folgende 6 Komponentengruppen definiert:

- **Basisfahrzeug:**

  Die Komponentengruppe Basisfahrzeug umfasst alle nicht antriebsrelevanten Komponenten des Fahrzeuges und ist somit für alle untersuchten Antriebsysteme gleich. Dazu gehören Fahrgestell (Rahmen, Federung, Räder, Reifen etc.) und Aufbauten (Kasten/Pritsche, Führerhaus etc.)

- **Verbrennungsmotor:**

Die Komponentengruppe Verbrennungsmotor umfasst Motor samt Anbauteilen und Getriebe.

- **Elektrische Antriebskomponenten:**
  In dieser Gruppe wurden alle elektrischen Antriebskomponenten sowie erforderliche Integrationsmaßnahmen am Triebstrang zusammengefasst. Dazu gehören elektrischen Maschinen, Motorsteuerung, Wandler und die erforderlichen Maßnahmen/Erweiterungen am Getriebe.
- **Batterien:**
  Diese Gruppe beinhaltet sowohl die Batterien zur Versorgung des Board-Netzes als auch ggf. Traktionsbatterien.
- **Tanksysteme:**
  In dieser Gruppe sind alle Kraftstofftanks für flüssige und gasförmige Kraftstoffe zusammengefasst.
- **Brennstoffzelle:**
  Unter dieser Gruppe ist das gesamte Brennstoffzellensystem zusammengefasst also die Brennstoffzelle inklusive aller erforderlichen Peripheriegeräte.

Die Kosten der Komponenten wurden aus Fachliteratur entnommen und durch eigene Annahmen ergänzt (vgl. [4] [5] [6]).

2.2.1 Investitionskosten 2010

Abbildung 2-1 zeigt die netto Investitionskosten für der Antriebsysteme in der Klasse N1. Es zeigt sich, dass die Kosten mit steigendem Grad der Elektrifizierung ansteigen. Kostentreiber sind hierbei hauptsächlich die Batteriesysteme. So liegen die Kosten des Plug-In Hybridfahrzeugs bereits 100 % über jenen des konventionellen Diesel-Fahrzeugs (CD Diesel). Aufgrund des geringen Reifegrads der Technologie und den entsprechend hohen System-Kosten liegen die Investitionskosten des Brennstoffzellenfahrzeugs noch um einen Faktor 6 höher. Für Hybridsysteme sind mit Mehrkosten zwischen 3800 € (Mild Hybrid) und 7600 € (Voll Hybrid)

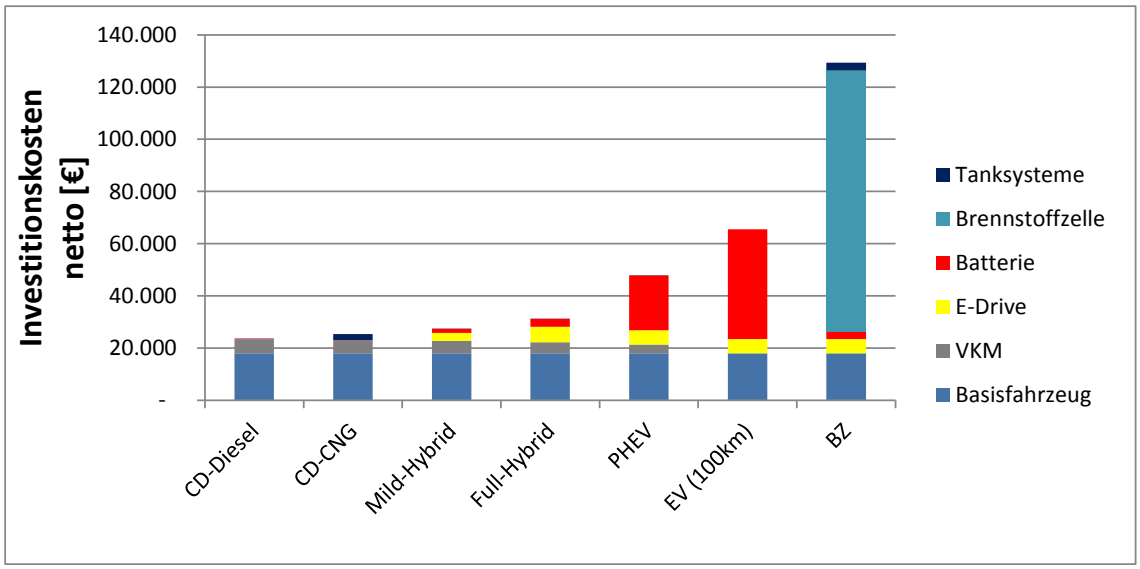


Abbildung 2-1: : Netto Investitionskosten Fahrzeugklasse N1 nach Komponenten – Stand 2010

Abbildung 2-2 zeigt den Vergleich des konventionellen Antriebsystems mit einem CNG Antrieb und dem Mild Hybrid System. Beim CNG Fahrzeug werden die höheren Kosten vor allem durch das Tanksystem verursacht. Beim Hybridantrieb verursachen die elektrischen Antriebskomponenten und die Traktionsbatterie Zusatzkosten in der Höhe von 12 600 €.

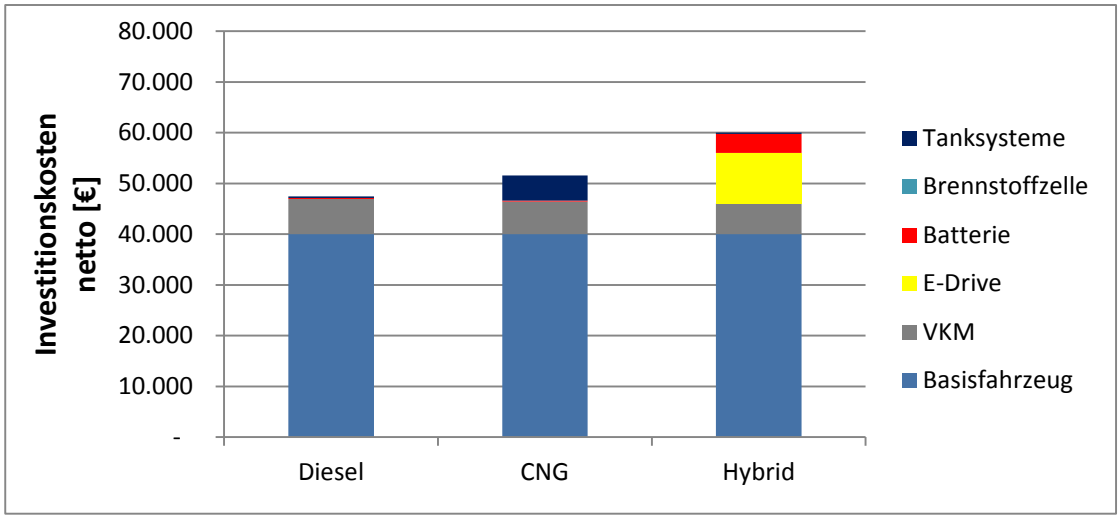


Abbildung 2-2: Netto Investitionskosten Fahrzeugklasse N2 nach Komponenten – Stand 2010

Die Investitionskosten der Fahrzeugkategorie N3 sowie der Sattelzüge ist in Abbildung 2-3 ersichtlich. In diesen Fahrzeugklassen verursacht die Hybridisierung Zusatzkosten von 22 500 € bis 26 400 €. Kostentreiber sind auch hier sind die elektrischen Antriebskomponenten und deren Integration in den Triebstrang sowie die Traktionsbatterien.

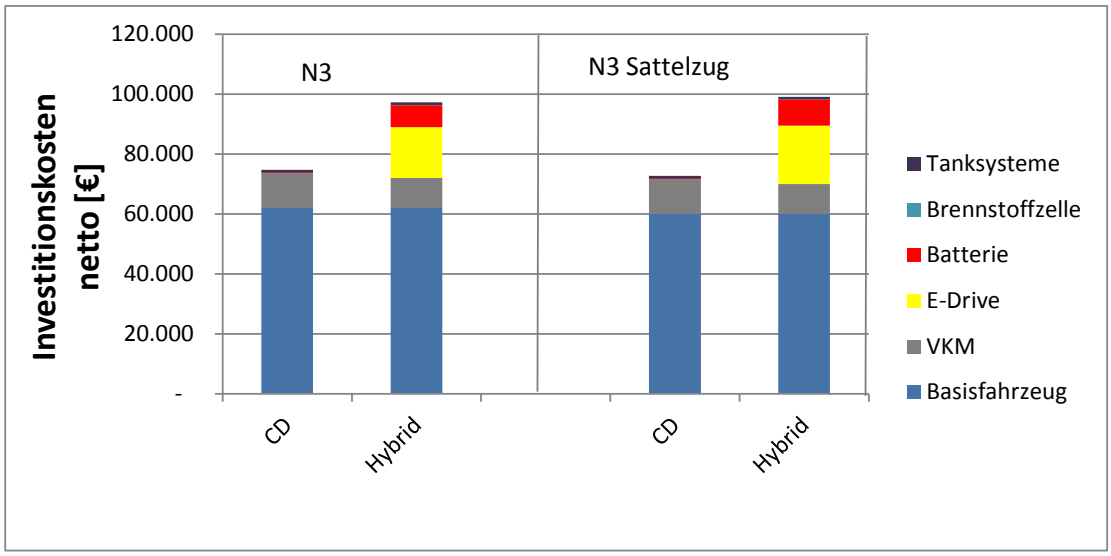


Abbildung 2-3: Netto Investitionskosten Fahrzeugklasse N3 und N3-Sattelzug nach Komponenten – Stand 2010

2.2.2 Modellierung der Dynamik der Investitionskosten 2010-2050

Die Entwicklung der Investitionskosten im Zeitraum 2010-2050 wurde anhand von Lerneffekten für die definierten Komponentengruppen abgeschätzt. In einem ersten Schritt wurden jene Komponenten identifiziert, bei denen noch deutlich Kostenreduktionen zu erwarten sind:

Basisfahrzeug: beim Basisfahrzeug wird davon ausgegangen, dass es zwar Kostenreduktionen durch Lerneffekt gibt. Diese werden aber durch zusätzliche Sicherheitsfunktionen und vor allem durch die Anwendung von Leichtbau kompensiert. Es wurde daher angenommen, dass sich diese Entwicklungen gegenseitig aufheben und es insgesamt zu keinen Kostenreduktionen kommt.

Verbrennungsmotor: Auch bei Verbrennungsmotoren wurde angenommen, dass es zu keinen Kostenreduktionen kommt. Auch hier sind zwar prinzipielle Lerneffekte zu erwarten. Diese werden aber durch steigende Anforderungen an die Motoren in punkto Effizienz und Reduktion von Schadstoffemissionen, die eine höhere Komplexität der Motoren erfordern, kompensiert.

Elektrische Antriebskomponenten: Hierbei handelt es ich prinzipiell ausgereifte Komponenten, die für andere Anwendungsgebiete schon lange in großer Stückzahl produziert werden. Es sind hier daher weder bei der Technologie an sich, noch bei der Produktion große Sprünge zu erwarten. Daher wurde auch hier angenommen, dass die Kosten über den Zeitraum 2010-2050 konstant bleiben.

Batterien: Batterien stellen zwar prinzipiell eine ausgereifte Technologie dar, da sie bereits seit Jahren für Mobiltelefone und Notebooks breite Anwendung finden. Für die speziellen Anforderungen, als Energiespeicher für Fahrzeugantriebe werden aber neue Zelltypen eingesetzt, die sich von den bisher verbreiteten Zellen unterscheiden. Die Massenherstellung dieser Zellen stellt dabei neue produktionstechnische Herausforderungen dar. Durch Verbesserungen in den Herstellungsverfahren, Massenfertigung und technologische

Entwicklungen lassen sich dadurch noch erhebliche Kostenreduktionen erzielen. Auch ist zu erwarten, dass sich im Zeitraum 2010-2050 die eingesetzten Batterietechnologien ändern werden. Bereits in der Vergangenheit wie innerhalb weniger Jahre eine Batterietechnologie durch ein neuere ersetzt wurde (z.B.: NiCd→NiMh→LiIon). In der Analyse werden daher nicht die Kosten für eine konkrete Batterietechnologie (z.B Li-Ion) herausgegriffen und untersucht, sondern es Traktionsbatterien für KFZ wurden als eine Technologie betrachtet, deren Kosten über die Methode des technologischen Lernens abgeschätzt wurde (siehe [7]).

Brennstoffzellensysteme: Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen haben ein hohes Kosteneinsparungspotential. Bisher wurde die Technologie nur in Versuchsfahrzeugen bei sehr kleinen Stückzahlen eingesetzt. Erfahrungen mit der Produktion in Großserie gibt es daher sowohl für die Zelle als auch für den Wasserstoff Drucktank kaum. Da die Versuchsfahrzeuge und die Kleinserien unter hohem Einsatz von Handarbeit hergestellt werden sind deren Kosten heute (bzw. 2010) noch extrem hoch. Durch Massenproduktion können aber hier langfristig große Kostenreduktionen erzielt werden. Um diese Reduktionen abzuschätzen wurde auch hier das Konzept des technologischen Lernens angewandt (siehe [7]).

2.2.3 Investitionskosten 2030

Aus den Lerneffekten der Komponentengruppen wurde die Kostenreduktion im Zeitraum 2010 – 2050 ermittelt. Abbildung 2-4, Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6 zeigen die Investitionskosten der Antriebsysteme in den Fahrzeugklassen N1, N2 und N3 im Jahr 2030. Allgemein lässt sich sagen, dass die Mehrkosten durch Elektrifizierung zurückgehen. Dies ist vor allem auf die Reduktion der Batteriekosten zurückzuführen. Auch bei der Integration der elektrischen Maschinen in den Antriebstrang sind bei steigenden Stückzahlen Kostenreduktionen zu erwarten.

Deutliche Kostenreduktionen werden auch bei Brennstoffzellen erwartet. Die Entwicklung ist jedoch aus den oben angeführten Gründen hier deutlich schwieriger abzuschätzen und bringt daher höhere Unsicherheiten mit sich.

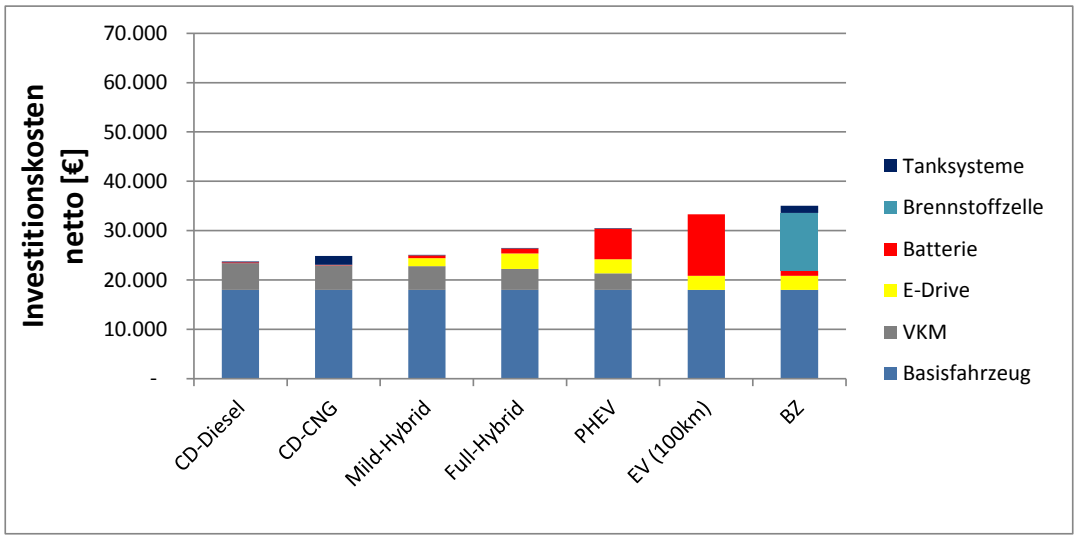


Abbildung 2-4: Netto Investitionskosten Fahrzeugklasse N1 nach Komponenten – Stand 2030

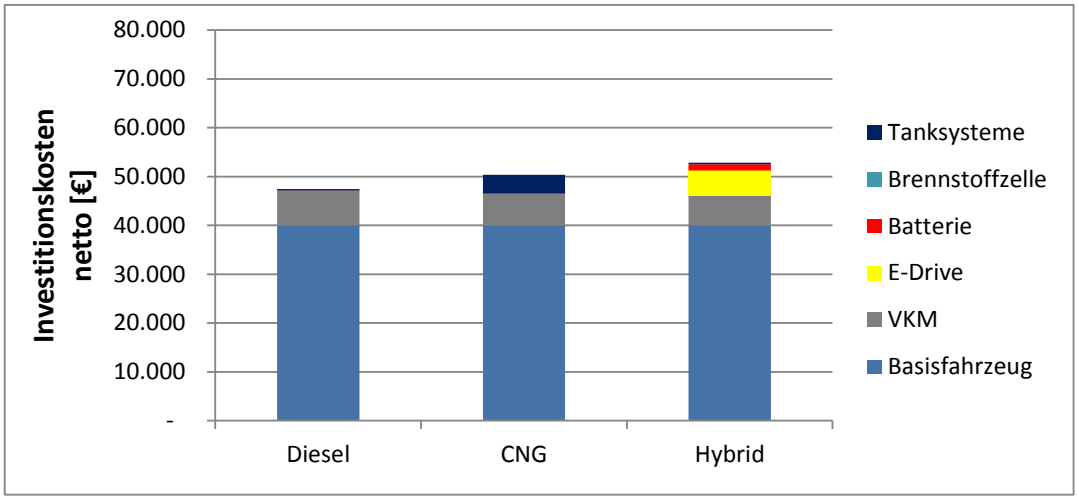


Abbildung 2-5: Netto Investitionskosten Fahrzeugklasse N2 nach Komponenten – Stand 2030

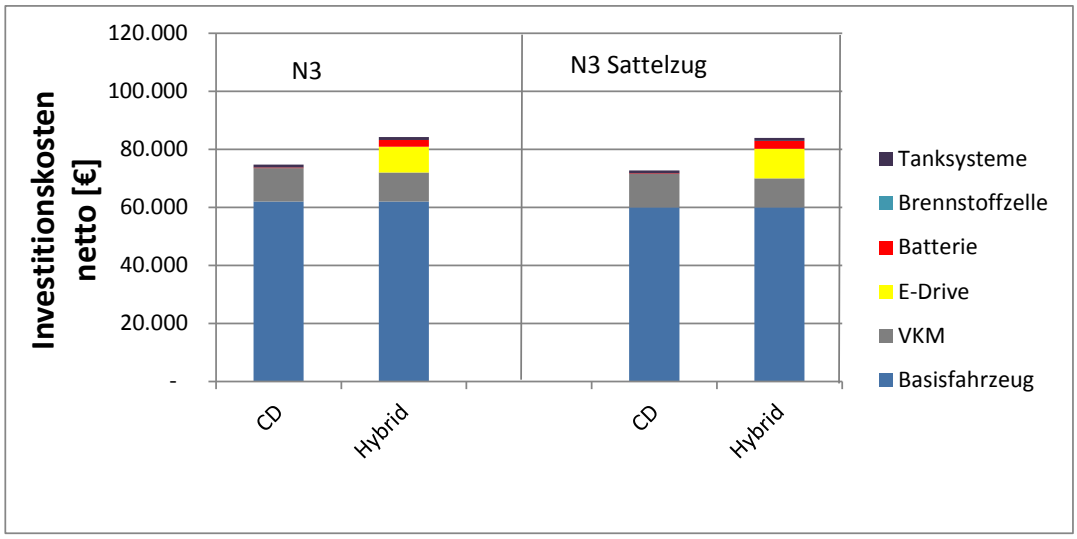


Abbildung 2-6: Netto Investitionskosten Fahrzeugklasse N3 und N3-Sattelzug nach Komponenten – Stand 2030

2.3 Kraftstoffkosten

Die Kraftstoffkosten werden durch die Kraftstoffverbrauche und die Kraftstoffpreise bestimmt. Die Verbräuche der Antriebsysteme 2010-2050 wurden in der technischen Analyse durch den Projektpartner AVL List ermittelt (Details siehe [7]). Für die Kraftstoffpreise wurden Preisszenarien 2010-2050 herangezogen. Hierbei wird von einem Anstieg des Rohölpreises auf 150 $/bbl bis zum Jahr 2020 ausgegangen und von einem weiteren Anstieg auf 220 $/bbl bis 2050. Aus diesem Rohölpreis wurden die Entwicklungen der Bruttopreise der Energieträger Diesel, Erdgas (CNG) und Storm abgeleitet (sieh Abbildung 2-7). Es ist ersichtlich, dass die Preise der Energieträger in unterschiedlichem Ausmaß von der Rohölpreisentwicklung beeinflusst sind. So Preisansteige beim Strompreis aufgrund der stärkeren Diversifizierung der Bezugsquellen moderater als bei den konventionellen Kraftstoffen Benzin und Diesel. Bei Diesel und Benzin sind auch noch die Mineralölsteuer und die Mehrwertsteuer enthalten. Eine Änderung der Mineralölsteuer im Vergleich zum Status Quo 2010 wurde hierbei nicht explizit angenommen. Nach dem Szenario kommt es zu einem Anstieg des Dieselpreises auf 1,7€/l bis 2020 und auf 2,2€/l bis 2050.

Tabelle 2-3: Kraftstoffverbrauch der Antriebsysteme in der Fahrzeugklassen (Daten-Quelle: AVL –List)

N1					
Kraftstoff	Diesel	CNG	Strom	Benzin	H2
Antrieb	[l/100km]	[kg/100km]	[kWh/100km]	[l/100km]	[kg/100km]
Konventionell	12,6	11,20			
Micro Hybrid	12,4				
Mild Hybrid	11,6				
Voll Hybrid	10,2				
Plug-In	1,2		38,5	1,5	
Elektrofahrzeug			46,1		
BZ Fahrzeug					1,80

	N2	
Kraftstoff	Diesel	CNG
Antrieb	[l/100km]	[kg/100km]
Konventionell	12,6	11,20
Micro Hybrid	12,4	
Mild Hybrid	11,6	

	N3	**N3-Sattelzug**
Kraftstoff	Diesel	Diesel
Antrieb	[l/100km]	[l/100km]
Konventionell	31,56	34,28
Hybrid	26,99	30,00

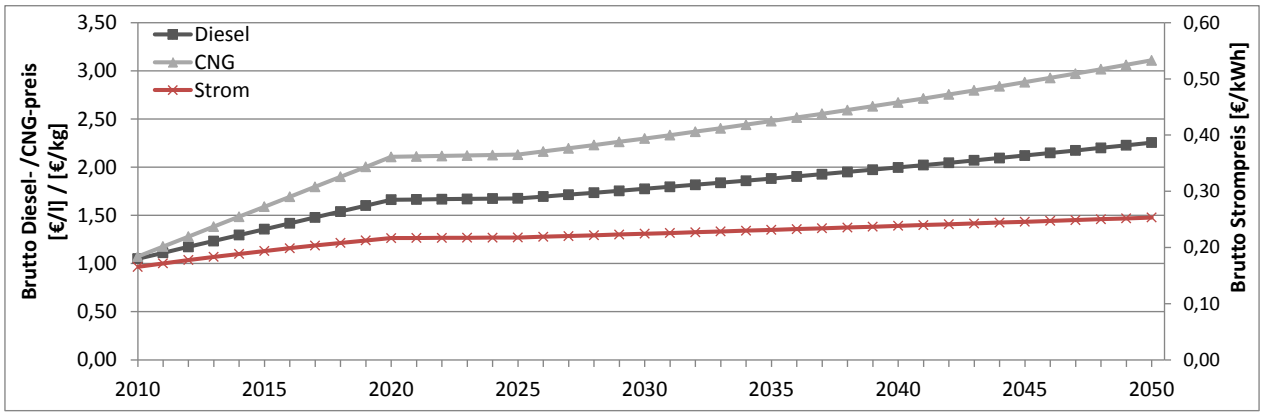


Abbildung 2-7: Angenommene Entwicklung der Brutto-Preise von Diesel, CNG und Strom

2.4 Gesamtkosten 2010

Um die Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe zu untersuchen wurde ein Kostenvergleich aller Systeme durchgeführt. Um die technologie-spezifischen Unterschiede der Antriebsysteme klar darzustellen wurden hierbei nur die Kapital- und Kraftstoffkosten berücksichtigt. Die angenommene Nutzungsdauer findet sich in Tabelle 2-4. Bei der Berechnung wurde ein Zinssatz von 5 %agnenmommen. Die Kosten wurden dabei bezogen auf den gefahrenen Kilometer berechnet:

$$CC = IK \cdot \alpha \quad \textbf{[€/Jahr]} \qquad \textbf{(2-1)}$$

$$CC_{Bat} = IK_{Bat} \cdot \alpha_{Bat} \cdot (1 - \frac{DT_{Bat}}{DT}) \quad \textbf{[€/Jahr]} \quad \textbf{(2-2)}$$

$$FC = EC \cdot FP \quad \textbf{[€/km]} \quad \textbf{(2-3)}$$

$$SC = \frac{CC + CC_{Bat}}{D} + FC \quad \textbf{[€/km]} \quad \textbf{(2-4)}$$

SC … Spezifische Kosten [€/km]

IK … Investitionskosten Fahrzeug [€]

IK_{Bat} … Investitionskosten Ersatzbatterie [€]

CC … Kapitalkosten Fahrzeug [€/Jahr]

CC_{Bat} … Kapitalkosten Ersatzbatterien [€/Jahr]

α … Annuitätenfaktor Fahrzeug

$α_{Bat}$ … Annuitätenfaktor Ersatzbatterien

r … Zinssatz [%]

DT … Nutzungsdauer Fahrzeug [Jahre]

D … jährliche Fahrleistung [km/Jahr]

FC … Kraftstoffkosten

FP … Kraftstoffpreis [€ / l]

EC … Spezifischer Kraftstoffverbrauch [l / km]

Tabelle 2-4: Nutzerkategorien

	Nutzungs-dauer	Fahr-leistung
	[Jahre]	[km/Jahr]
N1	10	20.000
	5	40.000
N2	8	25.000
	4	50.000
N3	6	50.000
	4	100.000
N3-S	4	150.000

Da es bei heutigen Batterietechnologien fraglich ist ob sie die angenommenen Nutzungszeiträume überstehen können wurden zusätzlich auch die Kosten die durch einen Batterietausch entstehen ausgewiesen. Wie die folgenden Kostendarstellung verdeutlichten kann Batterietauch erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Antriebsysteme haben. Spezielle bei vollelektrischen Antriebsystemen in der Klasse N1 wirken sie sich stark auf die Gesamtkosten aus. Hier liegen die Batteriekosten auch ohne der Annahme einer Batterietauschs deutlich über jenen konventioneller Antriebe (siehe Abbildung 2-8**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Unter den Hybridsystemen ist nur der

Micro-Hybrid bei den angenommenen Rahmenbedingungen rentabel. Mild- und Voll-Hybride haben deutlich höherer Kosten. Hinzu kommt auch bei Hybridantrieben die Unsicherheit ob die Batterie die Nutzungsdauer übersteht oder ob zusätzliche Kosten für den Tausch eingerechnet werden müssen. Bei höheren Fahrleistungen verbessert sich die Wirtschaftlichkeit elektrischer Antriebsysteme, konventionelle Systeme bleiben jedoch auch hier die wirtschaftlichste Option. Bei Hybridantrieben wird bei der Frage der Wirtschaftlichkeit auch die Frage des Einsatzgebietes eine wichtige Rolle spielen, da sie vor allem im urbanen Stop-and-Go Betrieb ihre Stärken ausspielen können.

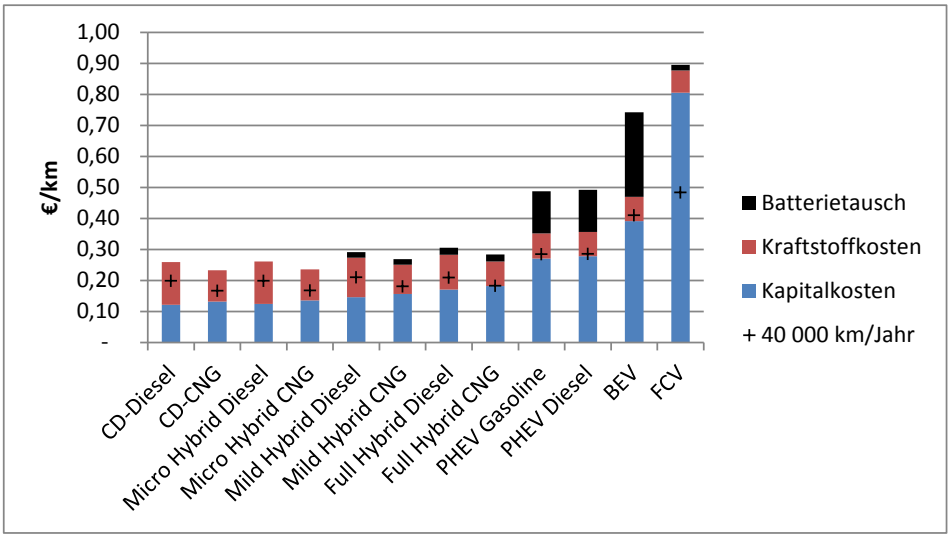


Abbildung 2-8: Investitions- und Kraftstoffkosten in der Fahrzeugklasse N1 – 20 000 km/Jahr

Auch in der Fahrzeugklasse N2 sind höhere Grade der Hybridisierung bei den Rahmenbedingungen von 2010 wirtschaftlich nicht vertretbar. Hier sind nur Micro-Hybride wirtschaftlich konkurrenzfähig.

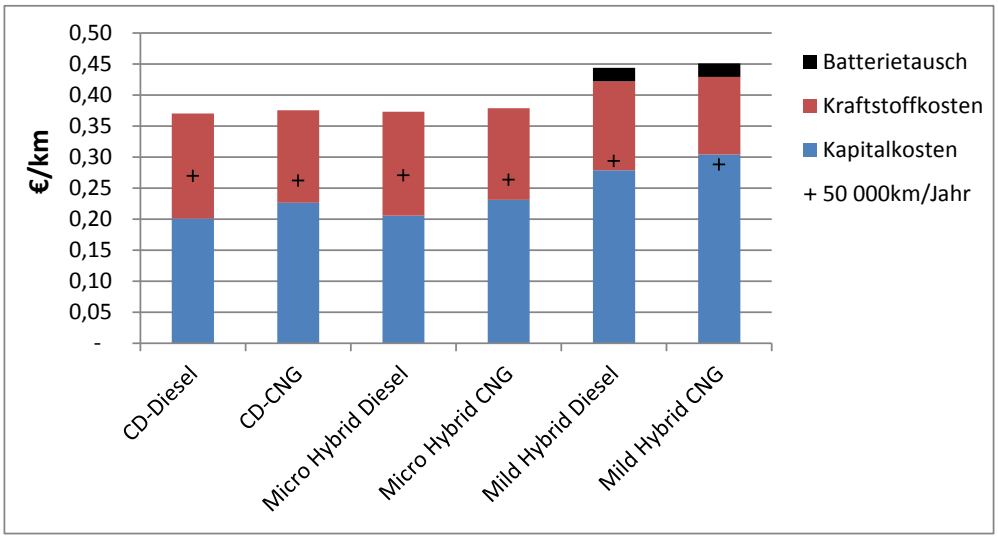


Abbildung 2-9: Investitions- und Kraftstoffkosten in der Fahrzeugklasse N2 – 25 000 km/Jahr

In der Klasse N3 liegen die Gesamtkosten von Hybridantriebe bereits bei den Rahmenbedingungen von 2010 im Bereich konventioneller Antriebe. Welche Technologie tatsächlich vorteilhaft ist hängt hier im Wesentlichen von den jährlichen Fahrleistungen und der Frage des Batterietauschs ab (siehe Abbildung 2-10). Gleiches gilt für die Sattelzugfahrzeuge in der Klasse N3. Ohne Batterietauschs liegen die Kosten hier in etwa gleichauf (siehe Abbildung 2-11).

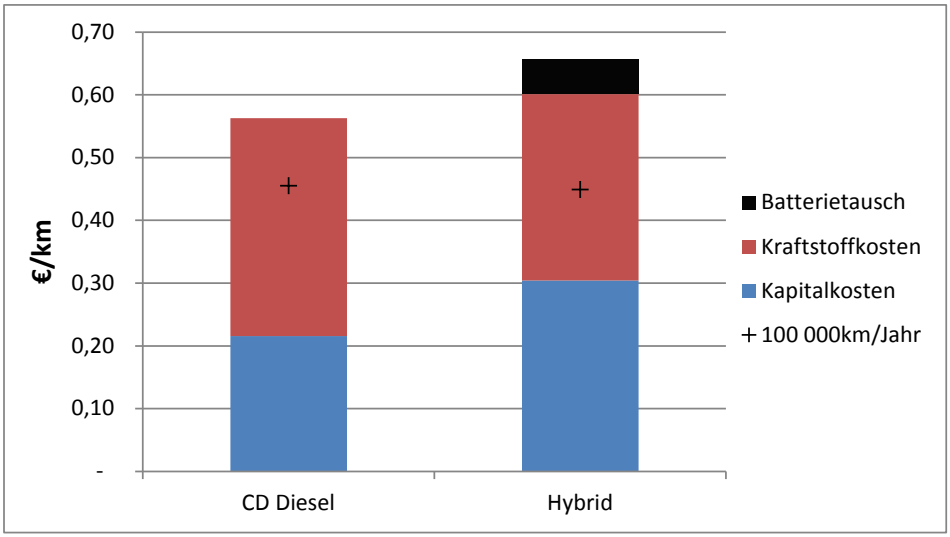


Abbildung 2-10: Gesamtkosten in der Fahrzeugklasse N3 – 50 000 km / Jahr

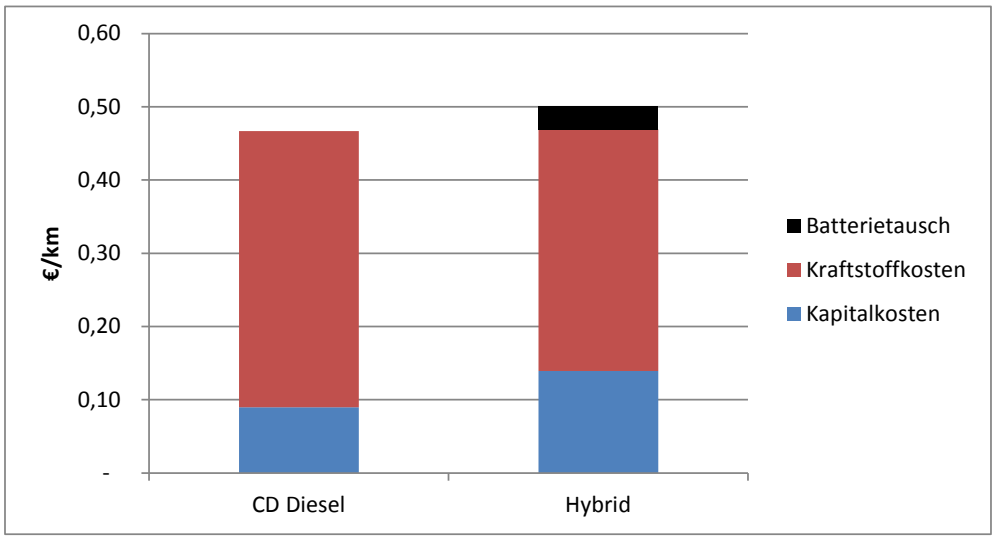


Abbildung 2-11: Gesamtkosten in der Fahrzeugklasse N3-Sattelzug – 150 000 km / Jahr

2.4.1 Entwicklung der Gesamtkosten 2010-2050

Aus den Annahmen bezüglich Investitionskosten, Kraftstoffverbrauch und Kraftstoffpreise wurden Gesamtkosten für den Zeitraum 2010-2050 ermittelt.

Abbildung 2-12 zeigt die Kostenentwicklung in der Fahrzeugklasse N1. Bei den angenommenen Rahmenbedingungen haben konventionelle Antriebsysteme bzw. Micro Hybride bis etwa 2015 geringere Kosten als komplexe Mild- oder Vollhybride. CNG Fahrzeuge liegen in den Kosten noch einmal deutlich unter Dieselfahrzeugen. Hier bleibt jedoch die Unsicherheit, ob CNG in diesem Zeitraum weiterhin von der Mineralölsteuer befreit bleibt. Ab etwa 2020 haben in diesem Szenario Plug-In Hybridantriebe die geringsten Kosten. Bei diesen Antrieben und noch mehr bei rein batterieelektrischen Antrieben bleibt jedoch der Nachteil der geringeren elektrischen Reichweite und der damit eingeschränkten Flexibilität. Diese ist in den kilometerbezogenen Kosten nicht abgebildet, würde in der Praxis aber sicherlich auch ein wirtschaftliches Entscheidungskriterium darstellen. Eine weitere Unsicherheit stellt die Batterielebensdauer dar. In der hier angeführten Kostenentwicklung wurde kein Batteriewechsel berücksichtigt. Die spezifischen Kosten von Brennstoffzellenfahrzeugen liegen langfristig im Bereich von Batteriefahrzeugen und Plug-Ins, sie bieten aber in Bezug auf Reichweite und Betankungszeit Vorteile womit sich weniger Einschränkungen in der Flexibilität ergeben.

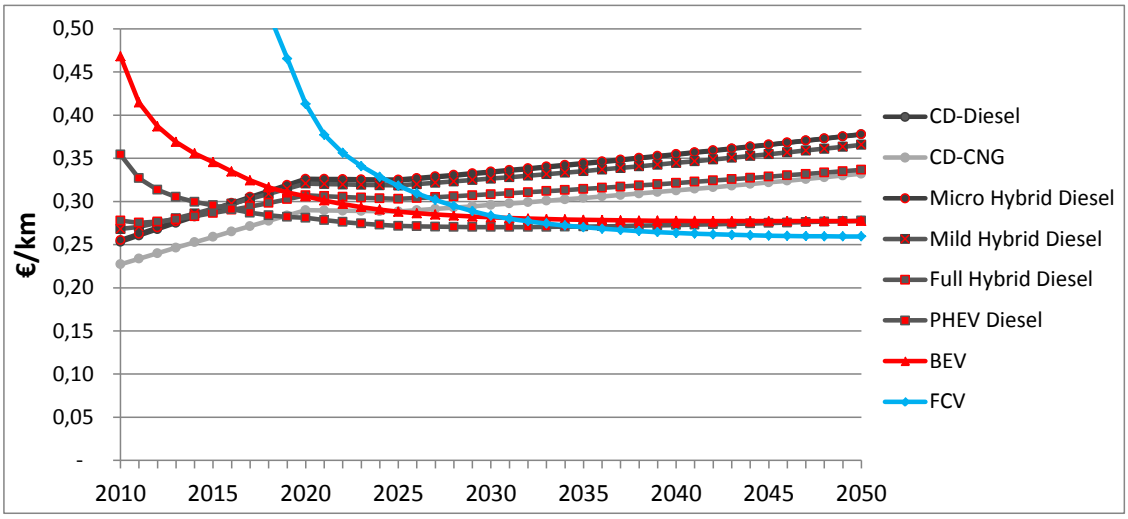


Abbildung 2-12: Kostenentwicklung der Antriebsysteme in der Fahrzeugklasse N1 – 20 000 km/Jahr

Abbildung 2-13 zeigt die Kostenentwicklung der Fahrzeugklasse N2 bei einer jährlichen Laufleistung von 25 000 km. Hybridantriebe werden hierbei ab etwa 2020 wirtschaftlich. Bis dahin sind nur Micro Hybride als Alternative zu den konventionellen Systemen interessant. CNG Antriebe bringen in dieser Fahrzeugklasse bei der angenommenen Laufleistung trotz Befreiung von der Mineralölsteuer kaum Vorteile.

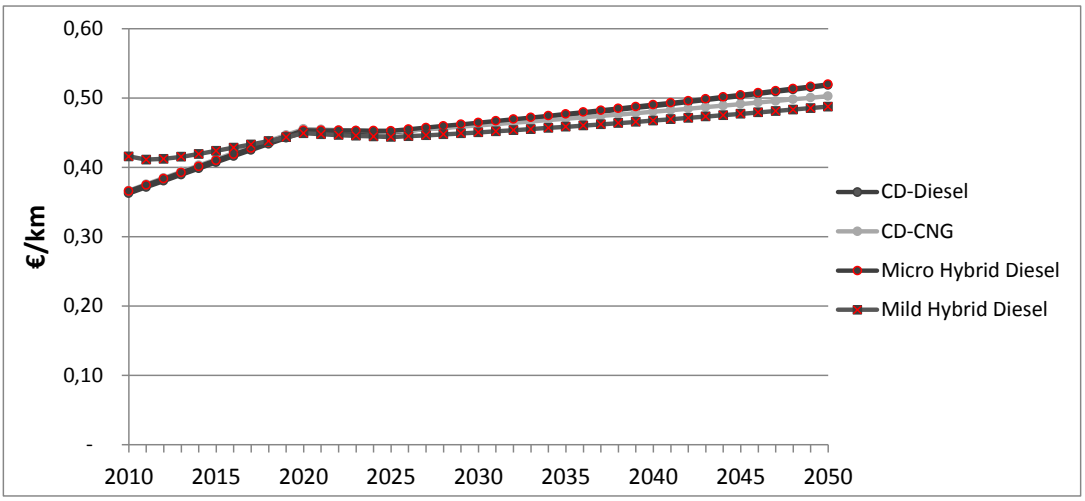


Abbildung 2-13: Kostenentwicklung der Antriebsysteme in der Fahrzeugklasse N2 – 25 000 km/Jahr

In der Fahrzeugklasse N3 ergeben sich bereits ab etwa 2015 deutliche Kostenvorteile für Hybridantriebe (Laufleistung: 50 000 km/Jahr). Bei Sattelzügen der Klasse N3 mit hoher Laufleistung (150 000 km/Jahr) liegen Hybridsysteme bereits beim Kraftstoffkostenniveau von 2010 gleichauf mit konventionellen Antrieben. In den Folgejahren ergibt sich dann ein kontinuierlich steigender Kostenvorteil.

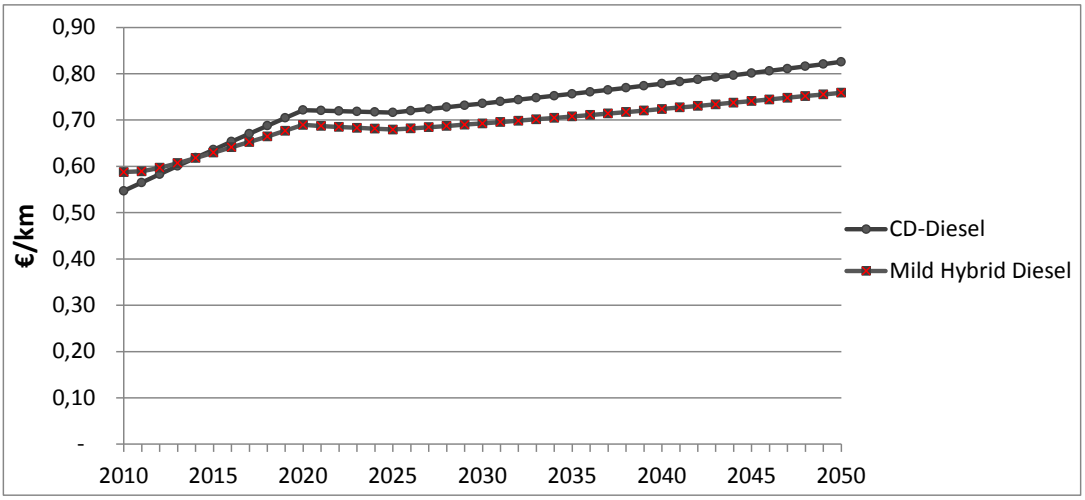


Abbildung 2-14: Kostenentwicklung der Antriebsysteme in der Fahrzeugklasse N3 – 50 000 km/Jahr

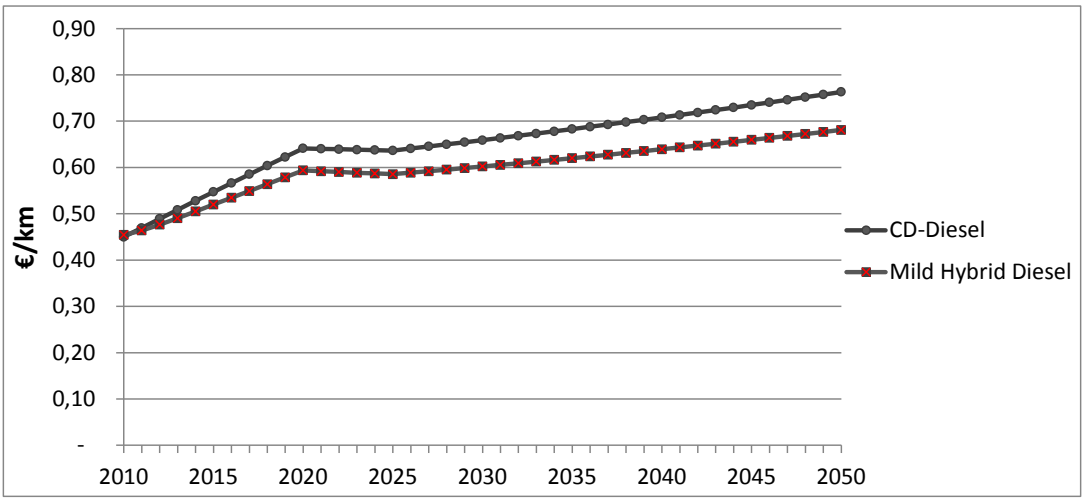


Abbildung 2-15: Kostenentwicklung der Antriebsysteme in der Fahrzeugklasse N3 Sattelzugmaschine – 150 000 km/Jahr

3 Szenario Modell der Österreichischen LKW Flotte

Um die Auswirkungen einer Verbreitung alternativer Antriebsysteme auf den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs zu untersuchen wurden ein Modell des Österreichischen LKW Flotte erstellt. Anhand des Modells lassen sich die Auswirkungen sich ändernder Rahmenbedingungen simulieren. Hierzu gehören neben der Verfügbarkeit neuer Antriebstechnologien auch Veränderungen in den Kraftstoffkosten. Diese könne durch Schwankungen der Preise fossiler Energieträger, aber auch durch fiskalische Maßnahmen herbeigeführt sein. Im Modell sind die wesentlichen Rahmenbedingungen erfasst, die sich auf die Transportdienstleistung der Fahrzeuge auswirken.

3.1.1 Methodik:

Abbildung 3-1 zeigt den Aufbau des Modells. Es ist im Wesentlichen in 4 Module gegliedert:

Modul 1 Fahrzeugtechnologiemodell: Hier werden die Kosten der Fahrzeuge mit verschiedenen Antriebstechnologien ermittelt. Die Entwicklung der Kosten im Zeitraum 2010-2050 wird anhand von Lerneffekten abgeschätzt.

Modul 2 spezifische Transportkosten & Markteinteile der Technologien: Hier werden die Gesamttransportkosten der Antriebsysteme unter Berücksichtigung der sämtlicher relevanter Kostenarten ermittelt. Basierend auf diesen Kosten werden die Marktanteile anhand eines Logit-Modells ermittelt. Hierbei wurden alle in der Studie untersuchten Antriebsysteme berücksichtigt.

Modul 3 Transportnachfrage: In diesem Modul lässt sich die Nachfrage nach Straßengüterverkehr ermittelt die sich auf die Größe der Flotte, die jährliche Laufleistung der Fahrzeuge und die Verteilung der Fahrzeugklassen auswirkt. (Da in der vorliegenden Untersuchung die Wirkung alternativer Antriebsysteme im Mittelpunkt steht wurde von einer konstanten Transportnachfrage ausgegangen)

Modul 4 Bottom-up-Flottenmodell: im Modell der Fahrzeugflotte ist der Fahrzeugbestand nach den 4 untersuchten Fahrzeugkategorien (N1, N2, N3 & N3-Sattelzug) aufgeschlüsselt. Um die Inhomogenität des Nutzerverhaltens zu erfassen sind in jeder Fahrzeugkategorie zwei Nutzergruppen definiert, die sich nach ihrer jährlichen Fahrleistung und folglich auch in der Fahrzeuglebensdauer unterscheiden. Die Altersstruktur Flotte ist anhand von Fahrzeug-„Sterbekurven" modelliert. Über den Fahrzeugbestand und dessen jährliche Fahrleistung werden der Energieverbrauch und die THG-Emissionen der Flotte ermittelt. Sowohl Energieverbrauch als auch THG-Emissionen sind über die gesamte Energieumwandlungskette (Well-to-Wheel WTW) erfasst.

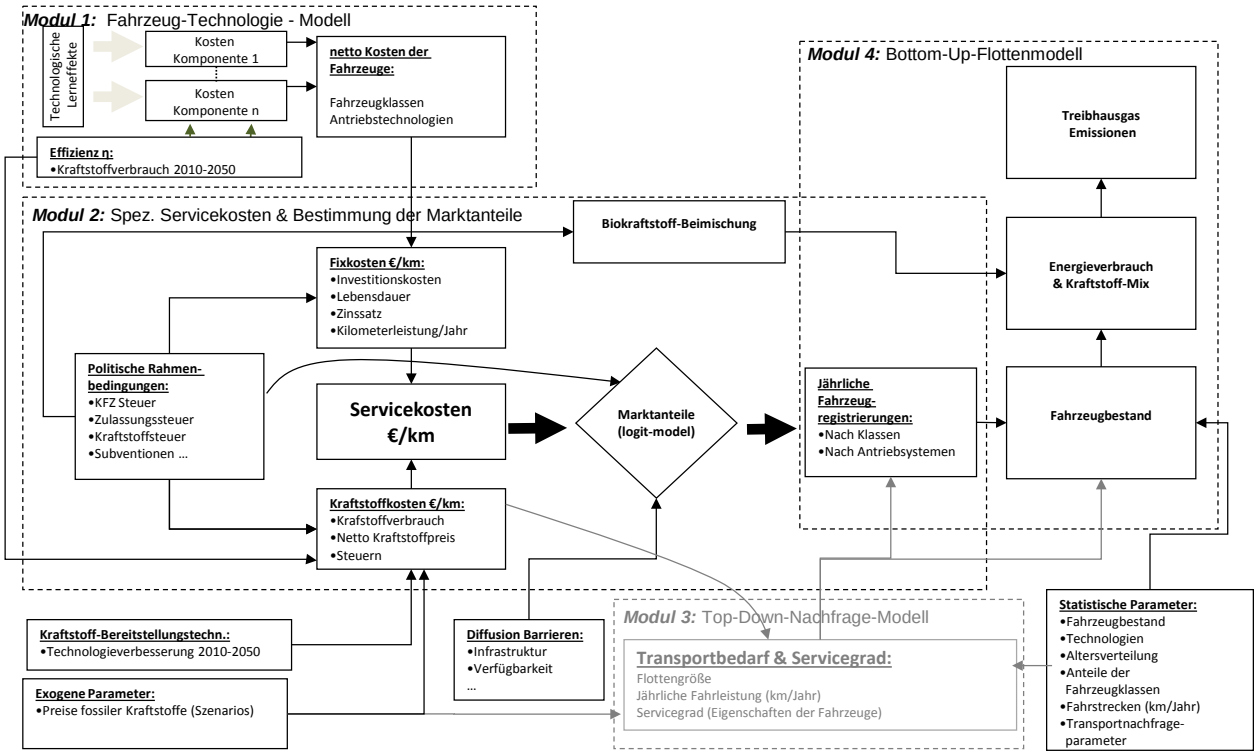


Abbildung 3-1: Schema des Modells

Eine detailliertere Beschreibung der Methodik des Modells findet sich im Anhang.

In diesem Kapitel soll untersucht werden welche Potentiale alternative Antriebsysteme zur Reduktion des Energieverbrauchs und der THG Emissionen im Straßengüterverkehr bieten. Welche Reduktionen sind möglich? Mit welchem Zeithorizont?

Um diese Fragen zu beantworten wurde das oben beschriebene Modell eingesetzt und ein Szenario für den Zeitraum 2010-2050 definiert in dem Annahmen hinsichtlich der Kraftstoffpreisentwicklung und der Kostenentwicklung der Antriebstechnologien getroffen wurden.

3.2 Szenario Annahmen

In dem Szenario wurde von der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Entwicklung der Investitionskosten der Antriebsysteme ausgegangen und einem Anstieg des Kraftstoffpreises wie in Abschnitt 2.3 beschrieben.

Außerdem wurden zwei Fälle mit unterschiedlichem Anteil erneuerbarer Energieträger im Kraftstoff-mix untersucht:

Kraftstoff-mix „fossil“ – hier wurde angenommen, dass die Beimischung von Biokraftstoffen zwar den EU-Vorgaben folgend von 5,75 % auf 8,5 % bis 2020 gesteigert wird, darüber hinaus jedoch nicht weiter erhöht wird. Auch bei Strom und Wasserstoff wurde angenommen, dass diese aus Erdgas, also aus fossilen Quellen erzeugt werden.

Kraftstoff-mix „erneuerbar“ – hier wurde angenommen, dass der Biokraftstoffanteil über das Jahr 2020 hinaus kontinuierlich bis zu einem Anteil von 30 % im Jahr 2050 erhöht wird. Weiters werden sowohl Strom als auch Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen erzeugt.

Tabelle 3-1: Biokraftstoff-Beimischung

	2010	2020	2030	2040	2050
Kraftstoff-mix "fossil"	5,75%	8,50%	8,50%	8,50%	8,50%
Kraftstoff-mix "erneuerbar"	5,75%	10%	20%	25%	30%

Bei den Biokraftstoffen wurde angenommen, dass es innerhalb des Szenario-Zeitraums zu einem Wechsel von Biokraftstoffen der ersten zur weiten Generation kommt und sich auch die Anteile der Rohstoffe dynamisch über den Zeitraum verändern. Gleiches gilt für den Strom-mix, in dem sich die Anteile der einzelnen Erzeugungstechnologien auch über den Zeitraum 2010-2050 ändern. Die genauen Annahmen bezüglich der Kraftstoff- und Rohstoffanteile finden sich im Anhang.

In den Szenarien wurde angenommen, dass das Transportaufkommen im Straßengüterverkehr konstant bleibt da sich so die Effekte der Technologien besser veranschaulichen lassen. Hier ist jedoch anzumerken, dass in den vergangenen Jahren ein starker Anstieg im Transportaufkommen auf der Straße verzeichnet wurde und hier auch keine echte Trendwende in Sicht ist. Andererseits können steigende Kraftstoffpreise zu einer stärkeren Verlagerung auf die Schiene führen. Die genaue Entwicklung ist jedoch auch von anderen Faktoren z.B. Infrastruktur und politischen Rahmenbedingungen abhängig. Eine genaue Behandlung dieser Frage ist jedoch nicht Gegenstand dieser Studie.

4 Ergebnisse

4.1 Flottendurchdringung

Die steigenden Kraftstoffpreise führen zu einer besseren Konkurrenzfähigkeit effizienter Antriebsysteme und einer somit zu deren stärkeren Verbreitung.

Generell ist aufgrund der trägen Flottenerneuerung in der Fahrzeugklasse N1 die Analyse eines längeren Zeithorizonts sinnvoll, da nur so die langfristigen Auswirkungen der Marktverbreitung der Technologien untersucht werden kann.

Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 zeigen die Anteile der Antriebsysteme an den Neuzulassungen bzw. an der Flotte für die in der Fahrzeugkategorie N1. Mittelfristig kommt es demnach zu einer starken Verbreitung von Hybridfahrzeugen, welche 2020 bereits mehr als 50 % der Neuzulassungen und 20 % der Flotte stellen (ohne Mikro-Hybride). Ab etwa 2020 nimmt auch der Anteil von Plug-In Hybriden und reine Elektrofahrzeugen zu. Langfristig (2030+) wird demnach die Fahrzeugflotte von diesen elektrischen Antriebsystemen dominiert. Bei der Entwicklung nach 2030 ergibt sich hier eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Technologien. Hier wird jedoch der nichtkostenspezifische, technologische Fortschritt bei den Speichertechnologien eine entscheidende Rolle spielen. Beim derzeitigen technologischen Stand der Batterietechnologie sind elektrische Antriebsysteme nur bedingt in der Lage die Anforderungen der Fahrzeuge in dieser Klasse in punkto Reichweite zu erfüllen. Brennstoffzellenfahrzeuge sind aus technischer Sicht besser geeignet (höhere Reichweite, schnelle Betankung), hier sind jedoch neben der erforderlichen Kostenreduktion auch noch technische Hürden zu bewältigen. Plug-In Hybride können jedoch schon jetzt als weitestgehend kompatibel mit den Anforderungen in der Fahrzeugklassen N1 betrachtet werden. Unter diesen Gesichtspunkten ist auch die langfristige Entwicklung der Technologien nach 2030 zu betrachten.

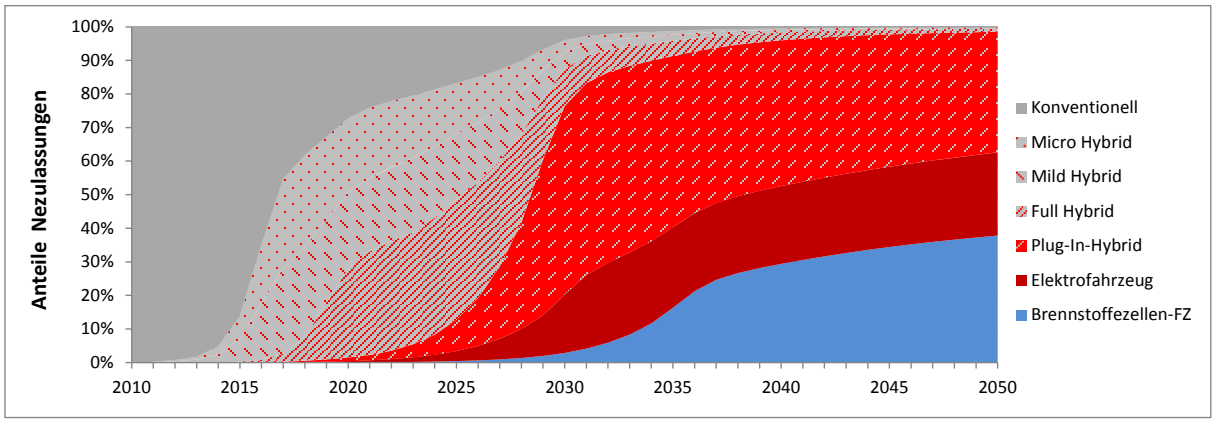


Abbildung 4-1: Anteile der Antriebstechnologien an den Neuzulassungen – Fahrzeugkategorie N1

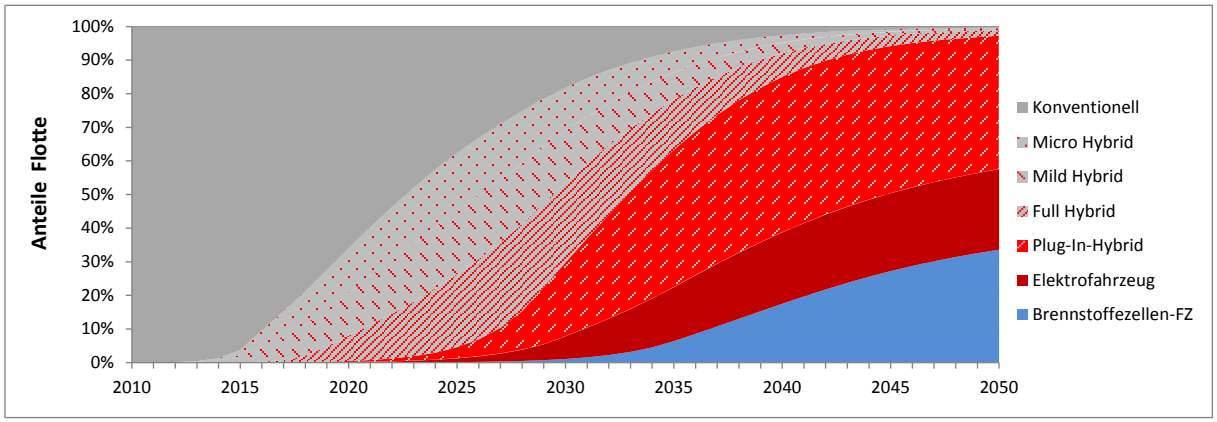


Abbildung 4-2: Anteile der Antriebsysteme in der Flotte – Fahrzeugkategorie N1

Abbildung 4-3 zeigt die Markt und Flottendurchdringung der Antriebsysteme in der Fahrzeugklasse N2 (<12t Gesamtgewicht). Bei den Neuzulassungen gewinnen ab etwa 2015 Micro Hybridantriebe stark an Bedeutung und auch Voll Hybride gewinnen an Marktanteilen. Diese Entwicklung führt dazu, dass diese Antriebsysteme 2020 jeweils etwa 1/3 der Neuzulassungen stellen. Wie an der Flottenentwicklung zu erkennen ist wirkt sich diese Entwicklung nur sehr langsam auf die Struktur der Flotte aus. Diese Träge Flottenentwicklung ist auf die lang Verweildauer der Fahrzeuge in der Flotte in dieser Fahrzeugkategorie zurückzuführen.

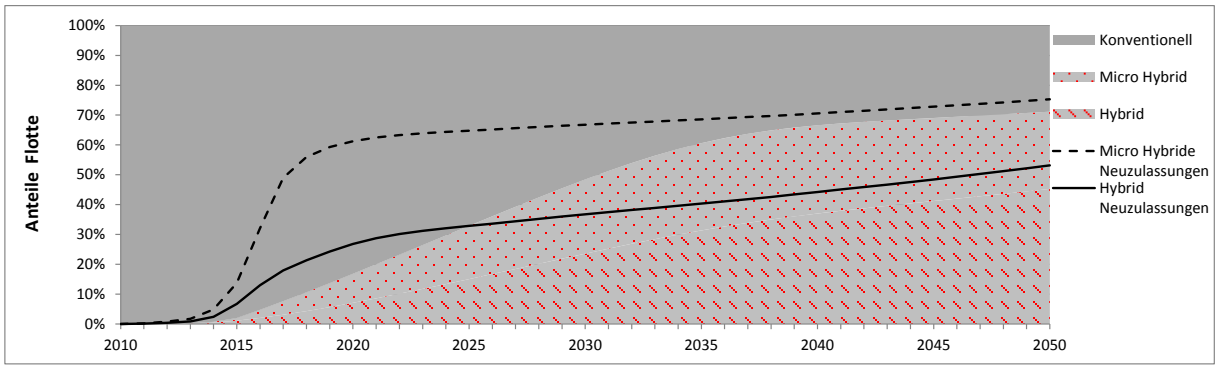


Abbildung 4-3: Anteile der Antriebsysteme an den Neuzulassungen und in der Flotte- Fahrzeugkategorie N2

Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 veranschaulichen die Anteile der Antriebsystemen an den Neuzulassungen und in der Flotte der Fahrzeugklassen N3 und N3-Sattelzug. In beiden Fahrzeugklassen kommt es ab etwa 2015 zu einer starken Verbreitung von Hybrid-Antriebsystemen bei den Neuzulassungen, die zu Marktanteilen von ≈60% bzw. ≈70% führen. Der Zeithorizont in dem sich diese Entwicklung in der Flotte wiederspiegelt ist in den beiden Fahrzeugsegmenten sehr unterschiedlich. Während sich die Flotte in der Fahrzeugklasse N3 nur sehr träge umstellt, kommt es bei den Sattelzugmaschinen zu einer raschen Umstellung der gesamten Flotte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Sattelzugmaschinen eine sehr hohe jährliche Laufleistung und daher eine kurze Nutzungsdauer haben.

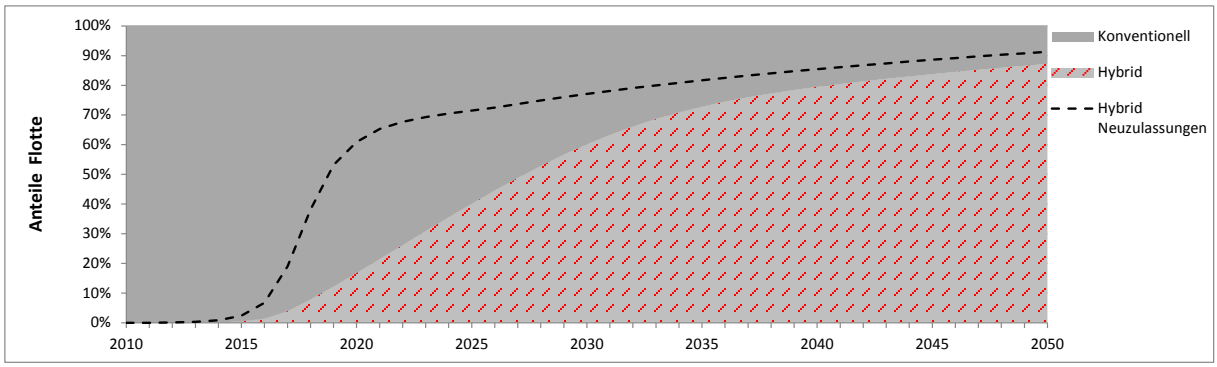


Abbildung 4-4: Anteile der Antriebsysteme an den Neuzulassungen und in der Flotte- Fahrzeugkategorie N3

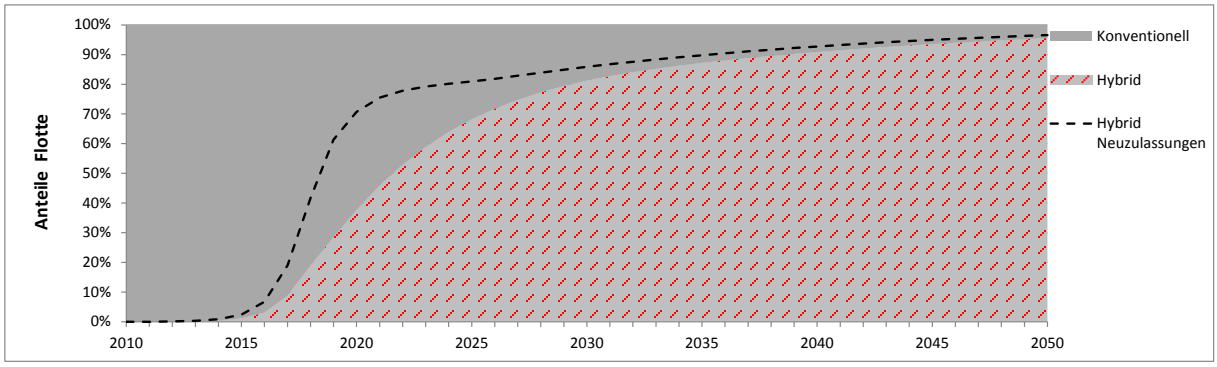


Abbildung 4-5: Anteile der Antriebsysteme an den Neuzulassungen und in der Flotte- Fahrzeugkategorie N3-Sattelzug

4.2 Energieverbrauch der Fahrzeugflotte

Der Energieverbrauch der Flotte wurde anhand der Bestandsdaten, der Laufleistung der Fahrzeuge und des Kraftstoffverbrauchs ermittelt. Dabei wurde zwischen Endenergieverbrauch unterschieden. Beim Endenergieverbrauch ist nur der Energiegehalt der getankten Kraftstoffe erfasst. Um den gesamten Energieverbrauch zu berücksichtigen ist jedoch auch die Vor-Kette, also die Bereitstellung des Kraftstoffes, zu erfassen. Dies ist speziell bei Biokraftstoffen sowie Strom und Wasserstoff relevant um den tatsächlichen Verbrauch korrekt abzubilden.

4.2.1 Endenergieverbrauch

Abbildung 4-6 zeigt den Endenergieverrauch der gesamten Fahrzeugflotte im Zeitraum 2010-2050 aufgeschlüsselt nach Fahrzeugkategorien. Es zeigt sich, dass etwa zwei Drittel des Endenergieverbrauchs von schweren Fahrzeugen der Klassen N3 und N3-Sattelzug verursacht werden und ein weiteres Drittel von der Fahrzeugklassen N1. Die Klasse N2 spielt beim Energieverbrauch aufgrund der geringen Zahl der Fahrzeuge und der relativ niedrigen jährlichen Laufleistung nur eine untergeordnete Rolle.

Die Verbreitung alternativer Antriebsysteme führt hierbei zu einer kontinuierlichen Reduktion des Energieverbrauchs. Bis 2020 lässt sich der Verbrauch um ≈10% gegenüber 2010

reduzieren und bis 2030 um weitere 10%. Langfristig ergibt sich bei der Fahrzeugklasse N1 das höchste Einsparpotential. Aufgrund des Anforderungsprofils und der typischen Einsatzgebiete ist ein Umstieg auf elektrische Antriebsysteme in der Klasse N1 möglich, während diese Option bei schweren Nutzfahrzeugen nicht zur Verfügung steht. Abbildung 4-7 zeigt den Endenergieverbrauch der gesamten Flotte aufgeschlüsselt nach Energieträgern. Es ist zu erkennen, dass Dieselkraftstoff auch langfristig der mit Abstand wichtigste Energieträger im Straßengüterverkehr bleibt. Alternative Energieträger wie Erdgas und Strom werden demnach gemessen am Gesamtverbrauch nur eine geringe Rolle spielen. Dies kommen vor allem in der Fahrzeugklasse N1 zum Einsatz (siehe Abbildung 4-8).

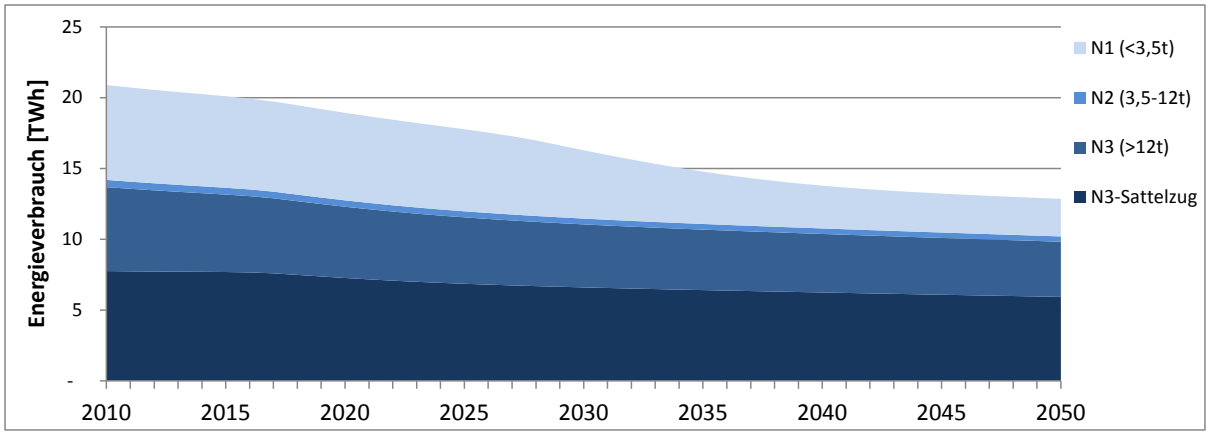


Abbildung 4-6: Endenergieverbrauch nach Fahrzeugklassen

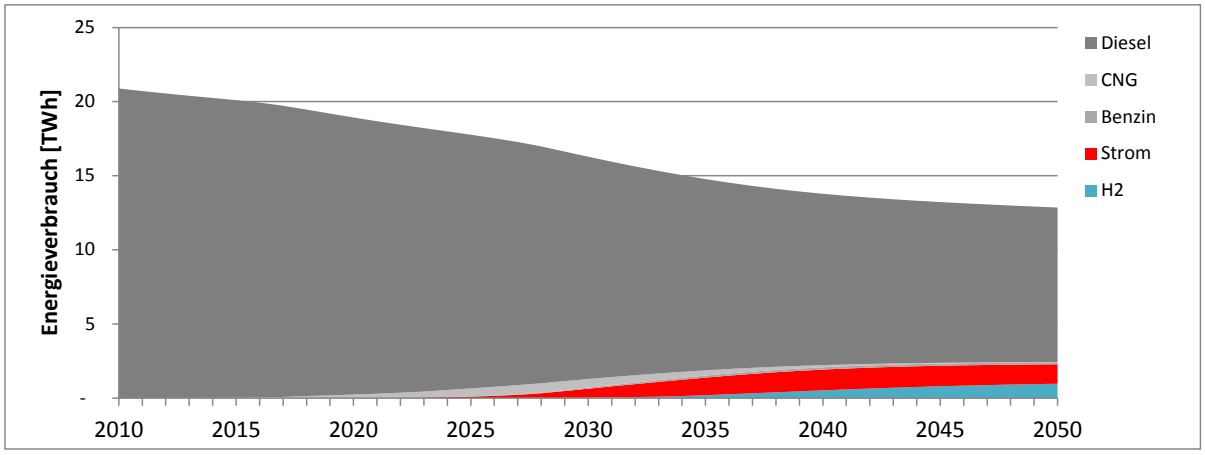


Abbildung 4-7: Endenergieverbrauch nach Energieträgern – gesamte LKW-Flotte

In der Fahrzeugklasse N1 spielt Strom aufgrund der starken Verbreitung elektrischer Antriebsysteme langfristig eine wichtige Rolle (siehe Abbildung 4-8). Auch Wasserstoff gewinnt hier an Bedeutung. Bei solchen Energieträgern ist der Endenergieverbrauch jedoch nur bedingt aussagekräftig, da hier ein wesentlicher Teil der Energiekette in der Bereitstellung des Kraftstoffs anfällt und somit nicht erfasst ist. Für eine korrekte Bewertung muss daher der kumulierte Energieverbrauch herangezogen werden.

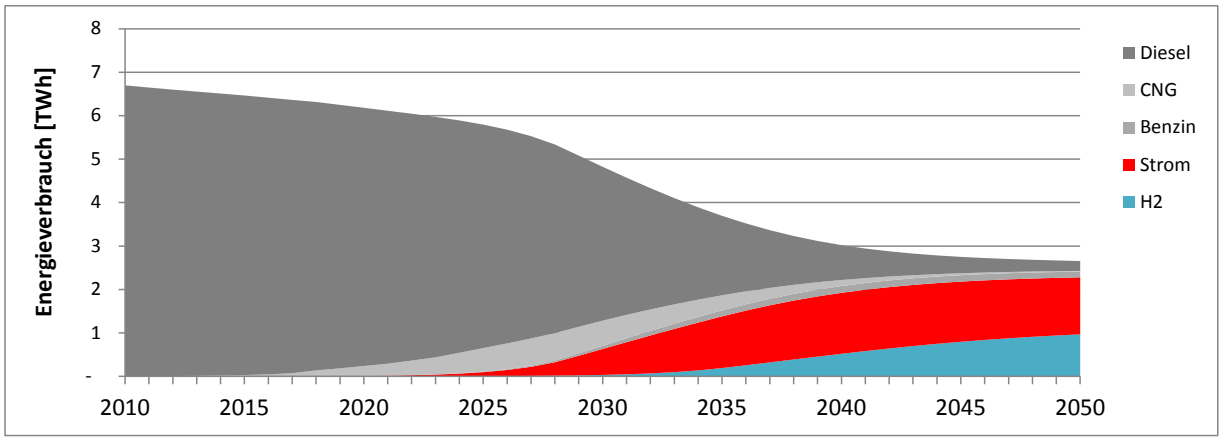


Abbildung 4-8: Endenergieverbrauch nach Energieträgern - Fahrzeugklasse N1

4.2.2 Kumulierter Energieverbrauch

Im kumulierten Energieverbrauch ist die gesamte Energieumwandlungskette berücksichtigt (well-to-wheel WTW). Das bedeute, dass neben dem Endenergieverbrauch auch die Erzeugung der Kraftstoffe, sowie die Herstellung der Fahrzeuge erfasst sind. Der kumulierte Energieverbrauch wurde dabei nach fossilen und erneuerbaren Anteilen aufgeschlüsselt. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben wurden in der Untersuchung zwei Kraftstoffszenarien unterschieden. Währen im Kraftstoffmix „fossil“ nur geringe Anteile an Biokraftstoffen angenommen wurden sowie Strom aus fossiler Erzeugung, wurde beim Kraftstoffmix „erneuerbar“ von deutlich höherer Kraftstoffbeimischung und erneuerbarem Strom ausgegangen. Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 zeigen den kumulierten Energieverbrauch für beide Szenarien. Im Kraftstoff-mix „erneuerbar“ kann durch die erhöhte Beimischung von Biokraftstoffen (bis 30%) der fossile Energieverbrauch um fast 60% reduziert werden.

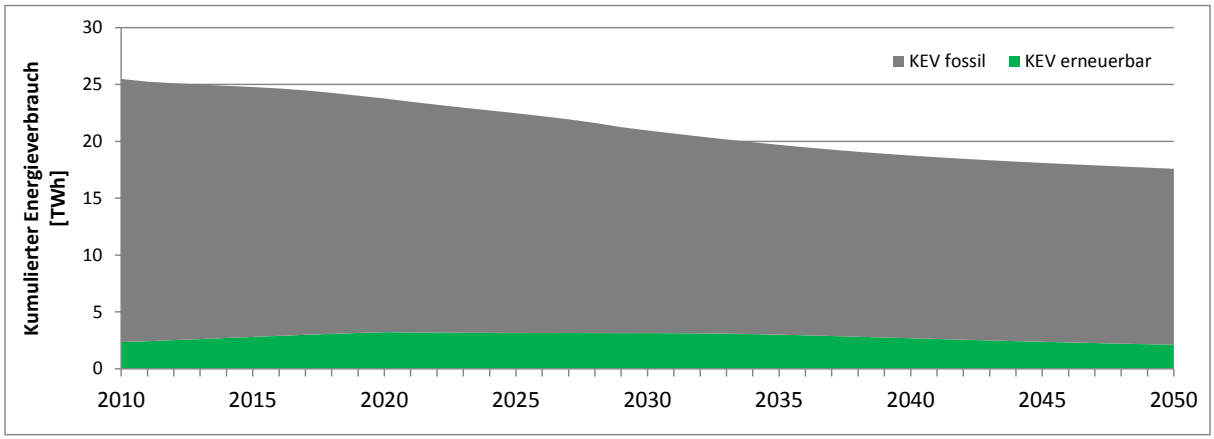


Abbildung 4-9: Kumulierter Energieverbrauch – Kraftstoff-mix „fossil“

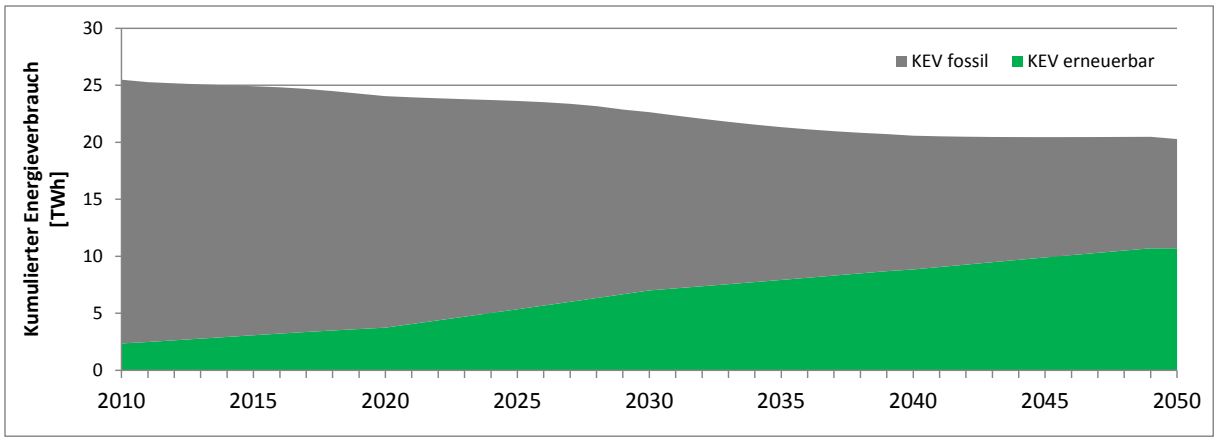


Abbildung 4-10: Kumulierter Energieverbrauch – Kraftstoff-mix „erneuerbar“

4.3 Treibhausgasemissionen der Flotte

Auch die Treibhausgasemissionen wurden über die gesamt Energieumwandlungskette (well-to-wheel WTW) erfasst. In den Ergebnissen sind die Emissionen nach den Abschnitten der Umwandlungsketten aufgeschlüsselt: die Bereitstellung der Kraftstoffe (well-to-tank WTT), die Umwandlung der Kraftstoffe in mechanische Energie in den Fahrzeugen (tank-to-wheel TTW), sowie die Herstellung der Fahrzeuge (auch TTW).

Abbildung 4-11 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen bei Annahme des Kraftstoffmix „fossil“. Es zeigt sich, dass die Emissionen durch die effizienteren Antriebsysteme deutlich reduziert werden können. Durch den steigenden Anteil von Strom als Energieträger kommt es zu einem Anstieg der Emissionen aus der Kraftstoffbereitstellung (WTT), was vor allem auf die Stromerzeugung zurückzuführen ist. Bei diesem Kraftstoff-mix können die Emissionen bis 2030 um knapp 22 %, bis 2050 sogar um bis zu 35 % reduziert werden. Im Kraftstoffszenario „erneuerbar“ können die Emissionen sogar um 55 % reduziert werden (siehe Abbildung 4-12).

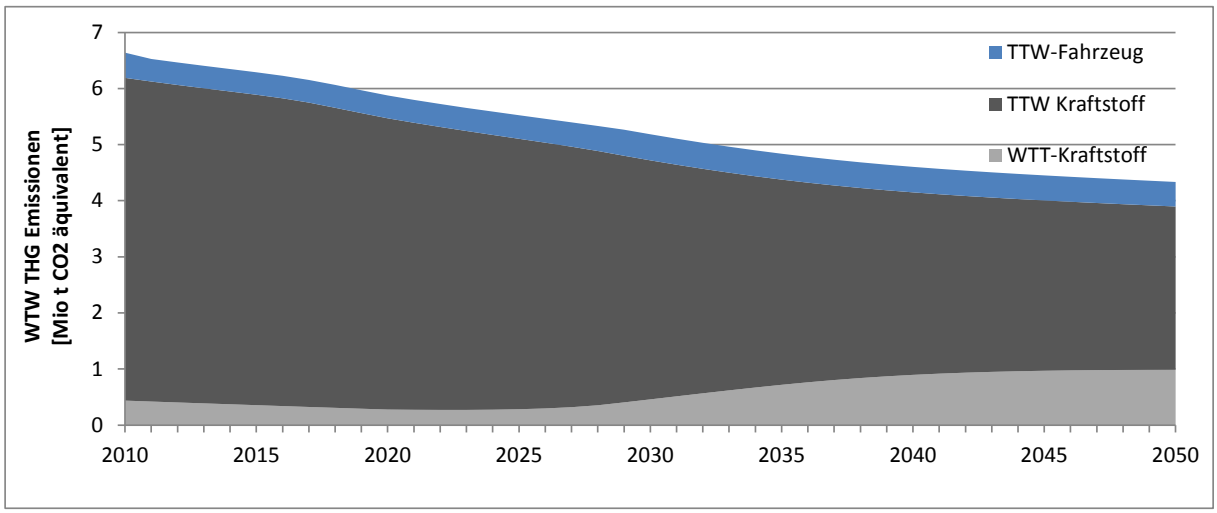


Abbildung 4-11: Well-to-Wheel (WTW) Treibhausgasemissionen – Kraftstoff-mix „fossil“

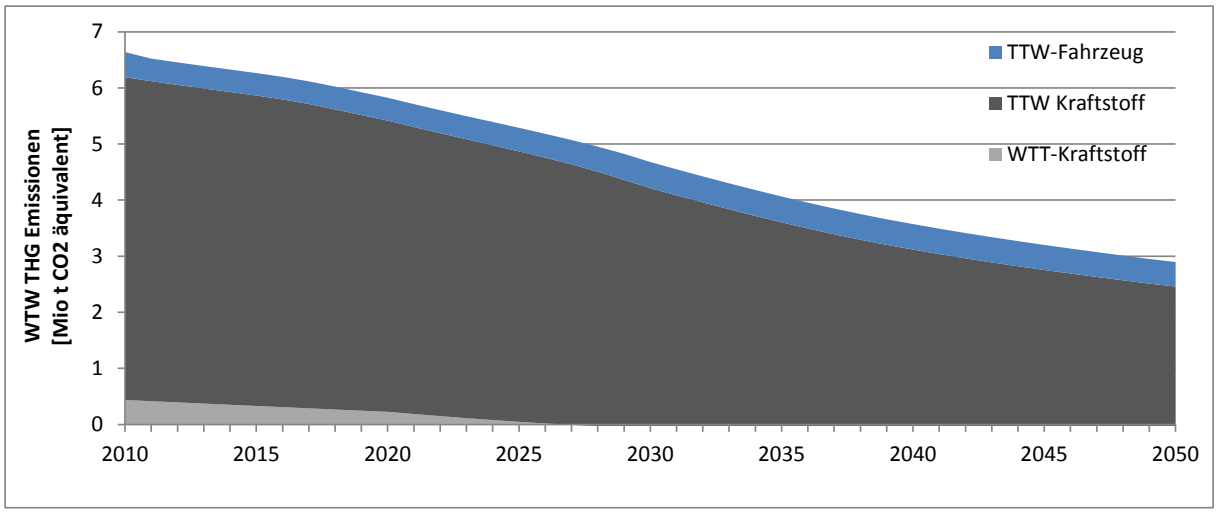


Abbildung 4-12: Well-to-Wheel (WTW) Treibhausgasemissionen – Kraftstoff-mix „erneuerbar“

5 Schlussfolgerung

5.1 Wirtschaftlichkeit der Antriebsysteme

Der Kostenvergleich der Antriebsystems zeigt, dass beim den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen von 2010, Hybridsysteme in keiner Fahrzeugkategorie wirtschaftlich konkurrenzfähig sind. In der Kategorie N3 und N3-Sattelzug liegen die Kosten jedoch auf gleicher Höhe oder knapp über jenen konventioneller Systeme, womit sich bei steigenden Kraftstoffpreisen ein klarer ökonomischer Vorteil ergeben würde. Ein kritischer Punkt ist in diesem Zusammenhang jedoch die Frage der Lebensdauer der Batterien. Ist innerhalb der Nutzungsdauer ein abnutzungsbedingter Tausch des Batteriesystems erforderlich verschlechtert dies die wirtschaftliche Bilanz von Hybridsystemen empfindlich.

Die Szenarien der Kostenentwicklung zeigen, dass es bis 2020 zu einer deutlichen Rückgang der Kosten der Elektrifizierung kommen wird. Dies ist vor allem auf die Reduktion der Batteriekosten zurückzuführen deren Kosten sich zwischen 2010 und 2020 auf ein Drittel reduzieren werden.

Diese Entwicklung und der Anstieg der Kraftstoffpreise werden dazu führen, dass sich mit Hybridantriebe 2020 in allen Fahrzeugklassen deutlich geringere Transportkosten erzielen lassen als mit konventionellen. In der Fahrzeugklasse N1 weisen Plug-In Hybride dann sogar die niedrigsten Gesamtkosten auf.

5.2 Reduktionspotentiale Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen

Durch alternative Antriebe ließe sich der Dieselverbrauch der LKW-Flotte bei gleichbleibendem Transportaufkommen bis 2020 um ca. 10% reduzieren, bis 2030 um ca. 30%.

Die größten Reduktionen bei Energieverbrauch und THG Emissionen sind in der Klasse N1 (<3,5t) durch den Einsatz elektrischer Antriebsysteme möglich. Bei schweren Nutzfahrzeugen sind nur geringer Reduktionen durch Hybridisierung möglich. Stärkere Senkungen des fossilen Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen sind hier nur durch höhere Beimischung von Biokraftstoffen möglich.

Bei Verwendung vorwiegend fossiler Kraftstoffe lässt sich der fossile Energieverbrauch bis 2020 um 11% reduzieren (bis 2030 um 23%) und die Treibhausgasemissionen um 11% (2030 um 22%). Bei höheren Biokraftstoffanteilen (2 Generation) und Verwendung von Strom aus erneuerbaren Quellen ist eine Reduktion der THG Emissionen um 30% bis 2030 realisierbar.

Literatur

[1] J. Schneider and D. Wappel, *Klimaschutzbericht 2009*. Austrian Ministry of Environment - Umweltbundesamt, 2009.
[2] M. Kloess and R. Haas, “Potentials of hybrid- and electric vehicles for the passenger vehicle sector in Austria – A model-based analysis,” presented at the 10th IAEE European Conference, Vienna, Vienna, 2009.
[3] M. Kloess and R. Haas, “The road towards electric mobility - An energy economic view on hybrid- and electric vehicle technologies and the influence of policies on their diffusion,” presented at the 32nd IAEE International Conference, San Francisco, 2009.
[4] EUCAR, CONCAWE, and E. JRC, *Well-to-Wheel Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*. 2006.
[5] G. Passier et al., *Status Overview of Hybrid and Electric Vehicle technology (2007)*. IEA, 2007.
[6] F. R. Kalhammer, B. M. Kopf, D. H. Swan, V. P. Rohan, and M. P. Walsh, *Status and Prospect for Zero Emission Technology - Report of the ARB Independent Expert Panel 2007*. State of California Air Ressource Board, 2007.
[7] M. Kloess, R. Haas, K. Könighofer, L. Canella, A. Huss, and P. Prenninger, *Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050 - NANUPOT*. Vienna: , 2011.
[8] M. Kloess, A. Müller, and R. Haas, “The effects of policy, energy prices and technological learning on the passenger vehicle sector in Austria - A model based analysis,” presented at the International Energy Workshop, Stockholm, 2010.

6 Anhang:

6.1 Methodik Flottenmodell

6.1.1 Modellierung der Flottenstruktur

Die Fahrzeugflotte CAP_t setzt sich aus den überlebenden Fahrzeugen aller Jahrgänge zusammen. Somit ergibt sich die Flotte wie folgt:

$$CAP_t = \sum_n SZ_n \tag{6-1}$$

CAP … Fahrzeugflotte

SZ_n … Überlebende eines Fahrzeugjahrgangs n.

Die Anzahl der Fahrzeuge die jedes Jahr aus dem Bestand fallen wird durch eine Weibullverteilung modelliert, welche die Ausfallswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Alter der Fahrzeug angibt.

$$SZ_{n(t)} = SR_n \cdot Z_{t-n} \tag{6-2}$$

$$SR(n;h;\lambda) = 1 - e^{-(x/\lambda)s} \tag{6-3}$$

SZ_n … Überlebende einer Fahrzeuggeneration

SR … Überlebensrate

Z … Anzahl neu zugelassener Fahrzeuge

n … Index des Fahrzeugjahrgangs

s, λ … Parameter der Weibull-Verteilung

Die Überlebenden SZ eines Jahrgangs mit dem Alter n wird durch die Überlebensrate SR der Fahrzeuge mit dem Alter n bestimmt. Die Überlebensrate ist durch die Summenfunktion der Weibullverteilung modelliert.

Die Anzahl der Fahrzeuge die jedes Jahr registriert werden ist hängt im Modell von der Entwicklung der Gesamtflotte und von der Anzahl der Fahrzeuge die aus dem Bestand fallen ab. Die Entwicklung der Gesamtflotte ist durch die Nachfrage nach Transportdienstleistungen definiert. In dieser konkreten Analyse wurde eine konstanten Nachfrage nach Straßengütertransportdienstleistungen angenommen, womit auch die Anzahl der jährlichen Neuzulassungen relativ konstant bleibt.

$$Z_{(t)} = CAP_{(t)} - CAP_{(t-1)} + Z_{SCRAP(t)} \quad (6\text{-}4)$$

$$Z_{SCRAP(t)} = CAP_{(t-1)} - \Sigma SZ_{(t)} \quad (6\text{-}5)$$

$Z_{(t)}$ ... neu registrierte Fahrzeuge pro Jahr

$Z_{SCRAP(t)}$ … Fahrzeuge die aus dem Bestand fallen

Die Variablen k und λ bestimmen die Weibullverteilung und wurden für jede Fahrzeugklassen und Nutzerkategorie basierend auf statistischen Daten bestimmt.

$$\forall \quad k, \lambda = const: \quad CAP_t = CAP\_real_t \wedge \overline{a}_t = \overline{a}\_real_t \quad (6\text{-}6)$$

CAP_real … Fahrzeugflotte gemäß statistischer Daten

â … durchschnittliches Fahrzeugalter in der Flotte

k … Parameter der Weibull-Verteilung

λ … Parameter der Weibull-Verteilung

Auch die Nutzerkategorien mit unterschiedlichen jährlichen Kilometerleistungen und entsprechendem Kraftstoffverbrauch wurden anhand statistischer Daten ermittelt. Die Paraemtrisierung des Modells wurde dabei so angepasst, dass der modellierte Flottenverbrauch dem in der Statistik ausgewiesenen, tatsächlichen Verbrauch entspricht.

$$EC\_CAP = EC\_CAP\_real \quad (6\text{-}7)$$

$$[\%]\ EC\_CAP_h = EC\_CAP\_real_h \quad (6\text{-}8)$$

p_u

EC_CAP … Energieverbrauch in der modellierten Flotte

EC_CAP … Energieverbrauch in der realen Flotte

p_u … Anteile der Nutzergruppen

6.1.2 Modellierung des Mix an Neuzulassungen (BAU)

Die Marktanteile der Fahrzeugtechnologien wurden mit Hilfe eines Logit-Modells ermittelt.

Hierbei ist der Marktanteil z_j von den spezifischen Kosten der Technologie SC_j, den Kosten der Referenztechnologie SC_{j_ref} sowie den Kosten konkurrierender Technologien ab. Die Referenztechnologie entspricht hierbei jener Technologie mit dem höchsten Marktanteil im vorangegangenen Jahr.

$$z_{j(t)}[\%] = f(r(SC_{j(t)}, SC_{1(t)}, ...SC_{n(t)}, SC_{ref(t)}, b), SC_{j(t-1)}, a_j) \quad (6\text{-}9)$$

with

$$r_{j(t)}[\%] = \frac{w(SC_{j(t)}, SC_{ref(t)}, b)}{\sum_{j=1}^{k} w(SC_{n(t)}, SC_{ref(t)}, b)} \quad (6\text{-}10)$$

and

$$w_{j(t)} = (1 - \frac{1}{(1 + e^{-b_s * (SC_{j(t)} - SC_{ref})})}) \quad (6\text{-}11)$$

z_j … Marktanteil der Technologie j [%]

SC_j … Spezifische Servicekosten der Technologie j [€ km^{-1}]

SC_n … Spezifische Servicekosten konkurrierender Technologien [€ km^{-1}]

SC_{ref} … Spezifische Servicekosten der Referenztechnologien [€ km^{-1}]

a_j … Diffusionsbeschränkung der Technologie j

b_s … S-Kurven Parameter

k … Anzahl konkurrierender Technologien

Der Parameter b gibt die Steile der Logit-Funktion und somit die Sensitivität mit der der Markt auf Differenzen in den Kosten reagiert. Da keine Empirischen Daten für Technologeisubstitutionen im Nutzfahrzeugbereich vorlagen, wurde der Parameter aus dem PKW Bereich übernommen, wo er in vergangenen Untersuchungen erhoben wurde (siehe [8]).

Das Wachstum der Marktanteile einer Technologie ist außerdem durch Diffusionsbarrieren beschränkt die hier mit dem Parameter a_j zusammengefasst wurden. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um technologiespezifische, maximale Ausbaupfade, die im Modell nicht überschritten werden können. Deren Form richtet sich nach den jeweiligen Barrieren die eine Technologie bei der Marktdurchdringung überwinden muss. Typische Beispiele für solche Barrieren sind erforderlich Infrastruktur (z.B. CNG) oder Einschränkungen in der Nutzbarkeit (z.B. beschränkte Reichweite bei E-Fahrzeugen).

6.1.3 Modellierung des Energieverbrauch und der Triebhausgasemissionen:

Der Endenergieverbrauch der Flotte wird durch den spezifischen Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge *FC* (der Fahrzeugkategorien *i*, mit der Technologie *j* in den Jahrgängen *n*) des Fahrzeugbestands CAP und die jährlich zurückgelegte Strecke *D* (in den verschiedenen Nutzerkategorien *u*)

$$EC\_CAP_t = \sum_{i,j,n,u} FC_{i,j,n} \cdot CAP_{i,j,n,u} \cdot D_{i,j,n,u} \tag{6-12}$$

EC_CAP …… Energieverbrauch der Flotte

FC …… Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge

D …… jährliche Fahrstrecke

Analog werden die Treibhausgasemissionen *CUM_GHG* modelliert:

$$GHG\_CAP_t = \sum_{ijnu} GHG_{i,j,n} \cdot CAP_{i,j,n,u} \cdot D_{i,j,n,u} \tag{6-13}$$

GHG_CAP … Treibhausgasemissionen der Flotte

Um Energieverbrauch und THG Emissionen korrekt bewerten zu könne muss die gesamte Energieumwandlungskette berücksichtigt werden. Der entsprechende kumulierte Energieverbrauch *CUMEC_WTW* und THG-Emissionen *CUMGHG_WTW* hängen daher auch von den Kraftstoffen ab und wurden wie folgt ermittelt:

$$EC\_WTW\_CAP_t = EC\_CAP + \sum_h EC\_CAP_h \cdot CE_h + \sum_{i,j} Z_{ij} \cdot CE_{ij} \tag{6-14}$$

$$GHG\_WTW\_CAP_t = GHG\_CAP + \sum_h GHG\_CAP_h \cdot GE_h + \sum_{i,j} Z_{ij} \cdot GE_{ij} \tag{6-15}$$

EC_WTW_CAP … Well-to-Wheel Energieverbrauch der Flotte

CE … Well-to-Wheel Energieverbrauch pro Einheit

GHG_WTW_CAP … Well-to-Wheel Treibhausgasemissionen der Flotte

GE … Well-to-Wheel Treibhausgasemissionen pro Einheit

6.2 Rohstoffe für Biokraftstoffe und Strom

Tabelle 6-1: Anteile der Kraftstoffe und Rohstoffe

			2010	2020	2030	2040	2050
Biokraftstoff-Substitute							
	Benzin-Substitute	Ethanol 1	100%	75%	50%	25%	0%
		Ethanol 2	0%	25%	50%	75%	100%
	Diesel-Subsitute	Biodiesel	100%	75%	50%	25%	0%
		BTL	0%	25%	50%	75%	100%
	CNG-blends	Biogas	100%	95%	80%	80%	80%
		Synthetic Natural Gas (SNG	0%	5%	20%	20%	20%
Biomass Ressources for Biofuels							
	Ethanol 1	Mais	15%	15%	15%	15%	15%
		Weizen	75%	75%	75%	75%	75%
		Zuckerrübe	10%	10%	10%	10%	10%
	Ethanol 2	Stroh	100%	80%	60%	40%	40%
		Holz Kurzumtrieb	0%	20%	40%	60%	60%
	Biodiesel	Raps	75%	75%	75%	75%	75%
		Sonnenblumen	20%	20%	20%	20%	20%
		Altspeiseöl	5%	5%	5%	5%	5%
	BTL	Holz Schnitzel	100%	100%	100%	100%	100%
	Biogas	Gülle	5%	4%	3%	2%	3%
		Energiepflanzen	35%	39%	43%	47%	50%
		Maissilage	60%	57%	54%	51%	47%
	SNG	Holz Schnitzel	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 6-2: Strom-mix Szenarien

			2010	2020	2030	2040	2050
Strom-mix "fossil"							
	Strom-mix Österreich		100%	90%	80%	70%	60%
	Fossile Quellen	Erdgas (GuD)		10%	20%	30%	40%
	Erneuerbare Quellen	Hydro					
		Wind					
		Photovoltaik					
		Biomasse					
Strom-mix "erneuerbar"							
	Strom-mix Österreich		100%	75%	50%	25%	0%
	Fossile Quellen	Erdgas (GuD)					
	Erneuerbare Quellen	Hydro		10%	25%	25%	25%
		Wind		7,5%	10%	20%	25%
		Photovoltaik		2,5%	10%	20%	25%
		Biomasse		5%	5%	10%	25%

Tabelle 6-3: Spezifikationen der Fahrzeuge - Klasse N1

					Systemleistung			Kraftstoff	Reichweite		Tanksystem		Batteriesystem		Gewicht		Sattelauflieger/Anhänger	
		Zul. Fahrzeug-masse (t)	Referenz-gewicht (t)	Antriebsystem	Gesamt (kW)	VKM (kW)	E-Motor (kW)		gesamt (km)	emissions-frei (km)	Technologie	Fassungs-vermögen (l,kg)	Techno-logie	Kapazität (kWh)	Eigen-gewicht (kg)	max Zuladung (kg)	Leergewicht (kg)	max Zuladung (kg)
N1	<3,5t	3,5	3	**Konventionell (Diesel)**	100	100		Diesel	1000		flüssig	80			1.700	1.800		
				Konventionell (CNG)	100	100		CNG	400 (600)		CNG-200bar + Benzintank	40kg CNG / 20l Benzin			1.750	1.750		
				Micro Hybrid (Diesel)	100	100		Diesel	1000		flüssig	80			1.750	1.750		
				Micro Hybrid (CNG)	100	100		CNG	400 (600)		CNG-200bar + Benzintank	40kg CNG / 20l Benzin			1.800	1.700		
				Mild Hybrid (Diesel)	100	80	20	Diesel	1000		flüssig	80	Li-Ion	2	1.800	1.700		
				Mild Hybrid (CNG)	100	80	20	CNG	400 (600)		CNG-200bar + Benzintank	40kg CNG / 20l Benzin	Li-Ion	2	1.850	1.650		
				Full Hybrid (Diesel)	100	60	40	Diesel	1000		flüssig	80	Li-Ion	5	1.850	1.650		
				Full Hybrid (CNG)	100	60	40	CNG	400 (600)		CNG-200bar + Benzintank	40kg CNG / 20l Benzin	Li-Ion	5	1.900	1.600		
				Plug-In-Hybrid (Benzin)	100	30	100	Benzin	400	60	flüssig	40	Li-Ion	30	1.900	1.600		
				Plug-In-Hybrid (Diesel)	100	30	100	Diesel	400	60	flüssig	40	Li-Ion	30	1.950	1.550		
				Elektrofahrzeug-BEV	100		100	Srom	120	120			Li-Ion	60	2.000	1.500		
				Brennstoffezellen-FZ	100	100kW-BZ	100	H2	300	300	H2-700bar	5	Li-Ion	2	2.000	1.500		

Tabelle 6-4: Spezifikationen der Fahrzeuge - Klasse N2, N3 und Sattelzug

						Systemleistung				Reichweite		Tanksystem		Batteriesystem		Gewicht		Sattelauflieger/Anhänger		
		Zul. Fahrzeug-masse (t)	Referenz-gewicht (t)	Antriebsystem	Gesamt (kW)	VKM (kW)	E-Motor (kW)	Kraftstoff	gesamt (km)	emissions-frei (km)	Technologie	Fassungs-vermögen (l,kg)	Techno-logie	Kapazität (kWh)	Eigen-gewicht (kg)	max Zuladung (kg)	Leergewicht (kg)	max Zuladung (kg)	
N2	<12t	12	9	Konventionell (Diesel)	150	150		Diesel	500		flüssig	200			4.500	6.000				
				Konventionell (CNG)	150	150		CNG	300		CNG-200bar + Benzintank	90			4.500	6.000				
				Micro Hybrid (Diesel)	150	150		Diesel	500		flüssig	200			4.500	6.000				
				Micro Hybrid (CNG)	150	150		CNG	300		CNG-200bar + Benzintank	90			4.500	6.000				
				Mild Hybrid (Diesel)	150	120	40	Diesel	500		flüssig	200	Li-Ion	5	4.600	5.900				
				Mild Hybrid (CNG)	150	120	40	CNG	300		CNG-200bar + Benzintank	90	Li-Ion	5	4.600	5.900				
N3	>12t	40	21	Konventionell (Diesel)	300	300		Diesel	2000		flüssig	1000			7.000	11.000	5.000	7.000		
				Mild Hybrid (Diesel)	300	250	100	Diesel	2000		flüssig	1000	Li-Ion	10	7.200	10.800	5.000	7.000		
N3	Sattelzug-maschine	40	35	Konventionell (Diesel)	300	300		Diesel	2000		flüssig	1000			7.000	11.000	5.000	12.000		
				Mild Hybrid (Diesel)	300	250	150	Diesel	2000		flüssig	1000	Li-Ion	12	7.200	10.800	5.000	12.000		