

Neue Fahrzeugtechnologien und ihre Effekte auf Logistik und Güterverkehr

Serviceability of Low-Emission-Vehicle-Technologies to eco-optimize Future Logistics and Freight Transport (EFLOG)

Finanziert im Rahmen des Programms „Mobilität der Zukunft“ durch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

arp planning.consulting.research
Alser Straße 34/33, 1090 Wien
www.arp.co.at

AVL List GmbH
Hans List Platz 1, 8020 Graz
www.avl.com

**TU Wien Department für Raumplanung
Fachbereich Verkehrssystemplanung**
Erzherzog Johann Platz 1/280 5, 1040 Wien
<http://info.tuwien.ac.at/ivs/>

EnergyComment
Fuhlsbüttler Straße 584, 22337 Hamburg
www.energycomment.de

Wien, im September 2014

AutorInnen

arp – planning.consulting.research

Alser Straße 34/33, 1090 Wien

www.arp.co.at

Dipl.-Ing. Dr. rer. nat. Heinz DÖRR

Kevin HILLEN, MSc

Viktoria MARSCH, Bakk.techn.

Dipl.-Ing. (FH) Andreas ROMSTORFER, MA

Yvonne TOIFL, BSc

AVL List GmbH

Hans-List-Platz 1, 8020 Graz

www.avl.com

Dipl.-Ing. (FH) Rolf ALBRECHT

Dipl.-Ing. Dr. techn. Arno HUSS

Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter PRENNINGER

TU Wien – Department für Raumplanung – Fachbereich Verkehrssystemplanung

Erzherzog-Johann-Platz 1/280-5, 1040 Wien

<http://info.tuwien.ac.at/ivs/>

Claudia BERKOWITSCH, BSc

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bardo HÖRL

Dipl.-Ing. Monika WANJEK

EnergyComment

Fuhlsbüttler Straße 584, 22337 Hamburg,

www.energycomment.de

Dr. Steffen BUKOLD

Inhaltsverzeichnis

AutorInnen	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	8
Darstellungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	12
Executive Summary	14
1. STATUS-QUO-ANALYSE	17
1.1 Verkehrsträger und Verkehrsmittel im Güterverkehr	17
1.1.1 Vorbedingungen und Perspektiven der Güterverkehrssysteme für Europa	17
1.1.1.1 Schlüsselbegriffe und ihre Deutung in dieser F&E-Dienstleistung	17
1.1.1.2 Strukturwandel in der Logistik und im Gütertransport als Triebkräfte	18
1.1.1.3 Multimodales Angebot an Verkehrsinfrastrukturen	24
1.1.1.4 Straßeninfrastruktur und Nutzlastkapazitäten für den Straßengüterverkehr in Europa	26
1.1.1.5 Bestand relevanter Fahrzeugklassen in der Kraftfahrzeugstatistik Österreichs	28
1.1.1.6 Entwicklung des Modal Splits zwischen den Verkehrsträgern in der EU-27	30
1.1.1.7 Energieverbrauch nach Kraftstoffarten in der EU-28	31
1.1.1.8 Hinweise zu güterverkehrsbedingten Treibhausgas- und Schadstoff-Emissionen	32
1.1.1.9 Abgasnormen nach Verkehrsträgern	35
1.1.1.10 Resümee zum Handlungsfeld Emissionsbewältigung und Immissionsschutz	38
1.1.2 Nutzfahrzeuge für den Straßengüterverkehr nach Antriebsart	40
1.1.2.1 Alternative Kraftstoffe für Verbrennungskraftmotoren	40
1.1.2.2 Wasserstoff als Energiequelle	43
1.1.2.3 Elektroantrieb und Infrastruktur für die E-Mobilität	45
1.1.2.4 Gegenwärtiges Marktangebot alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge	56
1.1.2.5 Resümee zum Marktangebot und zur verkehrslogistischen Einsatzfähigkeit	72
1.1.2.6 Resümee zu den Umstellungsbedingungen (Status quo)	75
1.1.3 Eisenbahnfahrzeuge für den Schienengüterverkehr	77
1.1.3.1 Triebfahrzeuge mit alternativen Antrieben	77
1.1.3.2 Intelligente Güterwagenkonzepte	80
1.1.3.3 Resümee zu den Umstellungsbedingungen (Status quo)	82
1.1.4 Barges in der Binnenschifffahrt	83
1.1.4.1 Binnenschifffahrtstypen nach Güterart und Kombinationen von Barges	83
1.1.4.2 Bedingungen der Wasserstraße als Optimierungsfaktoren im Schiffsdesign	84
1.1.4.3 Möglichkeiten zur Kraftstoffeinsparungen und alternativer Antriebssysteme	86
1.1.4.4 Resümee zu den Umstellungsbedingungen (Status quo)	88
1.1.5 Flugzeugmuster im Luftfrachtverkehr	89
1.1.5.1 Besonderheiten der Luftfracht	89
1.1.5.2 Flugzeugmuster für den reinen Frachtverkehr	91

1.1.5.3 Alternative Brennstoffe und Triebwerke	92
1.1.5.4 Resümee zu den Umstellungsbedingungen	96
1.2 Verkehrslogistische Einflussfaktoren auf den Fahrzyklus von Nutzfahrzeugen	97
1.2.1 Gruppierung der Einflussfaktoren nach Settings	97
1.2.2 Einfluss exogener Faktoren des Infrastrukturellen Settings	98
1.2.2.1 Methodischer Einstieg: Der Fahrweg als Schnittstelle	98
1.2.2.2 Fahrwegspezifische Inputfaktoren für die Fahrdynamik	99
1.2.3 Einfluss externer Faktoren des Logistischen Settings	103
1.2.4 Einfluss interner Faktoren des Transportwirtschaftlichen Settings	105
1.2.5 Faktoren zu den Befahrungsbedingungen der Verkehrsinfrastruktur	105
1.2.5.1 Annahmen zur Fahrdynamik in einem Basisdiagramm	105
1.2.5.2 Annahmen zur Fahrgeschwindigkeit im Verkehrsfluss	106
1.2.5.3 Zur Interpretation des Basis-Diagramms	107
1.3 Annahmen zu den Mustertransportläufen für die erste Fahrzyklen-Simulation	110
1.3.1 Das Instrument der Fahrzyklus-Simulation	110
1.3.1.1 Zweck und Ergebnisse einer Fahrzyklus-Simulation	110
1.3.1.2 Visualisierung im Motorkennfeld	110
1.3.1.3 Möglichkeiten der Interpretation und Instrumentalisierung	111
1.3.1.4 Generelle Randbedingungen der Fahrzeugsimulation	112
1.3.2 Modellierung der Input-Daten	113
1.3.2.1 Methoden zur Generierung der Input-Daten für die Randbedingungen	113
1.3.2.2 Herleitung der Mustertransportläufe	115
1.3.2.3 Zuordnung der Einflussfaktoren im Dateninput-Modell	115
1.3.3 Auswahl der exogenen Faktoren des Infrastrukturellen Settings	116
1.3.3.1 Kriterien der Kantenstückelung bzw. Verortung der Knoten	117
1.3.3.2 Auszug relevanter Straßenzüge im Raum Wien für die Auswahl einer Referenzstrecke	118
1.3.3.3 Auswahl der Referenzstrecke Wiener Neudorf nach Wien 16 (Ottakring)	119
1.3.3.4 Annahmen zur Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Level of Service	120
1.3.4 Auswahl der externen Faktoren des Logistischen Settings	122
1.3.4.1 Auswahl und Anforderungen der verkehrslogistischen Prozesse	122
1.3.4.2 Auswahl und Strukturierung der Bedienräume (Gütersenken)	122
1.3.5 Auswahl der internen Faktoren des Transportwirtschaftlichen Settings	123
1.3.5.1 Auswahl und Kantenstückelung der Referenzstrecke (Quelle-Ziel-Relationen)	123
1.3.5.2 Beladungszustand und Tourencharakteristik (Kantenstückelung) im Bedienraum	124
1.4 Ergebnisse und Interpretation der ersten Fahrzyklen-Simulation der Mustertransportläufe	128
1.4.1 Fahrzyklus für Nutzfahrzeugklasse 1 im KEP-Dienst	128
1.4.1.1 Definition des Referenzzyklus und der verkehrslogistischen Randbedingungen	128
1.4.1.2 Technische Beschreibung des N ₁ -Fahrzeugmodells	129
1.4.1.3 Simulationsergebnisse	130
1.4.1.4 Verkehrsplanerische Interpretation der N ₁ -Points of Delivery-Verteilung (KEP-Dienst)	132
1.4.2 Fahrzyklus für Nutzfahrzeugklasse 2 im Distributionsverkehr für den Lebensmittelhandel	132

1.4.2.1	Definition des Referenzzyklus und der verkehrslogistischen Randbedingungen	132
1.4.2.2	Technische Beschreibung des N2-Fahrzeugmodells	133
1.4.2.3	Simulationsergebnisse	133
1.4.2.4	Verkehrsplanerische Interpretation der N2-Points of Sale-Liefertour im Lebensmittelhandel	135
1.4.3	Fahrzyklus für Nutzfahrzeugklasse 3 im Zulieferverkehr an Großabnehmer	135
1.4.3.1	Definition des Referenzzyklus und der verkehrslogistischen Randbedingungen	135
1.4.3.2	Technische Beschreibung des N3-Fahrzeugmodells	136
1.4.3.3	Simulationsergebnisse	136
1.4.3.4	Verkehrsplanerische Interpretation der N3-Industrielle Zulieferfahrt	138
1.4.4	Resümee zur ersten Fahrzyklen-Simulation von Mustertransportläufen mit konventionellen Antrieben	138
1.4.4.1	Kraftstoffverbrauch konventioneller Dieselantriebe nach verkehrslogistischen Szenarien	138
1.4.4.2	Folgerungen abgeleitet aus der Randbedingung Level of Service	140
2. FEASIBILITY-ANALYSE		141
2.1	Wirtschaftlichkeitsbeurteilung der verkehrslogistischen Einsatzfähigkeit der Antriebsformen	141
2.1.1	Kostenfaktoren des Fahrzeugeinsatzes (Fahrzeugnutzung)	141
2.1.2	Kriterien der Wirtschaftlichkeitsbeurteilung des Fahrzeugnutzens	142
2.1.3	Kriterien der technischen Leistungsangebote für die Fahrzeugauswahl	143
2.1.3.1	Fahrzeugseitige Schlüsselkriterien der Leistungsangebote	143
2.1.3.2	Einsatzseitige Schlüsselfaktoren der Logistik-Dienstleistungen	144
2.1.3.3	Indikatoren zur Nutzlast-Kapazität	144
2.2	Annahmen zu den Mustertransportläufen für die zweite Fahrzyklen-Simulation	145
2.2.1	Modifikation der externe Faktoren des Logistischen Settings: Zeitfenster	145
2.2.2	Modifikation der exogenen Faktoren des Infrastrukturellen Settings	146
2.2.2.1	Herleitung des Levels of Service nach Kapazitäten der Straßenkategorien	146
2.2.2.2	Anwendung des repräsentativen Levels of Service in verkehrslogistischen Zeitfenstern	151
2.2.2.3	Anpassung der Fahrdynamik an den repräsentativen Level of Service	153
2.3	Erweiterung der fahrzeugseitigen Inputdaten für die zweite Fahrzyklen-Simulation	157
2.3.1	Auswahl der antriebsseitigen Spezifikationen für die Nutzfahrzeugklassen	157
2.3.2	Hybridisierungskonzepte im Antriebsstrang	158
2.3.3	Technologiepakete und Hybridisierungsvarianten	159
2.4	Ergebnisse der zweiten Simulation für die Nutzfahrzeugtypen nach Antriebsarten	161
2.4.1	Nutzfahrzeugklasse 1 im KEP-Dienst	161
2.4.1.1	Definition des Referenzzyklus und der Randbedingungen	161
2.4.1.2	Fahrzeugvarianten und Komponenten	162
2.4.1.3	Simulationsergebnisse aus verkehrsökologischer Sicht	167
2.4.1.4	Folgerungen für N1-Transportläufe aus verkehrslogistischer Sicht	170
2.4.2	Nutzfahrzeugklasse 2 im Distributionsverkehr für den Lebensmittelhandel	173

2.4.2.1	Definition des Referenzzyklus und der Randbedingungen	173
2.4.2.2	Fahrzeugvarianten und Komponenten	174
2.4.2.3	Simulationsergebnisse aus verkehrsökologischer Sicht	177
2.4.2.4	Folgerungen für N ₂ -Transportläufe aus verkehrslogistischer Sicht	179
2.4.3	Nutzfahrzeugklasse 3 im Zulieferverkehr zu Großabnehmer	181
2.4.3.1	Definition des Referenzzyklus und der Randbedingungen	181
2.4.3.2	Fahrzeugvarianten und Komponenten	182
2.4.3.3	Simulationsergebnisse aus verkehrsökologischer Sicht	185
2.4.3.4	Folgerungen für N ₃ -Transportläufe aus verkehrslogistischer Sicht	187
2.4.4	Resümee zur zweiten Fahrzyklen-Simulation von Mustertransportläufen mit alternativen Antriebsformen	189
2.4.4.1	Verkehrslogistisches Daten-Input-Modell und Ergebniszielsetzung	189
2.4.4.2	Grundsätzliche Wirkungspotenziale von alternativen Antriebsformen für Güterverkehre (fahrzeugseitige Verkehrsqualität)	190
2.4.4.3	Methodische Schlussfolgerungen zur Erfassung der Gütermobilität	194
2.4.4.4	Vorgangsweise für die Interpretation und Schlussfolgerung der Simulationsergebnisse	198
3.	ANTIZIPATIONSANALYSE	200
3.1	Perspektiven der Energiemärkte	200
3.1.1	Fragestellung und Arbeitsprogramm	200
3.1.2	Methodische Kritik und Anmerkungen	201
3.1.3	Bandbreite von Energieträgern und Kraftstoffen	202
3.1.4	Der Status-Quo: Monokultur Dieseldieselkraftstoff	205
3.1.4.1	Rahmenbedingungen: Wachstum und technologische Sackgasse	205
3.1.4.2	Potenziale und Risiken der Diesel-Monokultur	208
3.1.4.3	Zwischenfazit: Asymmetrische Preisrisiken bei Diesel	219
3.1.5	Alternative Kraftstoffe und Energieträger	220
3.1.5.1	Erdgas	220
3.1.5.2	Biokraftstoffe	224
3.1.5.3	Kohle	227
3.1.5.4	Strom	228
3.1.6	Fazit: Bewertungsmatrix	230
3.1.6.1	Methodische Vorbemerkungen	230
3.1.6.2	Kostentrends und Kostenrisiken	231
3.2	Systemorientierte FTI-Potenziale nach Bedienformen	236
3.2.1	Schwerpunkte für Fahrzeugklasse N ₁ mit Fokus auf Systemoptimierung	236
3.2.1.1	Aspekte der Einsatzfähigkeit und Substituierbarkeit	236
3.2.1.2	Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu Verbesserungspotenzialen am Fahrzeug	236
3.2.2	Schwerpunkte für Fahrzeugklassen N ₂ und „N ₂ plus“ mit Fokus auf Infrastrukturoptimierung	237
3.2.2.1	Aspekte der Einsatzfähigkeit und Substituierbarkeit	237
3.2.2.2	Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu Verbesserungspotenzialen am Fahrzeug	237
3.2.3	Resümee für die flächenbedienenden Fahrzeugklassen N ₁ und N ₂	238
3.2.4	Schwerpunkte für Fahrzeugklassen N ₃ (und O) mit Fokus auf Fahrzeugoptimierung	240

3.2.4.1 Aspekte der Einsatzfähigkeit und Substituierbarkeit	240
3.2.4.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu Verbesserungspotenzialen am Fahrzeug	241
3.3 Strategischer Ausblick auf Aktionsfelder und Zeithorizonte	243
3.3.1 Fahrzeugtechnologie als Entwicklungstreiber	243
3.3.2 Erkenntnisse für FTI-Aktionsfelder	243
3.3.3 Systemvoraussetzungen für eine Umstellungsstrategie und für die Migration	246
Impressum	248
Internetverzeichnis	249

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Seehäfen als globale Gateways, Rangierbahnhöfe als kontinentale Verteiler und Kombi-Terminals als regionale Hubs im Seehafen-Hinterlandverkehr	18
Abbildung 1-2: Wirtschaftsparks und Neuansiedler (KEP-Dienste, Automotivzulieferer) in Aufbruchregionen	19
Abbildung 1-3: Ehemaliges innerstädtisches Güterbahnhofgelände am wiederhergestellten Südring in Berlin (li.) und innerstädtische Anlieferung mit Zentralachsanhängerzug in Paris (St. Lazare)	20
Abbildung 1-4: Innenstadtanlieferung zu einzelndem Point of Sale in Wien-Alsergrund und mit Sattelzug zum Trailertausch in zentraler Anlieferstation in der Fußgängerzone von Hannover	21
Abbildung 1-5: Zulaufrouden A 23 und B 14 sowie Donauuferbahn zum trimodalen Terminal Wien-Freudenau	21
Abbildung 1-6: Entwicklung der Gütertransportleistungen in der EU-27 nach Verkehrsmodi 1995-2012	30
Abbildung 1-7: Energieverbrauch für Verkehrsleistungen nach Kraftstoffarten in der EU-28	31
Abbildung 1-8: Entwicklung der Migration alternativ angetriebener Fahrzeuge in der EU-27 2000-2012	32
Abbildung 1-9: Anteil der geschätzten Treibhausgas-Emissionen nach Verkehrszwecken	33
Abbildung 1-10: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in Österreich 1990-2010	34
Abbildung 1-11: Entwicklung der Stickoxid-Emissionen in Österreich 1990-2010	34
Abbildung 1-12: Entwicklung der Partikel-Emissionen in Österreich 1990-2010	34
Abbildung 1-13: Emissionen aus Flugtriebwerken bei 25 kg Luftdurchsatz und 1 kg Kerosin-Verbrauch	37
Abbildung 1-14: Übersicht der Energiebereitstellung für ICE, E-Motor und Brennstoffzelle	40
Abbildung 1-15: Österreich-Premiere einer Fuel-Cell-Testfahrt an der Wasserstofftankstelle	44
Abbildung 1-16: Kombinationsmöglichkeiten von Verbrennungsmotor und Elektromotor in Hybridkonzepten	46
Abbildung 1-17: Hybrid-Varianten nach Funktionalität und Leistung	48
Abbildung 1-18: Beispielhafte Strukturvarianten von Hybridfahrzeugen	48
Abbildung 1-19: Speicherkapazität (Wh/kg) und Leistungsgewicht (W/kg) nach Art der Batterie und Antrieb	49
Abbildung 1-20: Bestandteile einer Ladesteckvorrichtung für induktives Laden	52
Abbildung 1-21: Ausschnitt einer Mustertabelle zur E-Ladestationen-Info-Tafel	54
Abbildung 1-22: Ladeeinrichtungen für das induktive Laden am Fahrzeug und in der Fahrbahn	55
Abbildung 1-23: Induktive Ladestandstreifen in der Fahrbahn von Bushaltestellen	55
Abbildung 1-24: Schweres Nutzfahrzeug mit Stromabnehmern unter Fahrleitung auf Teststrecke	56
Abbildung 1-25: E-Cobus	57
Abbildung 1-26: DAF LF Hybrid	57
Abbildung 1-27: E-Force	58
Abbildung 1-28: Fiat Fiorina, Doblo und Ducato Maxi	58
Abbildung 1-29: Die Nutzfahrzeugmodelle von IVECO: Daily, Stralis Hi Road CNG, Stralis CNG und Irisbus Citelis	60
Abbildung 1-30: Verkehrsraumgerechter Einsatz von Hybrid- und Elektro-Nutzfahrzeugen im Ballungsraum	61
Abbildung 1-31: KÖGEL-CNG-Modul am Trailer	61
Abbildung 1-32: MAN Lion's City	62
Abbildung 1-33: MAN Erdgas-Lkw für AmBev (li.) und MAN Metropolis (re.)	63
Abbildung 1-34: Mercedes-Benz Sprinter NGT, EvoBus Citaro CNG, Econic LNG und Econic NGT	64
Abbildung 1-35: Opel Combo	65
Abbildung 1-36: Peugeot Partner und Citroën Berlingo	66
Abbildung 1-37: Renault-Angebot an Lieferwagen von 2 bis 22 m ³ Nutzraum	67
Abbildung 1-38: Renault Kangoo Z.E. und Renault Premium Distribution	67
Abbildung 1-39: Scania P 270/310 CNG und Scania Citywide	68
Abbildung 1-40: Citybus der Wr. Linien	68
Abbildung 1-41: Die Leitmodelle der Smith-Electric-Fahrzeugfamilien und ihre Nutzlastkapazitäten	69
Abbildung 1-42: Solarbus	70
Abbildung 1-43: Solaris Urbino	70
Abbildung 1-44: Die VW-EcoFuel-Nutzfahrzeuge: Caddy EcoFuel, Caddy Maxi EcoFuel, VW Transporte EcoFuel	71
Abbildung 1-45: Volvo Methan-Diesel und Stadtbus Volvo 7900	72
Abbildung 1-46: Elektro-Diesel-Hybrid-Lokomotive für die Nahbedienung SBB Eem 923	77
Abbildung 1-47: Vierachsige dieselelektrische Lokomotiven DE 12/18 für die Güterbedienung von Vossloh	78
Abbildung 1-48: Innovatorische Ansatzpunkte am Güterwagen (FlexCargoRail-Konzept ergänzt)	80
Abbildung 1-49: Versuchsträger für autonomes Eisenbahngüterfahrzeug „Cargo Mover“	81
Abbildung 1-50: Transportweiten bei gleichem Energieverbrauch Straße, Bahn und Binnenschiff	83
Abbildung 1-51: Typische Barges in der Donauschiffahrt Motorgüterschiff und Zweier-Schubverbände	84

Abbildung 1-52: Schiffsdesign für eine optimierte Beladungs-, Energieverbrauchs- und Emissionscharakteristik	85
Abbildung 1-53: NEWS Convoy 1: Container-Motorschiff mit Container-Schubbarge für die Donau-Main-Route	85
Abbildung 1-54: Beladung eines Frachtflugzeuges mit flugzeugmusterspezifischen Unit Load Devices und lose Fracht auf Palette	90
Abbildung 1-55: Beladung eines Kühl- und Heizcontainers und Querschnitt eines Passagierflugzeuges mit Beiladefracht	90
Abbildung 1-56: Entwicklung des Weltluftfrachtverkehrs bis 2030	91
Abbildung 1-57: Nutzlast-Reichweiten-Leistungsfähigkeiten bei Frachtflugzeugen der Boeing Company	92
Abbildung 1-58: Airbus Beluga - A300-600ST und Boeing Dreamlifter - 747 LCF	92
Abbildung 1-59: Volumetrische und gravimetrische Energiedichten von Brennstoffen	93
Abbildung 1-60: Schematischer Aufbau eines Turbojet-, Turbofan- und Turboprop-Triebwerkes	94
Abbildung 1-61: Counter-Rotating-Open-Rotor-Triebwerk (li.) und Turbofan mit Zwischenkühler und Wärmetauscher (re.)	95
Abbildung 1-62: Mögliche neue Flugzeugkonzepte nach SIEBER	96
Abbildung 1-63: LoS-A*, -C* und -E* von Beobachtungsfahrten auf der Referenzstrecke der Mustertransportläufe	121
Abbildung 3-1: Energieträger und ihre Verarbeitungsschritte	202
Abbildung 3-2: Energetischer Vergleich diverser Kraftstoffe	203
Abbildung 3-3: Wirkungsgrade und Energieverluste	204
Abbildung 3-4: Wachstum der Ölnachfrage und Gesamtnachfrage nach Sektoren	205
Abbildung 3-5: Umfang und Zuwachs der Ölnachfrage unterschiedlicher Verkehrssektoren	205
Abbildung 3-6: Wachstum des Straßengüterverkehrs (Verkehrsleistung) nach Region!	206
Abbildung 3-7: Kraftstoffe im globalen Straßenverkehr 2012-2035	207
Abbildung 3-8: Antriebe und Kraftstoffe leichter Nutzfahrzeuge in Deutschland!	207
Abbildung 3-9: Komponenten der Kraftstoffnachfrage im globalen Lkw-Verkehr	208
Abbildung 3-10: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch im globalen Straßengüterverkehr 1990-2010	208
Abbildung 3-11: Kraftstoffverbrauch im deutschen Straßengüterverkehr 1990-2008	209
Abbildung 3-12: Ölverbrauch in China und Deutschland 1965-2012	210
Abbildung 3-13: Quellen der globalen Ölversorgung 2000-2035	210
Abbildung 3-14: Ölpreisentwicklung	212
Abbildung 3-15: Konventionelle und unkonventionelle Ölreserven und Ölressourcen	212
Abbildung 3-16: Kosten der Ölproduktion	213
Abbildung 3-17: Dieselexporte in die EU	214
Abbildung 3-18: Einsatzgebiete von Diesel	215
Abbildung 3-19: Steil wachsende Dieselnachfrage in Schwellen- und Entwicklungsländern (non-OECD)	215
Abbildung 3-20: Output einer simplen Destillations-Raffinerie vs Struktur der Ölnachfrage	216
Abbildung 3-21: Raffineriemargen	216
Abbildung 3-22: Importabhängigkeit der EU bei Öl und Gas	217
Abbildung 3-23: Wechselkursrisiken	218
Abbildung 3-24: Rohölpreisprognose	219
Abbildung 3-25: Erdgas im Straßenverkehr 2000-2019	220
Abbildung 3-26: Internationale Gaspreise 2000-2014 (Jahresdurchschnittspreise; 2014 bis 20. Juni)	221
Abbildung 3-27: Preisvergleich Öl-Gas bei gleichem Energieinhalt	222
Abbildung 3-28: Erdgas - Kosten und Ressourcen	223
Abbildung 3-29: Erdgaspreisprognose	223
Abbildung 3-30: Biokraftstoffe - Rohstoffe und Verfahren	224
Abbildung 3-31: Prognose der Biokraftstoffproduktion - absolut und in Öläquivalenten	226
Abbildung 3-32: Internationale Kohlepreise	227
Abbildung 3-33: Marginale Kosten für das globale Kohleangebot	228
Abbildung 3-34: Die Systemfunktion des „Hinterhofes“ für die emissionsfreie Warenlieferung	240
Abbildung 3-35: Die „Güter“-Autobahn mit drei Richtungsfahstreifen und hohen Lärmschutzwänden	240
Abbildung 3-36: Lokales Schwerverkehrsfahrverbot und kritische Ortsdurchfahrt	241

Darstellungsverzeichnis

Darstellung 1-1: Die Verteilung der Points of Sale für die Gütersenke Lebensmitteleinzelhandel in Wien	22
Darstellung 1-2: Nahversorgungsdichte im Lebensmitteleinzelhandel in Wien nach Bevölkerung und Stadtlage	23
Darstellung 1-3: Nahversorgungsdichte des Lebensmitteleinzelhandels in Wien im Bauland nach Stadtlage	23
Darstellung 1-4: Autobahn- und Eisenbahnnetz im Verhältnis zur Bevölkerungszahl in der EU	25
Darstellung 1-5: Autobahn- und Eisenbahnnetz im Verhältnis zur Fläche in der EU	25
Darstellung 1-6: Anteil der elektrifizierten Strecken im Eisenbahnnetz in der EU-28	25
Darstellung 1-7: Erschließungsnetzdichten nach Straßenkategorien im europäischen Ländervergleich	27
Darstellung 1-8: Lkw-Dichte im europäischen Ländervergleich	27
Darstellung 1-9: Lkw-Nutzlastkapazitätsdichte im europäischen Ländervergleich	27
Darstellung 1-10: Entwicklung des österreichischen Lkw-Fuhrparks 1950-2013	28
Darstellung 1-11: Lkw-Bestand und Lkw-Neuzulassungen seit 2003, inkl. Sattelzugmaschinen	29
Darstellung 1-12: Lkw-Bestand und Lkw-Neuzulassungen nach Fahrzeugklassen 2013	29
Darstellung 1-13: Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge nach Reichweite	74
Darstellung 1-14: Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge nach N-Klassen	74
Darstellung 1-15: Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge nach Energiequelle	74
Darstellung 1-16: Verkehrslogistische Einflussgrößen auf den Fahrzyklus von Nutzfahrzeugen	97
Darstellung 1-17: Zählquerschnitt mit Tagesgang der Verkehrsstärken an einer vierstreifigen Hauptstraße im Stadtgebiet	98
Darstellung 1-18: Eingangs-Hypothese zum Fahrverhalten bei unterschiedlicher Kapazitätsauslastung des Fahrwegs	105
Darstellung 1-19: Angenommene Abminderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach Level of Service	108
Darstellung 1-20: Motorenverhalten (dargestellt im spezifischen Motorkennfeld) im Fahrzyklus	111
Darstellung 1-21: Zuordnung der Einflussfaktoren zu den Settings der Verkehrslogistik im Input-Datenmodell	116
Darstellung 1-22: Modellierung und Ablauf des Screenings der relevanten Straßenzüge	117
Darstellung 1-23: Auszug güterverkehrsrelevanter Kantenzüge im übergeordneten Straßennetz im Raum Wien	118
Darstellung 1-24: Annahmen zur Abminderung der maximalen Fahrgeschwindigkeit aufgrund der Kapazitätsauslastung des Fahrweges nach Level of Service	121
Darstellung 1-25: Zulaufstrecke vom Industriezentrum NÖ-Süd am Ballungsraumrand bis zum innerstädtischen Lieferbezirk im westlichen Gründerzeitgürtel von Wien	123
Darstellung 1-26: Angenommener Routenverlauf zu beliebigen Points of Delivery	125
Darstellung 1-27: Angenommener Routenverlauf zu beliebigen Points of Sales	126
Darstellung 1-29: AVL CRUISE-Simulationsmodell des Referenzfahrzeuges der Klasse N ₁	129
Darstellung 1-30 (li.): Motorlastkollektive als Maß für den Kraftstoffverbrauch im Motorkennfeld für N ₁ -Fahrzyklus nach Verkehrszustand (Level of Service A*, C*, E*)	131
Darstellung 1-31 (re.): Diagramme zu Schaltverhalten (grau), Drehmoment (rosa), Motordrehzahl (grün) und Fahrgeschwindigkeit (rot) entlang eines Ausschnittes der Referenzstrecke für N ₁ bei Level of Service A*, C* und E*	131
Darstellung 1-32: AVL CRUISE-Simulationsmodell des Referenzfahrzeuges der Klasse N ₂	133
Darstellung 1-33 (li.): Motorlastkollektive als Maß für den Kraftstoffverbrauch im Motorkennfeld für N ₂ -Fahrzyklus nach Verkehrszustand (Level of Service A*, C*, E*)	134
Darstellung 1-34 (re.): Diagramme zu Schaltverhalten (grau), Drehmoment (rosa), Motordrehzahl (grün) und Fahrgeschwindigkeit (rot) für Ausschnitte entlang der Referenzstrecke für N ₂ bei Level of Service A*, C* und E*	134
Darstellung 1-35: AVL CRUISE-Simulationsmodell des Referenzfahrzeuges der Klasse N ₃	136
Darstellung 1-36 (li.): Motorlastkollektive als Maß für den Kraftstoffverbrauch im Motorkennfeld für N ₃ -Fahrzyklus nach Verkehrszustand (Level of Service A, C, E)	137
Darstellung 1-37 (re.): Diagramme zu Schaltverhalten (grau), Drehmoment (rosa), Motordrehzahl (grün) und Fahrgeschwindigkeit (rot) entlang eines Ausschnittes der Referenzstrecke für N ₃ bei Level of Service A, C und E	137
Darstellung 2-1: Die Abwandlung (*) des Level of Service (LoS-A*, -C*, -E*) auf 2-streifiger Richtungsfahrbahn	149
Darstellung 2-2: LoS-A*, LoS-C* und LoS-E* im Tagesgang am Beispiel der Zählstelle Bitterlichstraße	150
Darstellung 2-3: Anteile der LoS im Tagesverlauf anhand 60 Tagesganglinien der Verkehrserhebung in Wien 2010	151
Darstellung 2-4: Anteile von LoS-A*, LoS-C* und LoS-E* je nach Straßenkategorie und Nutzfahrzeugklasse im Zeitfenster des zugehörigen Mustertransportlaufes	152
Darstellung 2-5: Angenommenes Geschwindigkeitsprofil für Level of Service C* auf Hochleistungsstraßen	154
Darstellung 2-6: Angenommenes Geschwindigkeitsprofil für Level of Service C* für Straßenkategorien II und III	155
Darstellung 2-7: Geschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Level of Service für die zweite Simulation	156
Darstellung 2-8: Schema der Antriebskonfigurationen für hybridisierte bzw. elektrifizierte Fahrzeuge	159

Darstellung 2-9: Profil der maximal möglichen Geschwindigkeiten (nach Kantenzügen) und Beladungszustand der N ₁ -KEP-Tour bei repräsentativem Level of Service	161
Darstellung 2-10: Exemplarisches Lastkollektiv des konventionellen Fahrzeugs N ₁ mit Dieselmotor	163
Darstellung 2-11: Motorleistung und Fahrgeschwindigkeit der N ₁ -KEP-Tour bei repräsentativem Level of Service	164
Darstellung 2-12: Antriebsleistungsbedarf der N ₁ -Tour für Plug-In-Hybrid-Fahrzeug für konventionelles und elektrisches Fahren	165
Darstellung 2-13: Rekuperationspotenziale (in kJ) von Hybrid-Nutzfahrzeugvarianten in Abhängigkeit von der maximalen Leistung des E-Motors für die N ₁ -KEP-Tour	166
Darstellung 2-14: Absolute Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO ₂ -Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N ₁ -KEP-Tour	172
Darstellung 2-15: Prozentuelle Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO ₂ -Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N ₁ -KEP-Tour	172
Darstellung 2-16: Profil der maximal möglichen Geschwindigkeiten (nach Kantenzügen) und Beladungszustand der N ₂ -LEH-Tour bei repräsentativem Level of Service	173
Darstellung 2-17: Motorleistung und Fahrgeschwindigkeit der N ₂ -LEH-Tour bei repräsentativem Level of Service	175
Darstellung 2-18: Antriebsleistungsbedarf der N ₂ -LEH-Tour für Plug-In-Hybrid-Fahrzeug für konventionelles und elektrisches Fahren	176
Darstellung 2-19: Rekuperationspotenziale (in kJ) von Hybrid-Nutzfahrzeugvarianten in Abhängigkeit von der maximalen Leistung des E-Motors für die N ₂ -LEH-Tour	177
Darstellung 2-20: Absolute Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO ₂ -Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N ₂ -LEH-Tour	180
Darstellung 2-21: Prozentuelle Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO ₂ -Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N ₂ -LEH-Tour	180
Darstellung 2-22: Profil der maximal möglichen Geschwindigkeiten (nach Kantenzügen) und Beladungszustand der N ₃ -ZZG-Tour bei repräsentativem Level of Service	181
Darstellung 2-23: Motorleistung und Fahrgeschwindigkeit der N ₃ -ZZG-Tour bei repräsentativem Level of Service	183
Darstellung 2-24: Rekuperationspotenziale (in kJ) von Hybrid-Nutzfahrzeugvarianten in Abhängigkeit von der maximalen Leistung des E-Motors für die N ₃ -ZZG-Tour	184
Darstellung 2-25: Absolute Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO ₂ -Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N ₃ -ZZG-Tour	188
Darstellung 2-26: Prozentuelle Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO ₂ -Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N ₃ -ZZG-Tour	188
Darstellung 2-27: Energie-Reduktionspotenziale im Ranking nach Ausgangsvarianten (Antrieb mit Diesel oder CNG) und nach Mustertransportläufen N ₁ , N ₂ und N ₃	192
Darstellung 2-28: Emissions-Reduktionspotenziale im Ranking nach Ausgangsvarianten (Antrieb mit Diesel oder CNG) und nach Mustertransportläufen N ₁ , N ₂ und N ₃	193
Darstellung 3-1: Volumenbedarf verschiedener Kraftstofftypen	204
Darstellung 3-2: Fazit: Kostentrends und Kostenrisiken	231
Darstellung 3-3: Bewertungsmatrix Kraftstoffe/Antriebsenergien	233

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Entwicklung der EURO-Abgasnormen für Lkw mit mehr als 3,5 t Gesamtgewicht	35
Tabelle 1-2: EURO-Abgasnormen für Eisenbahntriebfahrzeuge	36
Tabelle 1-3: EURO-Abgasnormen für Motorgüter- und Schubschiffe	37
Tabelle 1-4: Fossile Kraftstoffe und Wasserstoff im Vergleich der Energiedichte	43
Tabelle 1-5: E-Ladestationen nach Bundesländern und Verfügbarkeit	54
Tabelle 1-6: Leistungsmerkmale des E-Cobus	57
Tabelle 1-7: Leistungsmerkmale des DAF LF Hybrid	57
Tabelle 1-8: Leistungsmerkmale des E-Force	58
Tabelle 1-9: Leistungsmerkmale der alternativen Nutzfahrzeugmodelle von Fiat	59
Tabelle 1-10: Leistungsmerkmale der alternativen Nutzfahrzeugmodelle von IVECO	60
Tabelle 1-11: Leistungsmerkmale des MAN Lions City	62
Tabelle 1-12: Leistungsmerkmale der alternativen Nutzfahrzeugmodelle von Mercedes-Benz	64
Tabelle 1-13: Leistungsmerkmale des Opel Combo	65
Tabelle 1-14: Leistungsmerkmale der Elektro-Lieferfahrzeuge Peugeot Partner und Citroën Berlingo	65
Tabelle 1-15: Leistungsmerkmale der alternativen Nutzfahrzeugmodelle von Renault	66
Tabelle 1-16: Leistungsmerkmale der alternativ betriebenen Schwerfahrzeuge von Scania	67
Tabelle 1-17: Leistungsdaten des E-Citybus der Wiener Linien	68
Tabelle 1-18: Leistungsmerkmale der Smith-Electric-Fahrzeugfamilien Edison und Newton	69
Tabelle 1-19: Leistungsdaten des Prototypen Solarbus	70
Tabelle 1-20: Leistungsmerkmale des Solaris.Urbino Bus	70
Tabelle 1-21: Leistungsmerkmale der VW-Caddy-Familie Eco Fuel	71
Tabelle 1-22: Leistungsmerkmale der Volvo Erdgas-Schwerfahrzeuge	72
Tabelle 1-23: Binnenschiffahrtstypen (ohne Schubverbände) auf der Donau im Einsatz	84
Tabelle 1-24: Inputfaktoren für die Fahrdynamik	99
Tabelle 1-25: Straßenkategorien und deren maximale Lkw-Fahrgeschwindigkeiten	100
Tabelle 1-26: Urbane Straßenkategorien nach dem Highway Capacity Manual 2000 und deren Bereich frei wählbarer Fahrgeschwindigkeiten	101
Tabelle 1-27: Zusammenhang des Levels of Service und gefahrener mittlerer Geschwindigkeiten im urbanen Straßennetz	102
Tabelle 1-28: Zusammenhang der Längen von Streckenabschnitten (Kanten) und gefahrener mittlerer Geschwindigkeiten im urbanen Straßennetz	102
Tabelle 1-29: Lauflängen der Kantengliederung relevanter Straßenzüge im Raum Wien (li.) und der Referenzstrecke (re.)	120
Tabelle 1-30: Kenndaten der Kantenzüge der Referenzstrecke Wr. Neudorf IZ NÖ-Süd nach Wien-16	124
Tabelle 1-31: Kraftstoffverbrauch nach Level of Service und Fahrzeugklasse mit und ohne Höhenprofil des Laufweges	139
Tabelle 2-1: Kfz/h _{THEO} je nach Straßenkategorie und Anzahl der Fahrstreifen	147
Tabelle 2-2: Berechnung der Übergänge von LoS-A* auf LoS-C* und LoS-C* auf LoS-E* ausgehend von Kfz/h _{THEO} bei einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn	148
Tabelle 2-3: Fahrgeschwindigkeiten in der Gleitphase je nach v _{zulässig} , LoS und Nutzfahrzeugklasse	156
Tabelle 2-4: Fahrzeugvarianten und Komponenten nach Systemleistungsparametern für die N1-KEP-Tour	162
Tabelle 2-5: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei Dieselfahrzeugen, Hybrid- und Elektrofahrzeugen für N1-KEP-Tour	168
Tabelle 2-6: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei CNG-Fahrzeugen, Hybrid- und Elektrofahrzeugen für N1-KEP-Tour	170
Tabelle 2-7: Fahrzeugvarianten und Komponenten nach Systemleistungsparametern für die N2-LEH-Tour	174
Tabelle 2-8: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei Dieselfahrzeugen, Hybrid- und Elektrofahrzeugen für N2-LEH-Tour	178
Tabelle 2-9: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei CNG-Fahrzeugen, Hybrid- und Elektrofahrzeugen für N2-LEH-Tour	179
Tabelle 2-10: Fahrzeugvarianten und Komponenten nach Systemleistungsparametern	182
Tabelle 2-11: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei Dieselfahrzeugen und Hybrid-Varianten für N3-ZZG-Tour	186
Tabelle 2-12: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei CNG-Fahrzeugen und Hybridfahrzeugen für N3-ZZG-Tour	186
Tabelle 2-13: Indikatorentafel zu den Effekten auf Energieverbrauch und Emissionsmenge für die Mustertransportläufe	189
Tabelle 2-14: Basisdaten für den verkehrslogistischen Vergleich der Fahrzyklus-Simulationen	194
Tabelle 2-15: Verkehrslogistischer Energieverbrauchsindikator zum Vergleich der Fahrzyklus-Simulationen am Beispiel der Diesel-Basisvariante (ohne Reduktionsmaßnahmen und ohne Hybridisierung)	195
Tabelle 2-16: Verkehrslogistischer Energieverbrauchsindikator zum Vergleich der Fahrzyklus-Simulationen am Beispiel des geringsten Energieverbrauchs je Nutzfahrzeugkategorie (Best-Varianten)	195
Tabelle 2-17: Verkehrslogistischer CO ₂ -äquivalenter Emissionsindikator zum Vergleich der Fahrzyklus-Simulationen am Beispiel der Diesel- und der CNG-Basisvarianten	196

Tabelle 2-18: Verkehrslogistischer CO ₂ -äquivalenter Emissionsindikator zum Vergleich der Fahrzyklus-Simulationen am Beispiel der geringsten CO ₂ -äquivalenten Emissionen je Nutzfahrzeugkategorie (Bestvarianten)	197
Tabelle 3-1: Fazit: Kosten und Risiken - Diesel vs Alternativen	232

Executive Summary

Die vorliegende F&E-Dienstleistung spannt einen thematischen Bogen auf, der ausgehend von den Vorbedingungen, die den Gütertransport von seiner logistischen Aufgabenstellung her beschreiben, über jene Rahmenbedingungen, die die Teilnahme der Nutzfahrzeuge im werktäglichen Verkehrsgeschehen erfassen, um mit diesem Daten-Input Simulationen der Fahrdynamik von Nutzfahrzeugen vorzunehmen, bis zur Quantifizierung von verkehrsökologischen Effekten und zur Ableitung von verkehrslogistischen Gestaltungsmöglichkeiten reicht.

Mit diesem Vorhaben der methodischen Integration von logistikorganisatorischen, verkehrsplanerischen und fahrzeugtechnischen Zugängen, um Optionen für eine nachhaltigere Gestaltung der Gütermobilität auszuloten, wurde gewissermaßen Neuland betreten. Dieser interdisziplinäre Brückenschlag kann mit dem Oberbegriff „Verkehrslogistik“ trefflich bezeichnet werden.

Die im Projekttitel angesprochenen Wirkungspotenziale werden im Kontext der EFLOG-F&E-Dienstleistung in Hinblick auf verkehrsökonomische und verkehrsökologische Effekte verstanden, die sich in der Erfüllung der zentralen Ziele „Reduktion des Energieverbrauches“ und „Reduktion der CO₂-äquivalenten-Emissionen“ ausdrückt. Zu dieser Zielerreichung trägt eine Fülle von Einflussfaktoren bei, die es modellhaft anhand von Mustertransportläufen abzubilden galt, um sodann in Fahrzyklen-Simulationen, als Herzstück der vorliegenden Arbeit, die genannten Effekte für verschiedene herkömmliche, am Stand der Technik befindliche Antriebe und für alternative, in unterschiedlichen technologischen Reifestadien befindliche, aber mittelfristig (bis 2020) einsetzbare Antriebs- bzw. Fahrzeugvarianten zu berechnen.

Die Auswahl der Logistikprozesse, die den Mustertransportläufen zugrunde gelegt wurden, sollte Versorgungsaufgaben betreffen, die regelmäßig, werktäglich und letztlich überall, wo eine breite Güternachfrage besteht, erfüllt werden. In Korrespondenz mit den Nutzfahrzeugmustern der Klassen N₁, N₂ und N₃ wurden daher eine Tour für einen Kurier-, Express- und Paketdienst (N₁-KEP-Tour) zur Zustellung von Kleinsendungen an beliebige Adressen (Points of Deliveries) in einem städtischen Zustellrayon, eine Tour für die Belieferung von Filialen des Lebensmitteleinzelhandels (Points of Sale) in einem dicht bebauten Stadtteil (N₂-LEH-Tour) und eine Tour zur Zulieferung eines industriell gefertigten Standard-Produktes von einer innerstädtischen Produktionsstätte zu einem Warenempfangslager eines Großabnehmers im Umland (N₃-ZZG-Tour) ausgewählt.

Erstens konnte damit ein Gutteil von Gütertransporten im Ballungsraum abgedeckt werden; zweitens lassen sich solche Güterverkehre auf einer gemeinsamen Zulaufstrecke in die Gütersenke bündeln, wie es der Realität zwischen dem Wirtschaftsgürtel südlich von Wien und den Außenbezirken der Metropole entspricht, und drittens sind in den genannten Ziel- und Quellgebieten der Warentransporte die Standorte der Ausliefer- und Empfangsläger (diesfalls der Raum Industriezentrum Niederösterreich Süd) sowie in den Bedienräumen die Points of Delivery und Points of Sale (diesfalls der 16. Wiener Bezirk) mit einer Dichte vertreten, dass auf konkrete Unternehmen nicht Bezug genommen werden musste.

Dabei galt das Bemühen der Herstellung von größtmöglicher Repräsentativität, ohne sich auf breite statistische Absicherungen, wie privatwirtschaftliche Fahrzeugdaten, stützen zu können. Es war ein „Glücksfall“, dass auf Grundlage der letzten Wiener Gesamtverkehrserhebung 2010 eine Auswertung der Verkehrsstärken im Tageszeitgang von 60 Zählstellen vorlag, die es ermöglichte, ein realitätsnahes Bild der Verkehrszustände mittels des Verkehrsqualitätsindikators Level of Service und dessen Auswirkung auf die Fahrdynamik der Mustertransportläufe zu entwerfen.

Die Fahrzyklen-Simulationen wurden in zwei Stufen durchgeführt, um Erfahrungen mit der Modellierung der verkehrslogistischen Randbedingungen und mit der Interpretation der Ergebnisse, beispielsweise in der Darstellung der Motorkennfelder, zu gewinnen. In der ersten Fahrzyklen-Simulation wurden die drei Mustertransportläufe mit Fahrzeugen auf dem Stand der heutigen Technik (Dieselantrieb) in Hinblick auf ihren Kraftstoffverbrauch berechnet, wobei die Topographie des Laufweges berücksichtigt und drei Stufen der Verkehrsqualität unterschieden wurden. Dabei hat es nicht überrascht, dass eine mittlere Verkehrsqualität im Straßennetz dem Güterverkehr am besten entgegenkommt und die Extreme (freier Verkehrsablauf bzw. stockender Verkehr) den Kraftstoffverbrauch erhöhen.

In der zweiten Simulation wurden alle für die jeweiligen Nutzfahrzeugklassen mittelfristig in Frage kommenden Antriebsvarianten der Hybridisierung und Elektrifizierung ausgehend von diesel- oder gasangetriebenen Basisvarianten in Hinblick auf ihren Energieverbrauch und ihre CO₂-äquivalenten Emissionen simuliert. Das diesbezügliche Reduktionspotenzial hat sich schlussendlich als beachtlich herausgestellt. Verfeinert wurde auch der Daten-Input bei den Randbedingungen, indem für die Logistikprozesse übliche Zeitfenster für die tägliche Belieferung festgelegt wurden und für diese dann ein repräsentativer Mix von Verkehrsqualitäten im Tourenverlauf für die Fahrdynamik zugrunde gelegt worden ist. Die Ergebnisse der Fahrzyklen-Simulationen lassen in Zukunft erhebliche Verbesserungspotenziale erwarten, wenn die Marktfähigkeit der alternativen Antriebssysteme im Angebot der Nutzfahrzeugmodelle für die fuhrparkbetreibenden Unternehmen hergestellt werden kann. Schon kleinere technologische Maßnahmen, wie die Start-Stopp-Funktion (Micro Hybrid), können über alle Nutzfahrzeugklassen zwischen 11 % und 39 % Reduktionspotenzial beim Energieverbrauch erzielen. Ein hoher Hybridisierungsgrad von Nutzfahrzeugen mit einem Dual-Energy-Concept, das konventionelles mit elektrischem Fahren kombinieren lässt, könnte sogar bis zu 75 % Energieeinsparung erbringen, wenn man die derzeitigen Anschaffungskosten für ein solches Nutzfahrzeug ausblendet. In Hinblick auf Energieeffizienz und mit dem Vorteil von Nullemission sind reine Elektrofahrzeuge kaum zu übertreffen, aber ihre Einsatzfähigkeit ist, sowohl was die Fahrzeuggröße als auch die Einsatzreichweite betrifft, für Güterverkehre noch eng begrenzt.

Auf die Aspekte der speziellen Einsatzbedingungen für die Elektromobilität im Güterverkehr wird an passenden Stellen hingewiesen. Dabei wirken das Gewicht der Batterie reduzierend auf die Nutzlastkapazität im Fahrzeug und die Speicherkapazität limitierend auf die Einsatzreichweite. Daher stellt sich bis auf weiteres die Frage einer zweckmäßigen Ladeinfrastruktur auch außerhalb des Betriebsmittelpunktes eines E-Fuhrparks. Das Rekuperationspotenzial (Energierückgewinnung während des Transportlaufes) ist wiederum ein Argument für den Einsatz entsprechender Hybridfahrzeuge, ebenso wie die Möglichkeit, in sensiblen Zonen eine gewisse Strecke emissionsfrei zurücklegen zu können.

Die in den Fahrzyklen-Simulationen errechneten Effekte sind somit ein Produkt aus komplexen Wechselwirkungen, die sich aus der Verbindung der logistischen Einsatzplanung der Nutzfahrzeuge mit der

Ermittlung der typischen Befahrungsbedingungen in den von den Touren frequentierten Straßen sowie mit den antriebstechnologischen und nutzlastkapazitiven Eigenschaften der Nutzfahrzeugvarianten ergeben. Sie beziehen sich auf Mustertransportläufe, wie sie als Güterverkehre regelmäßig und in großer Zahl stattfinden, sodass die Effekte mit ihren Quantitäten unter bestimmten Voraussetzungen verallgemeinert oder aggregiert werden können.

Zur Aktivierung der erkannten Reduktionspotenziale können erstens technologische Maßnahmen am Nutzfahrzeug ansetzend, wie beispielsweise beim Antriebsstrang, bei der Energie- bzw. Kraftstoffversorgung, der Energiespeicherung und beim Fahrwiderstand, zweitens die Gestaltung des logistischen Einsatzes des Fuhrparks, drittens die unternehmerische Standortwahl als Quellen und Ziele der Güterverkehrsrelationen sowie viertens die Verkehrsorganisation in den Verkehrswegenetzen und ein zeitnahes Verkehrsmanagement beitragen. Damit sind grundsätzlich alle Entscheidungsbereiche, die Güterverkehre realisieren und ihre Abwicklung wesentlich beeinflussen, in der Modellannahme der Mustertransportläufe einbezogen worden.

Für eine erweiterte Interpretation der Effekte neuer Antriebstechnologien auf den Güterverkehr war es nützlich, eine Vergleichbarkeit auch zwischen den Mustertransportläufen derart herzustellen, dass die im Straßennetz bewegten Fahrzeugmassen in Tonnenkilometern als Maßstab hergenommen wurden. Damit kann deutlich gemacht werden, welcher energie- und emissionsrelevante Transportaufwand für die Erfüllung von logistischen Transportleistungen erforderlich ist und wo in diesem Verhältnis Verbesserungspotenziale stecken.

In einem nachfolgenden Schritt sollte der verkehrsträgerübergreifende Vergleich im „Landverkehr“ geschärft werden. Dazu wurde eingangs der F&E-Dienstleistung die Ausgangslage in Hinblick auf die fahrzeugtechnologischen Entwicklungsaspekte für den Schienengüterverkehr, die Binnenschifffahrt und den Luftfrachtverkehr, sofern dieser als Konkurrent auf kürzeren kontinentalen Relationen auftritt, in Kürze beschrieben.

Für die Umstellung von Fahrzeugflotten sind Kriterien der Wirtschaftlichkeit unabdingbar zu beachten. Sie stellen die angebotenen Fahrzeugmodelle auf den Prüfstand der Innovationsdurchsetzung. Am Fahrzeugmarkt werden vor allem bei den kleineren Nutzfahrzeugen schon Modelle angeboten, die sich technisch aus dem Pkw-Angebot ableiten. Bei schweren Nutzfahrzeugen ist das Angebot noch auf Einzelmodelle und Prototypen beschränkt, die für die Frühankunft entwickelt worden sind. Der städtische Busverkehr kann aber beispielgebend sein, um auch ähnliche stadtdienliche Nutzenanwendungen für die City-Logistik und bestimmte kommunale Ver- und Entsorgungsdienste zu konzipieren.

Schließlich dürfen auf längere Sicht die Perspektiven auf den Energiemärkten nicht aus dem Auge verloren werden, denn die globale Nachfrage der Energieverbraucher, darunter die der aufkommenden Industrieländer, wie China, Indien, Brasilien u.a.m., ist im Steigen begriffen und birgt Preis- und in manchen Segmenten auch Versorgungsrisiken bei den herkömmlichen Kraftstoffen in sich.

Alles in allem soll die künftige Gütermobilität nachhaltiger gestaltet werden, um die Energieabhängigkeit besser zu beherrschen, die lokale Umwelt von negativen Effekten des Güterverkehrs zu entlasten und die Klimaziele seitens des Verkehrs doch noch zu erfüllen, indem die technologischen und innovatorischen Potenziale dafür optimal genutzt werden.

1. STATUS-QUO-ANALYSE

1.1 Verkehrsträger und Verkehrsmittel im Güterverkehr

1.1.1 Vorbedingungen und Perspektiven der Güterverkehrssysteme für Europa

1.1.1.1 Schlüsselbegriffe und ihre Deutung in dieser F&E-Dienstleistung

Der Begriff Güterverkehr beinhaltet die Bewegungen von, dem Gütertransport dienenden, Nutzfahrzeugen in den Verkehrsträgernetzen unabhängig von ihrem Beladungszustand. Darin liegt ein feiner Unterschied zwischen den Auffassungen von TransportwirtschaftlerInnen klassischer Schule und von VerkehrsplanerInnen. Für erstere steht das transportierte Gut und die logistische Transportqualität (kostengünstig, zeitgerecht,...) im Fokus, für letztere ist die Verkehrsgenerierung in den Netzen mit ihren Effekten auf das Verkehrsgeschehen und den Ressourcenverbrauch der Ausgangspunkt der Befassung.

Wird des Weiteren das Zusammenwirken von Fahrzeugen, Verkehrsinfrastruktur und verladenden Standorten (im Versand und Empfang der Güter) sowie den Service-Standorten der Operateure in die Betrachtung miteinbezogen, kommen die Laufleistungen und die Begleitumstände der Verkehrsteilnahmen der Güterfahrzeuge (z.B. angezeigt durch anteilige Verkehrsstärken in Netzabschnitten und für Zeiträume bestimmter Verkehrsqualität) sowie damit verbundene externe Effekte ins „Spiel“ des Verkehrsgeschehens.

Legt man die Warenströme auf die Nutzlastkapazitäten der Güterverkehrsmittel um, werden Effizienzkriterien, hauptsächlich ausgedrückt in betriebswirtschaftlichen Kosten, bestimmend, die, wenn es eine realistische Auswahl an Transportmodi gibt, zur grundsätzlichen Verkehrsmittelauswahl führen. Erst dann entscheidet sich in der Routenplanung und Fahrzeugdisposition, wie welche Relationen bedient werden. In der gewählten Transportkette ist schließlich das Verhältnis zwischen Transportaufwand (ausgedrückt in Tonnenkilometern bewegter Fahrzeugmasse einschließlich der Bereitstellung der Verkehrsmittel) und der entgeltlichen Transportleistung (ausgedrückt in Tonnenkilometern Nutzlast von der Quelle ins Ziel) ein Thema für logistische und technologische Veränderungen. Diese sind im Hinblick auf Verbesserungen zwar zielegeleitet, in der Praxis des Transportgeschäftes aber in der Regel extrem wettbewerbs- und kundengetrieben.

Der Begriff Güterverkehr repräsentiert in dieser F&E-Dienstleistung ein leistendes System, dessen zusammenwirkende Teilsysteme Fahrzeugantriebstechnologie und Fahrzeugmuster, die Verkehrsinfrastruktur mit Schwerpunkt auf dem hierarchisch aufgebauten Straßennetz und die logistischen Dienstleistungen zur täglichen Versorgung der Gütersenke hauptsächlich in den Zusammenhang gestellt werden.

Der Begriff Gütermobilität ist als Pendant zur Personenmobilität in die Fachdiskussion eingeführt worden. In der Personenmobilität beschreibt „Mobilität“ die von Daseinsfunktionen des Menschen ausgehenden Bedürfnisse nach Ortsveränderungen und ein mehr oder minder selbstbestimmtes Verhalten der Personen, die sich statistisch hinreichend zu verhaltenshomogenen Gruppen clustern lassen. In der Gütermobilität ist es die Nachfrage auf den Gütermärkten bzw. der Bedarf in den Gütersenken, die Güterverkehre auslösen.

1.1.1.2 Strukturwandel in der Logistik und im Gütertransport als Triebkräfte

Der Bedarf an zukunftsfähiger Fahrzeugtechnologie folgt verschiedenen Entwicklungstreibern. Ist eine Nachfrage nach bestimmten technologischen Lösungen auf der Seite der verladenden und transportierenden Wirtschaft gegeben, werden sich diese als Innovationen verbreiten. Auslöser solcher Innovationsdiffusionen können sein:

- der zunehmende Wettbewerb und Verhaltensänderungen auf den Gütermärkten und auf den Märkten der Logistikdienstleister, insbesondere wenn neue Marktteilnehmer auftreten
- Verschärfungen der Umweltvorschriften und Verkehrsregulierungen wegen Umweltbelastungen und Akzeptanzproblemen
- Zunehmende Engpasssituationen in der Verkehrsinfrastruktur
- längerfristig unter Umständen das Energie-Risiko

Diesen vielschichtigen Kontext kann man mit dem Begriff Verkehrslogistik umschreiben (BVL, 2014). Nachfolgend werden einführend drei solcher Phänomene herausgegriffen, die beispielhaft auf die globalen, regionalen und lokalen Rahmenbedingungen für Trends in der Güterverkehrsentwicklung hinweisen.

□ Entwicklungs- und Verkehrstreiber Welthandel und Seeschifffahrt

In globaler Betrachtung treibt der Welthandel die Schiffsbauindustrie vor allem in Ostasien zu einer stetigen Steigerung der Containerladekapazitäten an. Der weitgehend automatisierte Umschlag in den Welthäfen soll in 24 h durchgeführt und die Container so rasch wie möglich ins Hinterland verfrachtet werden (und vice versa). Immer mehr wird die Verkehrsinfrastruktur zur kontinentalen Verteilung bzw. Bündelung der Warenströme zu einem Engpass-Problem. Die neueste Schiffsgeneration befördert 18.000 TEU und für deren Weiterbeförderung sind ungefähr 180 Ganzzüge oder 9.000 Lkw-Fuhren nötig. Das Containerumschlag-Aufkommen des Hamburger Hafens kann zu ca. 32 % von der Bahn und zu ca. 10 % von Feeder-Schiffen bewältigt werden, aber rund 60 % muss über die Straße abgewickelt werden. Der Druck auf die Leistungsfähigkeit aller Transportmodi im Hinterlandverkehr erhöht sich, sodass längere und schwerere Züge (derzeit 840 m Zuglänge Richtung Skandinavien, 1.000 m werden auf Rail Freight Corridors in Aussicht genommen, mit doppellagigen Containertragwagen wird experimentiert) und der Lang-Lkw für 3 TEU statt 2 TEU im Flachlandverkehr von der Transportwirtschaft angestrebt werden (HAFEN HAMBURG, 2013).

Abbildung 1-1: Seehäfen als globale Gateways, Rangierbahnhöfe als kontinentale Verteiler und Kombi-Terminals als regionale Hubs im Seehafen-Hinterlandverkehr



Bilder: arp (Hamburg-Tollerort 2012, Rbf. Maschen 2012, WienCont-Terminal Freudenu 2008)

❑ Verkehrliche Konsequenzen der Binnenmarkt-Integration

Die Binnenmarktintegration der EU ist aufgrund des freien Waren- und Kapitalverkehrs, der Liberalisierung der Transportmärkte und des Infrastrukturzuganges, vor allem im Schienennetz, sowie durch die gezielte Kofinanzierung des Ausbaues der Verkehrskorridore, darunter vor allem der Autobahnnetze in den seit dem Jahr 2000 beigetretenen Mitgliedsstaaten, weit fortgeschritten.

Begleitet wurde diese Infrastrukturoffensive von Projekten zur Schaffung neuer Logistik- und Wirtschaftsparks, die von Neuansiedlern zur Entwicklung der emergenten Märkte in den jüngeren Mitgliedsstaaten genützt werden. Dadurch werden transregionale Arbeitsteilungen zur Ausnutzung komparativer Kostenvorteile oder zur qualifizierten Produktionskapazitätserweiterung, z.B. in der Automotivindustrie, ermöglicht. Diese wirtschaftliche Dynamik geht tendenziell rascher vor sich, als dass die Verkehrswegenetze darauf, nämlich auf die Nachfrage nach neuen Transportrelationen zwischen den Wirtschaftsräumen, vorbereitet werden können. Dabei ist der Straßengüterverkehr um ein Vielfaches reagibler als es die traditionsbehafteten staatsnahen Bahnunternehmen in Europa sind.

Das Verkehrsträgersystem Schiene muss sowohl infrastrukturseitig technisch ertüchtigt werden, was mitunter den Ausbau bislang vernachlässigter Korridore oder von Alternativrouten zu dicht mit Personenverkehr belegten Strecken betrifft, als auch den teilweise veralteten Fahrzeugbestand ersetzen. Des Weiteren ist die Harmonisierung der national zersplitterten technischen Spezifikationen als Voraussetzung zur Interoperabilität zu meistern. Im Verkehrsträgersystem Straße sind es die in die Jahre gekommenen Autobahnstrecken, deren Kunstbauten zu erneuern, deren Rast- und Ruheplätze zu modernisieren und deren Kapazität durch Zulegung von Fahrstreifen an die Verkehrsnachfrage anzupassen sind. Daran anschließend können die Zukunftstechnologien für eine gesteuerte Verkehrsabwicklung, die mit den Fahrzeugen im Verkehrsfluss interagieren, installiert werden.

Abbildung 1-2: Wirtschaftsparks und Neuansiedler (KEP-Dienste, Automotivzulieferer) in Aufbruchregionen



Bilder: arp (li. u. mi.: Wroclaw, Polen 2014, re.: Güterverkehrszentrum Leipzig-Wahren, 2012)

Die Abbildung 1-2 verdeutlicht am Beispiel eines neu erschlossenen Wirtschaftsparks bei Wroclaw (Breslau), der am Autobahnring der Stadt liegt, aber an die vorbeiführende Hauptbahn nicht angeschlossen wurde, und eines Güterverkehrszentrums und Wirtschaftsparks bei Leipzig, die einen KV-Terminal aufweisen, die manchmal widersprüchliche Infrastrukturpolitik mit Konsequenzen auf die Güterverkehrsentwicklung. Beide Wirtschaftsparks tauschen im Automotiv-Bereich Güter aus.

□ Die Ver- und Entsorgung der Gütersenke Großstadt als verkehrslogistisches Phänomen

Die Versorgung der Gütersenke Ballungsraum bzw. Großstadt mit

- Gütern des regelmäßigen Bedarfs (gut unter Lebensmitteleinzelhandel – LEH – zu subsummieren)
- Gütern des dringenden Bedarfs (unter Kurier-, Express- und Paketdienste subsummierbar)
- und die Entsorgung zu deponierender oder wiederverwertbarer fester Stoffe (Wertstoffrecycling)

gelten unstrittig als stadtdienliche Logistikaufgaben, deren Lieferstationen (Anfahrpunkte im Netz) eine Feinverteilung erfordern, die gegenwärtig nur auf dem städtischen Straßennetz erfüllt werden kann. Dass aber der Trend zur Monomodalität, also die gesamte Transportkette auf der Straße sowohl im Fernlauf als auch im Verteilverkehr abzuwickeln, scheinbar ungebrochen fortschreitet, wurde schon in einer vorangegangenen F&E-Dienstleistung (BMVIT, 2011) thematisiert. Die dadurch steigenden Fahrleistungen im Straßengütertransport, auch angeregt durch die Hinausverlagerung von Logistik-Zentrallägern in das Umland der Städte, geben zu Überlegungen Anlass, künftig eine emissionsverminderte Bedienung der Innenstädte durch entsprechende Fahrzeuge zu forcieren und das Verkehrsregime in den Stadtregionen darauf auszurichten. Die Nutzfahrzeuge schwerer, länger und höher zu dimensionieren, wird die Lebensqualität in den Ballungsräumen sicherlich nicht heben. Der Verlust an Multimodalität und die Vergeudung von bimodalen Umschlagstandorten bleiben ein Thema, solange nicht die letzten Residuen der Bahnanbindungen endgültig beseitigt worden sind (HÖRL, WANJEK, 2014, DÖRR, 2014).

Abbildung 1-3: Ehemaliges innerstädtisches Güterbahnhofgelände am wiederhergestellten Südring in Berlin (li.) und innerstädtische Anlieferung mit Zentralachsanhängerzug in Paris (St. Lazare)



Bilder: arp (2012, 2008)

Die logistische Tourenplanung für die regelmäßige Warenversorgung hängt engstens ab:

- vom Filialisierungsgrad des Einzelhandels in den Innenstadtgebieten, wobei der Größenstruktur der Points of Sale (indiziert durch die zugelassene Verkaufsfläche) zusätzliche verkehrslogistische Relevanz in Hinblick auf die Lieferfrequenz, die Sendungsgrößen und damit für den Fahrzeugeinsatz zukommt.
- von den Zufahrtsbedingungen, sowohl was die allfällige Beschränkung des Lieferzeitfensters in Fußgängerzonen oder das Vorhandensein von Ladezonen nach der Straßenverkehrsordnung (StVO) als auch die individuellen Anfahrts- und Zustellbedingungen am Lieferpunkt betrifft. Die urbane Güterversorgung stellt eine planerisch schwierige Aufgabe dar, wie die Beispiele in Abbildung 1-4 verdeutlichen.

- von der Lage der Auslieferungsläger zu den Schwerpunkten der Gütersenke, an deren Standorten die Waren von den Fernläufen für die Verteiltouren zusammengestellt werden. Damit ist entweder ein Wechsel im Transportmodus (wie vom Sattelzug oder Zentralachsanhängerzug im Straßengütertransport, vom Schiebewandwagen oder Kühlcontainer im Bahnverkehr zur Lieferfahrzeugflotte) oder eben ein Wechsel im Nutzfahrzeug-Typ verbunden.
- Je weiter außerhalb der Konsumsenke diese Zentralläger angesiedelt sind, desto höher sind die Nachlauffahrleistungen, die sich außerdem zeitlich häufig mit dem individuellen Berufspendlerverkehr überlagern. Der Trend zur Nähe an den Autobahnringen und -kreuzen hat international die Stadt der langen Güterwege auf der Straße hervorgebracht. Auch die Metropolregion Wien bildet diesbezüglich keine Ausnahme, da die marktbeherrschenden Lebensmittelketten ihre Cross-Docking-Läger im Raum St. Pölten und im Wiener Becken situiert haben. Lediglich in Wien-Inzersdorf ist eine Lebensmittelkette mit einem Standort vertreten (DÖRR et al. 2010, HÖRL et al. 2011).

Abbildung 1-4: Innenstadtanlieferung zu einzelmem Point of Sale in Wien-Alsergrund und mit Sattelzug zum Trailertausch in zentraler Anlieferstation in der Fußgängerzone von Hannover



Bilder: arp (2013, 2012)

Abbildung 1-5: Zulaufrouuten A 23 und B 14 sowie Donauuferbahn zum trimodalen Terminal Wien-Freudenau

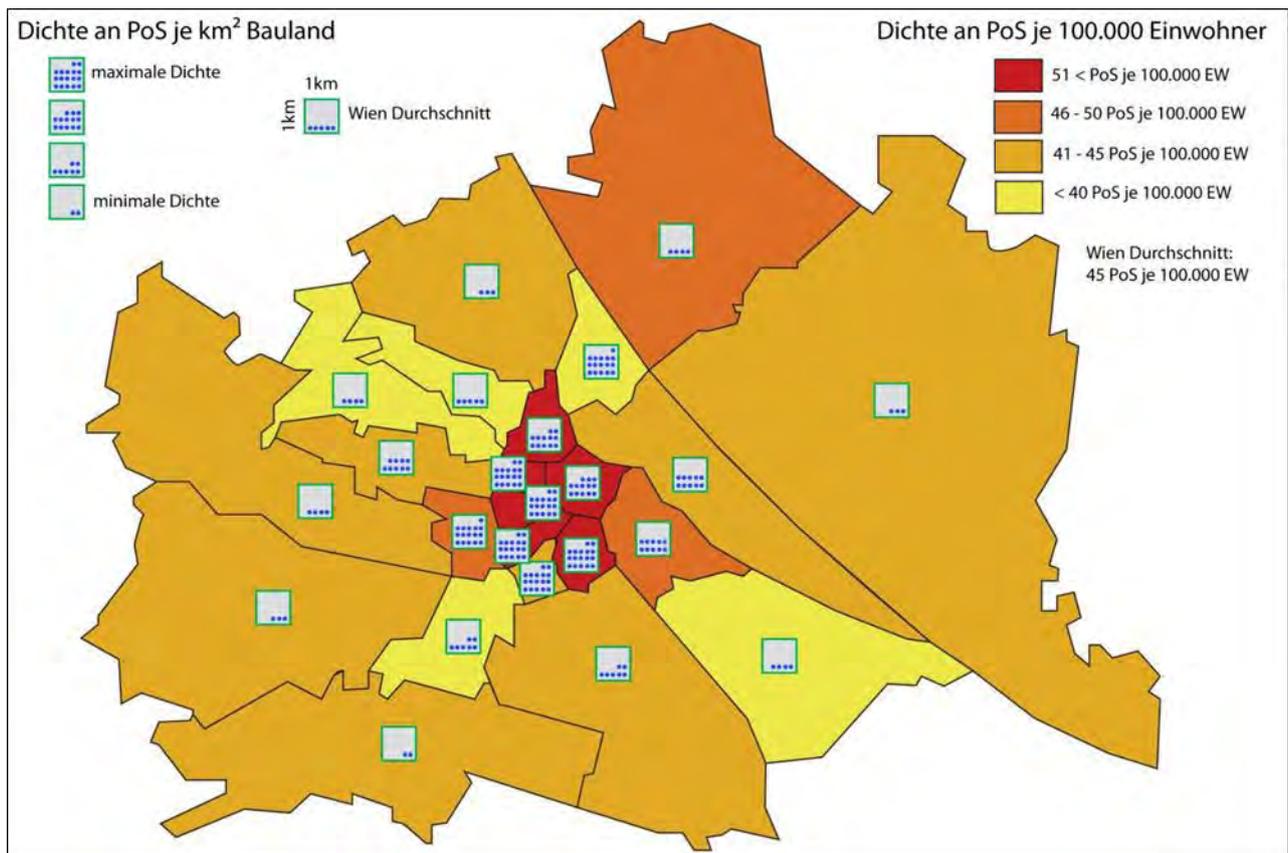


Bilder: arp (2013, 2010)

Das Bestreben, der Wohnbevölkerung eine gute Nahversorgung im Wohnumfeld in Hinblick auf Auswahl und Zugänglichkeit zu bieten, wird durch eine entsprechende Dichte an Points of Sale (PoS) gewährleistet. Eine hohe Dispersität, wie sie in österreichischen Städten durchwegs gegeben ist, bringt aber mit sich, dass

auf Größenvorteile am Verkaufsort tendenziell verzichtet werden muss, was häufigere Anlieferungen in nicht immer verkehrsgünstigen Situationen zur Folge haben kann. Die Konzentration der Nahversorgung in Einkaufszentren vor allem am Siedlungsrand begünstigt wiederum den motorisierten Individualverkehr und schließt nichtmotorisierte Bevölkerungsgruppen weitgehend aus, erleichtert aber andererseits die Warenanlieferung, die rationell projektiert und organisiert werden kann (TOIFL, 2013).

Darstellung 1-1: Die Verteilung der Points of Sale für die Gütersenke Lebensmitteleinzelhandel in Wien

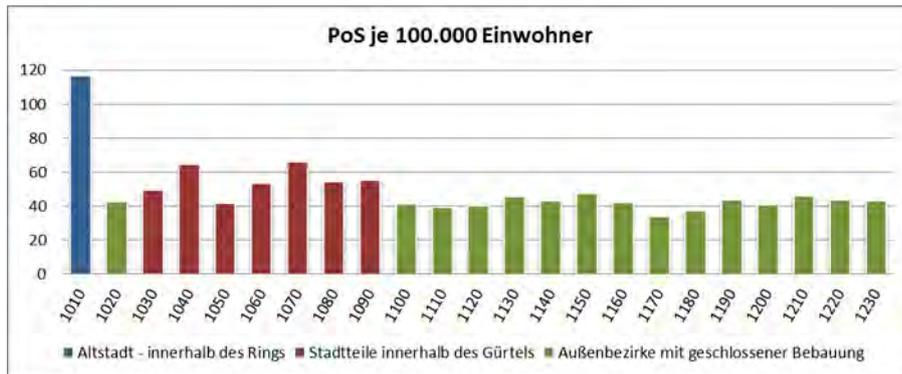


Quelle: eigene Bearbeitung (Toifl, arp) auf Grundlage der Filialfinder der Homepages des LEH

Die Darstellungen 1-1 bis 1-3 wurden anhand der Verkaufsorte der marktführenden Lebensmittelketten erstellt und verschaffen über die Nahversorgungsdichte pro EinwohnerIn (in Hinblick auf die Auswahl) und pro Fläche (in Hinblick auf die Zugänglichkeit) einen brauchbaren ersten Eindruck. Damit verknüpft sich ein Fingerzeig auf die Verkehrsgenerierung, denn solche PoS müssen täglich versorgt werden (z.B. mit Frischware) und je kleiner die Standorte sind, desto öfter müssen sie auch für haltbare Lebensmittel und Non-Food-Produkte beliefert werden und können außerdem häufig nicht mit Paletten bedient werden, weil die räumlichen Voraussetzungen es nicht zulassen (s. Abbildung 1-4, links).

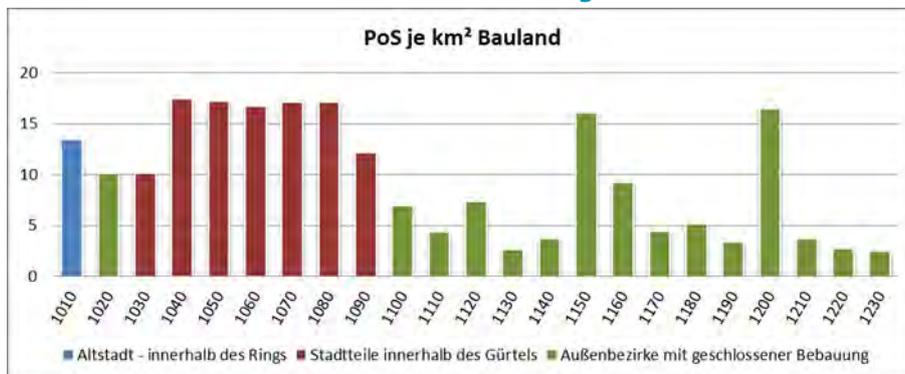
In diesen Fällen aber kommen kleinere Nutzfahrzeuge zum Einsatz, womit die Lieferfrequenz und die Fahrleistungen ansteigen. Welche Nutzfahrzeuge, die über genügend Nutzlast, Wendigkeit und Reichweite bei gleichzeitiger Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsminimierung verfügen, schon für den Einsatz bereit stehen und künftig eine maßgebliche Rolle bei der urbanen Güterversorgung spielen können, wird in den nachfolgenden Kapiteln thematisiert.

Darstellung 1-2: Nahversorgungsdichte im Lebensmitteleinzelhandel in Wien nach Bevölkerung und Stadtlage



Quelle: eigene Bearbeitung (Toifl, arp) auf Grundlage der Filialfinder der Homepage des LEH

Darstellung 1-3: Nahversorgungsdichte des Lebensmitteleinzelhandels in Wien im Bauland nach Stadtlage



Quelle: eigene Bearbeitung (Toifl, arp) auf Grundlage der Filialfinder der Homepage des LEH

Die Bewertungsansätze dazu müssen den Wechselwirkungen und den Zielkonflikten bei der Optimierung der Teilsysteme Standortpolitik, Logistikorganisation, Infrastrukturausstattung und Verkehrsmanagement gerecht werden.

1.1.1.3 Multimodales Angebot an Verkehrsinfrastrukturen

Die verladende und die transportierende Wirtschaft treffen je nach Landesnatur und Volkseinkommen auf recht unterschiedliche nationale und regionale Voraussetzungen in der Verkehrsinfrastruktur. Die mengenmäßige Aufteilung der Güterströme auf die verfügbaren Verkehrsträger (Transportmodi) spiegelt sich letztlich im Modal Split wider (s. Kap. 1.1.1.6). Die nachfolgenden Abbildungen geben einen groben Eindruck über diese verkehrsinfrastrukturell unterschiedlichen Ausgangslagen:

Solche Ländervergleiche sind jedoch vielschichtig und daher mit Vorsicht zu interpretieren. Die Situation der großräumigen Verkehrserschließung in Österreich ist topographisch am ehesten mit der Schweiz und in Hinblick auf die Handels- und Verkehrsverflechtungen vor allem mit Deutschland zu vergleichen. Setzt man die Ausstattung mit Autobahn- und Eisenbahn-Kilometern in Bezug zur Bevölkerung, so sind Österreich und die Schweiz auch in der Statistik benachbart. Deutschland hat durch die größeren Bevölkerungskonzentrationen um etwa ein Fünftel weniger Lauflängen pro Kopf als Österreich und dadurch auch häufigere und stärkere Engpassereignisse in den Verkehrsnetzen. Daher ist das Staumanagement, insbesondere in den Metropolregionen, ein permanentes Thema (s. Darstellung 1-4).

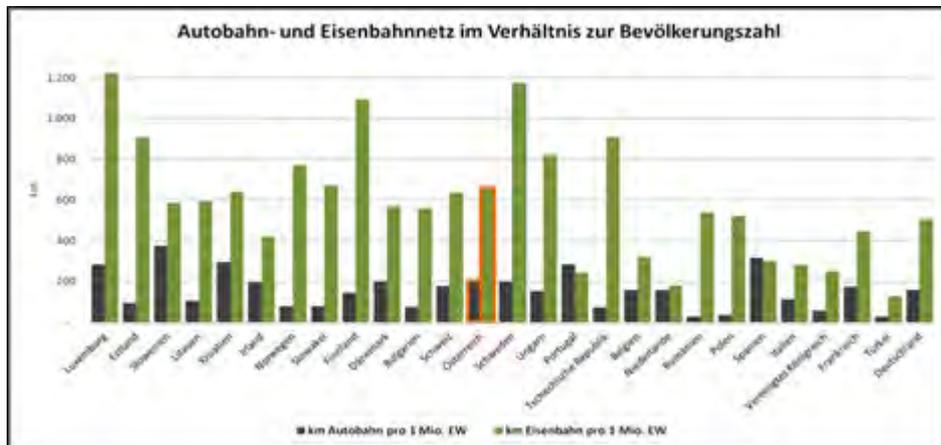
Wird die Erschließungsdichte in Bezug auf die Landesfläche betrachtet, so liegt Österreich bei der Eisenbahndichte etwa auf gleichem Niveau mit den Ländern überwiegend flacher Landesnatur, wie den Niederlanden, Dänemark, Polen oder dem Vereinigten Königreich, ist aber gegenüber der topographisch vergleichbaren Schweiz und gegenüber Belgien deutlich abgeschlagen. Auch Deutschland weist immer noch eine um 40 % höhere Schienendichte als Österreich auf (s. Darstellung 1-5). Freilich bedeutet eine hohe Flächenerschließung durch das Schienennetz für den Güterverkehr nicht zwangsläufig eine günstigere Ausgangslage, weil die intramodale Konkurrenz mit dem Personenverkehr um Infrastrukturressourcen zum Tragen kommt.

Bei der Flächenausstattung mit Autobahn-Kilometern liegt Österreich hinter Deutschland und der Schweiz, möglicherweise aber nur deshalb, weil die Bundes-Schnellstraßen als autobahnähnliche Verkehrswege in der europäischen Statistik nicht miteinbezogen worden sind.

Ein direkter Vergleich der jeweils nationalen Säulen von Autobahn- und von Eisenbahn-Lauflängen ist nicht unmittelbar aussagefähig, denn die Autobahnen repräsentieren nur die Spitzenklasse in der Straßennetzhierarchie, währenddessen das gesamte Schienennetz zugrunde gelegt ist. Dennoch gibt es einen gemeinsamen Nenner in dieser gekoppelten Darstellung und der betrifft die unterschiedliche Massenleistungsfähigkeit für Gütertransporte beider Verkehrsträger. Das gesamte Bahnnetz ist im Regelfall bis zur Letzten Meile massenleistungsfähig (bzw. sogar ganzzugfähig), während das in gleichem Maße für das Straßennetz in den untergeordneten Straßenkategorien nicht gelten kann. Die zahlreichen regionalen und lokalen Schwerverkehrsbeschränkungen zumindest in Österreich bestätigen diesen Umstand eindrücklich (DÖRR et al. 2010, 32).

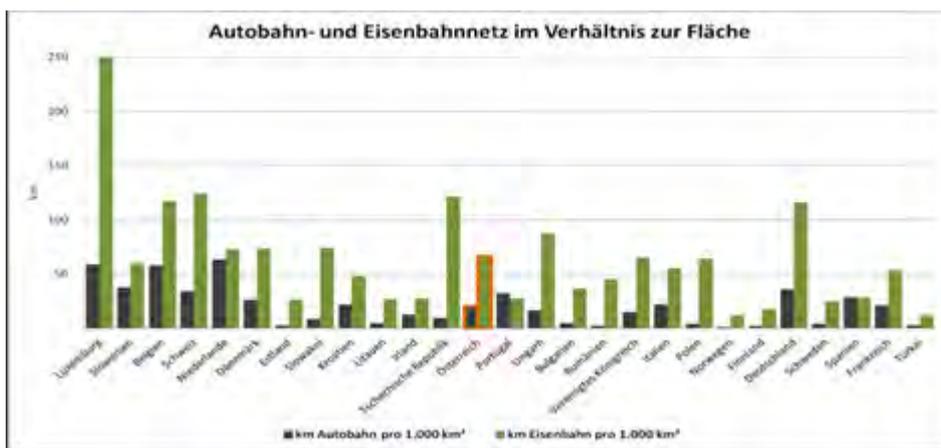
Der Anteil der elektrifizierten Eisenbahnstrecken weist auf das Angebot emissionsfreier Transportrouten hin (s. Darstellung 1-6). Der Binnenwasserweg fehlt wegen der für Österreich geringen Flächenerschließungsfunktion und der im nationalen Rahmen unwirtschaftlichen Transportdistanzen in dieser Aufstellung.

Darstellung 1-4: Autobahn- und Eisenbahnnetz im Verhältnis zur Bevölkerungszahl in der EU



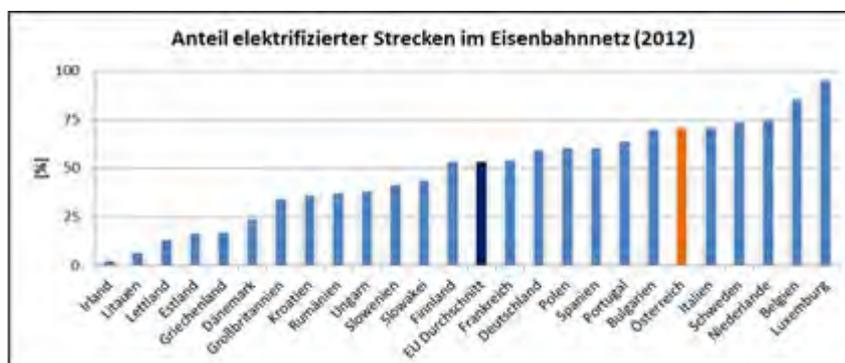
Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage EUROSTAT 2014¹

Darstellung 1-5: Autobahn- und Eisenbahnnetz im Verhältnis zur Fläche in der EU



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage EUROSTAT 2014²

Darstellung 1-6: Anteil der elektrifizierten Strecken im Eisenbahnnetz in der EU-28



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der EUROPÄISCHEN KOMMISSION 2014³

1.1.1.4 Straßeninfrastruktur und Nutzlastkapazitäten für den Straßengüterverkehr in Europa

Je höher in einem Land die Bevölkerungskonzentration auf Ballungsräumen ist und je bewegter die verkehrstopographischen Bedingungen sind, desto geringer wird der Pro-Kopf-Anteil von Straßenlänglen (s. Darstellung 1-7: Straßennetz im Verhältnis zur Bevölkerungszahl bzw. zur Landesfläche) sein. Desto gebündelter wird auf neuralgischen Routen der Straßenverkehr stattfinden und damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass zeitliche und streckenweise Engpässe im Straßennetz auftreten können. Bietet die Landesnatur homogen ebene Voraussetzungen, wie entlang der Nord- und Ostsee oder in der pannonischen Tiefebene, dann kann sich das Straßennetz regelmäßig und dicht entfalten, wie es in Belgien, den Niederlanden, in Ungarn, in großen Teilen Frankreichs oder in Dänemark der Fall ist (s. Darstellung 1-7, rechts). Dort ist eine problemlose Erschließung durch den schweren Güterverkehr in der Fläche und auch wegen der relativ geringen Distanzen, z.B. (außer Ungarn) von den Seehäfen ins Landesinnere, weitgehend gegeben. Gleichzeitig ist das ebenfalls dichte Eisenbahnnetz vom schnellen Personenregionalverkehr geprägt und wegen der zu kurzen Laufwege für die Schienengüterbedienung nicht sonderlich prädestiniert.

Welche Schlussfolgerungen ergeben sich aus dieser Außenbetrachtung für die Position Österreichs?

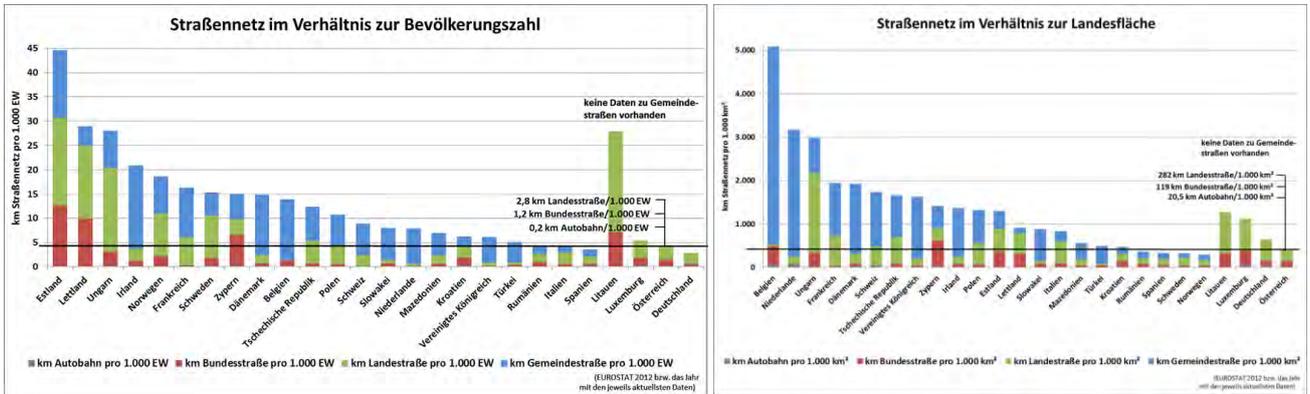
Erstens, wird unter diesen Umständen das Bestreben bemerkbar, die Nutzfahrzeuge in ihren Längen- und Gewichtsdimensionen zu steigern, weil auf kurzen Wegen keine topographischen Hindernisse sich dem Einsatz solcher „Giga-Liner“ (das sind Lkw mit bis zu 25 m Länge und 60 t Gesamtgewicht) entgegenstellen.

Zweitens, werden die nationalen Bahnoperatoren in diesen Ländern keine innovative und offensive Geschäftspolitik betreiben können oder werden sogar von Mitbewerbern unter den größeren Nachbarn geschluckt, wie es die Deutsche Bahn in den Niederlanden und in Dänemark schon getan hat.

Drittens, stoßen aber schwere und lange Lkw-Züge innerhalb der dichten urbanen Siedlungsgebiete auf Widerstand der Kommunalverwaltungen, sodass sie zwar Standorte an den zentralen Autobahnknoten günstig bedienen können, in den verkehrsberuhigten Innenstädten, wie beispielsweise den Shared Spaces in niederländischen Städten, aber nicht einfahren sollen (Shared Spaces sind Begegnungszonen, wo sich alle VerkehrsteilnehmerInnen gleichberechtigt mit einem Minimum an Regelungen auf derselben Verkehrsfläche bewegen). Damit gewinnen verträgliche Formen bzw. Technologien der urbanen Güterversorgung („City-Logistik“) an Bedeutung für Forschung und Planung (BVL, 2014; FLÄMIG, 2014).

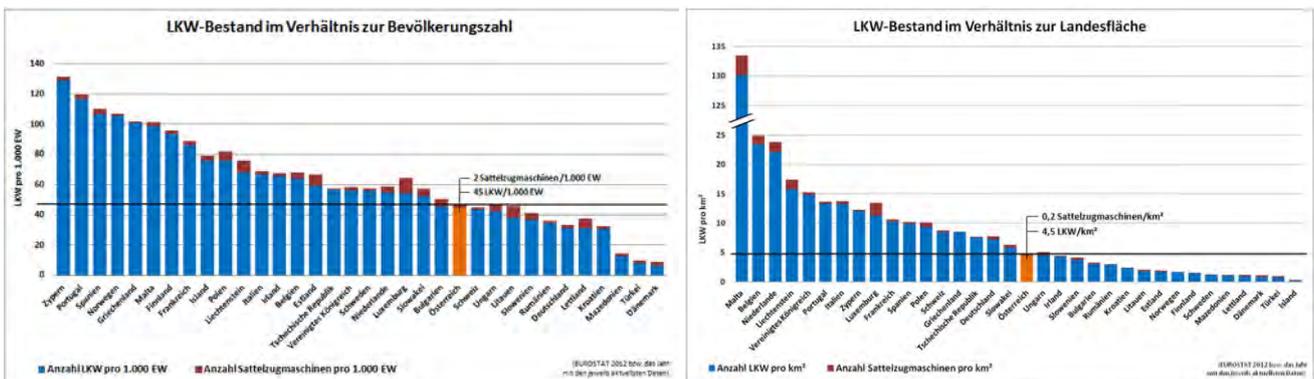
Wird die Lkw-Dichte im europäischen Vergleich betrachtet, fällt zunächst auf, dass unser Nachbar Deutschland, wenn die Statistik zutreffend ist, mit einem Viertel weniger Lkw als Österreich in Bezug auf die Bevölkerung auskommt. Das kann daran liegen, dass die Transportwirtschaft in den gebirgigen Landesteilen nicht nur auf den Lkw angewiesen ist, sondern auch einen vielfältigeren Fuhrpark vorhalten und eine zeitaufwendigere Güterbedienung in Kauf nehmen muss. Dafür spricht, dass die bahnfreundliche Schweiz gleich neben Österreich aufgestellt ist (s. Darstellung 1-4). Dass Österreich, die Schweiz und Deutschland aber weniger als die Hälfte der Spitzenreiter (wie Portugal, Spanien, Norwegen oder Griechenland) im Lkw-Bestand haben, liegt an der schwachen Position des Bahnsystems dieser Küstenländer und der Nähe ihres Hinterlandes zu den Seehäfen. Beim Lkw-Besatz in Bezug auf die Landesfläche liegt Österreich mit 4,5/km² begleitet von der Slowakei und Ungarn unauffällig im Mittelfeld.

Darstellung 1-7: Erschließungsnetzichten nach Straßenkategorien im europäischen Ländervergleich



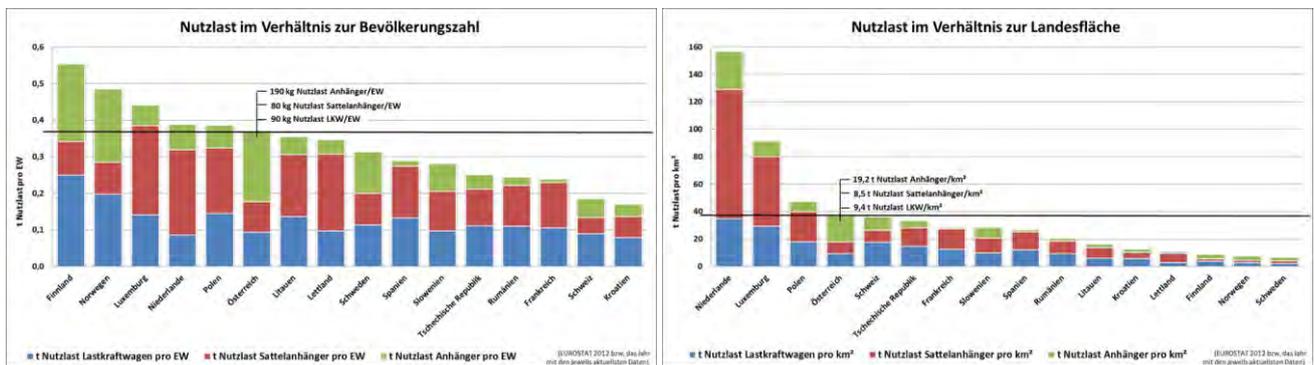
Quelle: eigene Bearbeitung (Marsch, arp) auf Grundlage EUROSTAT

Darstellung 1-8: Lkw-Dichte im europäischen Ländervergleich



Quelle: eigene Bearbeitung (Marsch, arp) auf Grundlage EUROSTAT

Darstellung 1-9: Lkw-Nutzlastkapazitätsdichten im europäischen Ländervergleich



Quelle: eigene Bearbeitung (Marsch, arp) auf Grundlage EUROSTAT

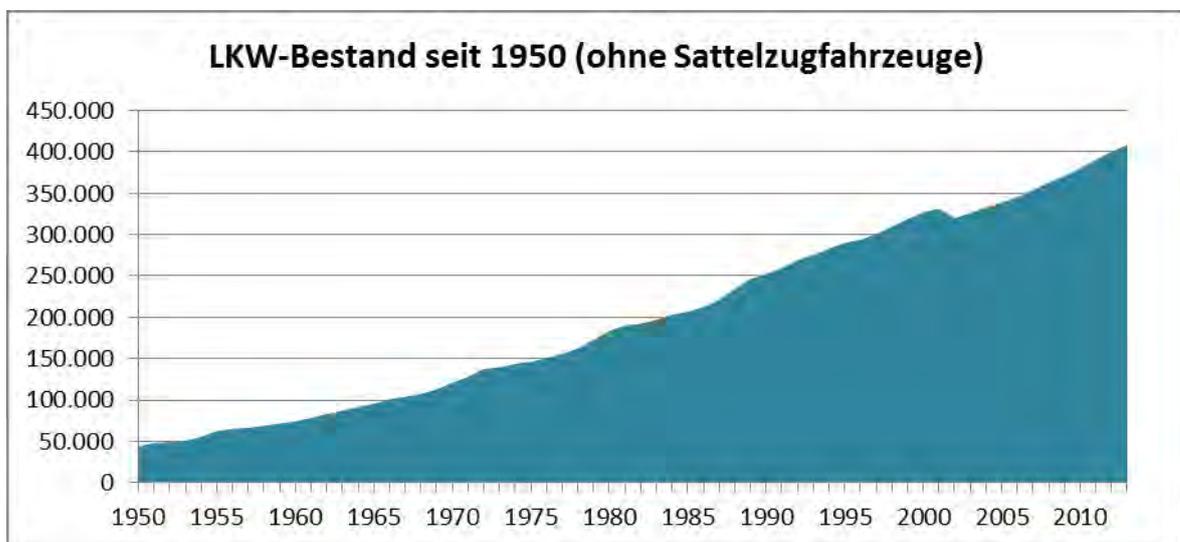
Eine bemerkenswerte Aussage liefert die europäische Statistik zu den verfügbaren Nutzlastkapazitäten in den Ländern der EU. Wird die Bevölkerung als Bezug hergenommen, so liegt das dünnbesiedelte, aber großflächige Flachland Finnland mit ca. 550 kg je Kopf, wird hingegen die Landesfläche zugrunde gelegt, die dicht besiedelten, aber kleinräumigen Niederlanden mit 158 t je km² als Extremwerte an der Spitze. Österreich reiht sich bei der Flächenausstattung mit einer Nutzlast von 38 t je km² (das sind ca. zwei Lkw) ebenso bescheiden ein wie die Schweiz oder Tschechien, alles Binnenländer ohne Welthafen. Dafür kommt die Schweiz bei der Pro-Kopf-Ausstattung mit Lkw-Nutzlastkapazitäten mit ungefähr der Hälfte (180 kg/Kopf) im Vergleich zu Österreich mit 380 kg pro Kopf aus, nicht zuletzt aufgrund der restriktiven Verkehrspolitik zugunsten der Verlagerung auf die Bahn und aufgrund der Rhein-Schiene (Binnenschifffahrt und Kombi-Verkehr auf der Bahn) zu den Nordsee-Häfen, aber auch wegen der kürzeren mittleren Lieferdistanzen am Heimmarkt.

1.1.1.5 Bestand relevanter Fahrzeugklassen in der Kraftfahrzeugstatistik Österreichs

□ Entwicklung des Lkw-Bestandes in Österreich

Die österreichische Lkw-Flotte ist in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen. Der Bestand an Lkw (ohne Sattelzugmaschinen) hat sich seit 1980 (etwa 180.000 Lkw) mehr als verdoppelt und umfasst derzeit etwa 410.000 Fahrzeuge. 1950 lag diese Zahl noch unter 50.000 (s. Darstellung 1-10).

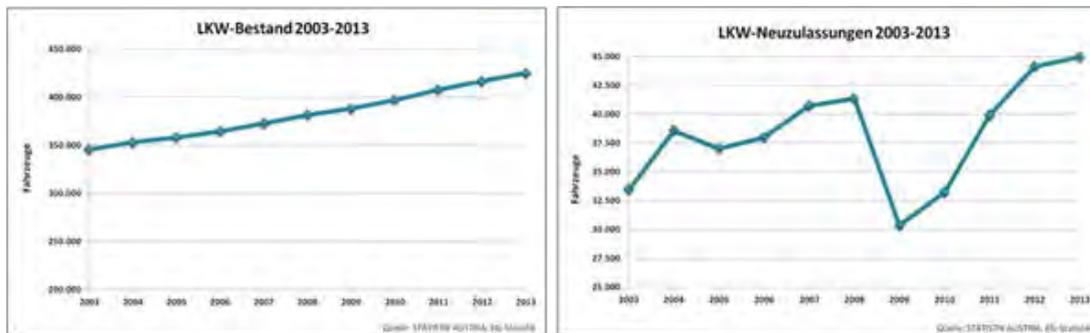
Darstellung 1-10: Entwicklung des österreichischen Lkw-Fuhrparks 1950-2013



Quelle: STATISTIK AUSTRIA 2013 ⁴

Darstellung 1-11 zeigt detaillierter die Entwicklung der letzten zehn Jahre. Stieg der Bestand in den letzten Jahren kontinuierlich an, schwankte die Anzahl an Neuzulassungen doch recht deutlich. Der wachsende Trend wurde durch die Wirtschaftskrise gebremst. 2009 gab es ein Viertel weniger Neuzulassungen als im Jahr davor. Seither ist jedoch wieder ein kräftiger Anstieg zu verzeichnen. Dieser wirtschaftliche Einbruch wirkte sich jedoch nicht auf den Bestand aus, da die Fahrzeuge wohl länger als üblich genutzt wurden.

Darstellung 1-11: Lkw-Bestand und Lkw-Neuzulassungen seit 2003, inkl. Sattelzugmaschinen

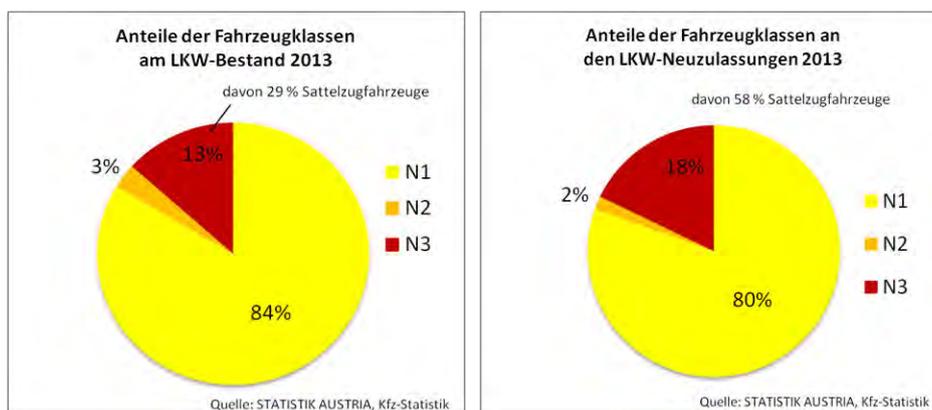


Quelle: Statistik Austria – Kraftfahrzeugstatistik

Anteil der Fahrzeugklassen N1^a, N2^b und N3^c am Lkw-Bestand 2013

Aufschlussreich ist auch die Unterscheidung nach maximalem Gesamtgewicht in den Klassen N1, N2 und N3. Der Anstieg der Gesamtflotte geht hauptsächlich auf den Zuwachs in der Fahrzeugklasse N1 zurück. Der Bestand an N1-Fahrzeugen stieg in letzter Zeit jährlich um 2-3%, während die anderen beiden Fahrzeugklassen derzeit stagnieren bzw. sogar leicht rückläufige Zahlen verzeichnen. Das liegt wohl daran, dass kleine Nutzfahrzeuge bis zum Ende ihrer Lebensdauer in Österreich genutzt werden, während größere Nutzfahrzeuge einem raschen Erneuerungszyklus unterliegen, nicht zuletzt wegen der EURO-Klassen-Regelungen, und nach ihrer steuerlichen Abschreibung häufig ins Ausland weiterverkauft werden, wodurch der Bestand in Österreich stabil bleibt. Auch die Ausfluggung heimischer Flotten wird dabei eine Rolle spielen.

Darstellung 1-12: Lkw-Bestand und Lkw-Neuzulassungen nach Fahrzeugklassen 2013



Quelle: eigene Bearbeitung nach Statistik Austria – Kraftfahrzeugstatistik

Die Fahrzeugklasse N1 nimmt mit 84 % am Bestand und 80 % bei den Neuzulassungen anteilmäßig den Hauptteil der Lkw-Flotte ein. Der Anteil der zugelassenen Fahrzeuge der Klasse N2 (> 3,5 t bis 12 t) beträgt

^a N1 = Europäische Nutzfahrzeugklasse bis 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht

^b N2 = Europäische Nutzfahrzeugklasse von mehr als 3,5 t bis 12 t zulässiges Gesamtgewicht

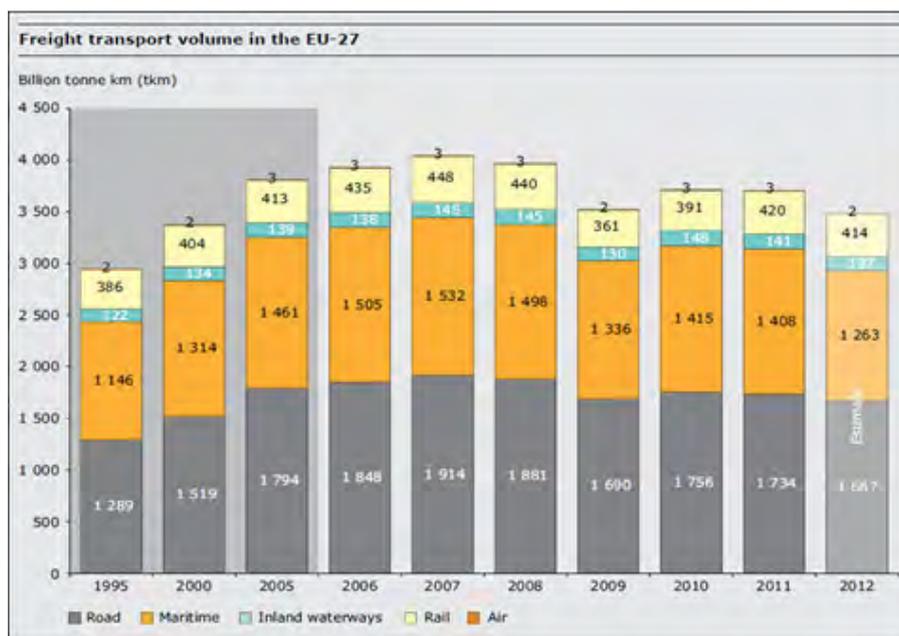
^c N3 = Europäische Nutzfahrzeugklasse von mehr als 12 t bis 40 t zulässiges Gesamtgewicht

hingegen nur 3 %. Die restlichen Fahrzeuge haben ein höchstzulässiges Gesamtgewicht von über 12 t, wobei diese Kategorie auch die Sattelzugmaschinen inkludiert. Bei den Neuzulassungen ist der Anteil der N₃-Fahrzeuge im Vergleich zum Bestand erhöht. Der Grund dafür ist die höhere Nutzungsintensität und eine dadurch bedingte kürzere Nutzungsdauer der schweren Nutzfahrzeuge, vor allem der Sattelzugfahrzeuge. Aber auch der universellere Einsatz außerhalb von Innenstädten macht vor allem schwere Lkw für volumensintensive Transporte attraktiv.

1.1.1.6 Entwicklung des Modal Splits zwischen den Verkehrsträgern in der EU-27

In einer großräumig europäischen Betrachtung, wie eine solche Optik für den Güterverkehr in einem Binnenmarkt angemessen erscheint, teilen sich die Gütertransportleistungen (in tkm) über die letzten Jahre gesehen folgendermaßen auf die Verkehrsträger in der EU-27 auf (s. Abbildung 1-6): An der Spitze liegt der Straßengüterverkehr mit rd. 47 % (oder 1,9 Billionen tkm im Jahr 2007 vor und 1,7 Billionen tkm im Jahr 2011 nach der jüngsten Wirtschaftskrise), danach folgt der Seeverkehr zwischen den EU-27-Staaten mit rd. 38 % (oder 1,5 Billionen tkm 2007 bzw. 1,4 Billionen tkm 2011), dann erst kommt der Schienengüterverkehr mit rd. 11 % (oder 2007: 450 Mrd. tkm bzw. 2011: 420 Mrd. tkm) und abgeschlagen die Binnenschifffahrt mit rd. 3 %.

Abbildung 1-6: Entwicklung der Gütertransportleistungen in der EU-27 nach Verkehrsmodi 1995-2012



Quelle: EEA 2013, 23 (Anmerkung: englisch 1 Billion = deutsch 1 Mrd.)

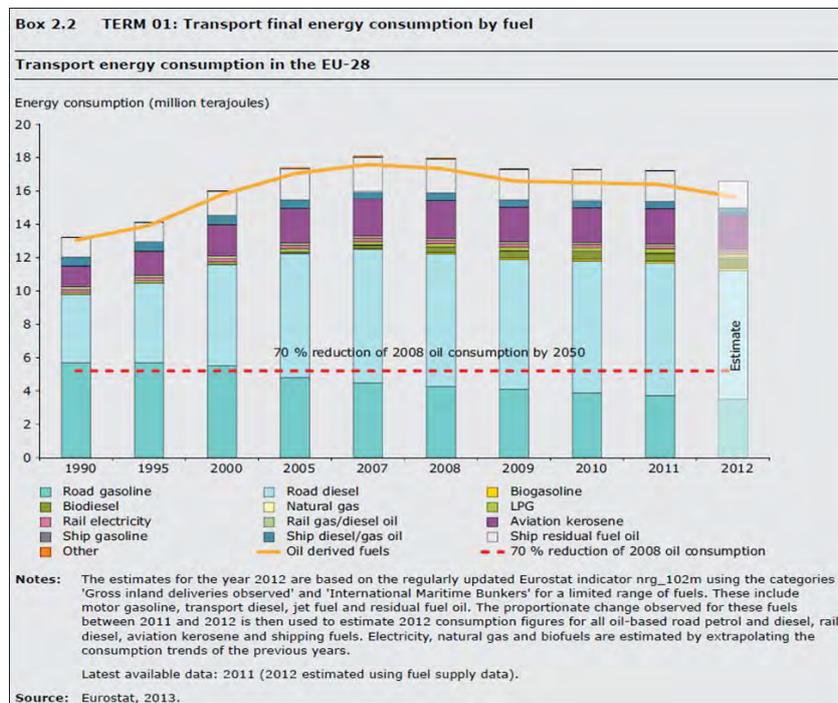
Freilich hinken solche Gegenüberstellungen gewaltig, weil die Verkehrsinfrastrukturen sehr unterschiedliche Netzdichten aufweisen und Routenmöglichkeiten anbieten. Wenn aber der Energieverbrauch und die Emissionen der Güterverkehrsleistungen auf den einzelnen Verkehrsträgern in Betracht gezogen werden, so ergeben sich in erster Linie für jeden Verkehrsträger Hinweise auf den Handlungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarf und in zweiter Linie kann der Blick auf die Optionen zur Verkehrsverlagerung gerichtet werden, wenn eine bestimmte Transportnachfrage multi- oder intermodal bedient werden kann.

Die Grafik macht darüber hinaus die Auswirkungen des Wirtschaftseinbruchs ab dem 4. Quartal 2008 sichtbar, der den Wachstumspfad der Gütertransportleistungen von 1995 bis 2007 mit rd. +2,3 % jährlich gebrochen hatte. Diese Niveauabsenkung (2007: 100 % auf 2011: 92 %) hat der Umwelt eine Atempause und der Infrastruktur eine kapazitive Verschnaufpause verschafft.

1.1.1.7 Energieverbrauch nach Kraftstoffarten in der EU-28

Die nachfolgende Abbildung 1-7 zeigt die weiterhin engste Kopplung zwischen Wirtschaftsdaten und Energieverbrauch im Verkehrswesen. Bemerkenswert ist, dass bei annähernd gleichbleibendem Energieverzehr für Verkehrsleistungen der Anteil des Dieselkraftstoffes deutlich auf Kosten des Benzinkraftstoffes zugenommen hat, was auf den Pkw-Verkehr zurückzuführen ist. Der in den letzten Jahren bemerkbare Anstieg des Biodiesels ist auf die vorgeschriebenen Beimischungen zurückzuführen und markiert noch keine Trendwende hin zu regenerativen Treibstoffen.

Abbildung 1-7: Energieverbrauch für Verkehrsleistungen nach Kraftstoffarten in der EU-28



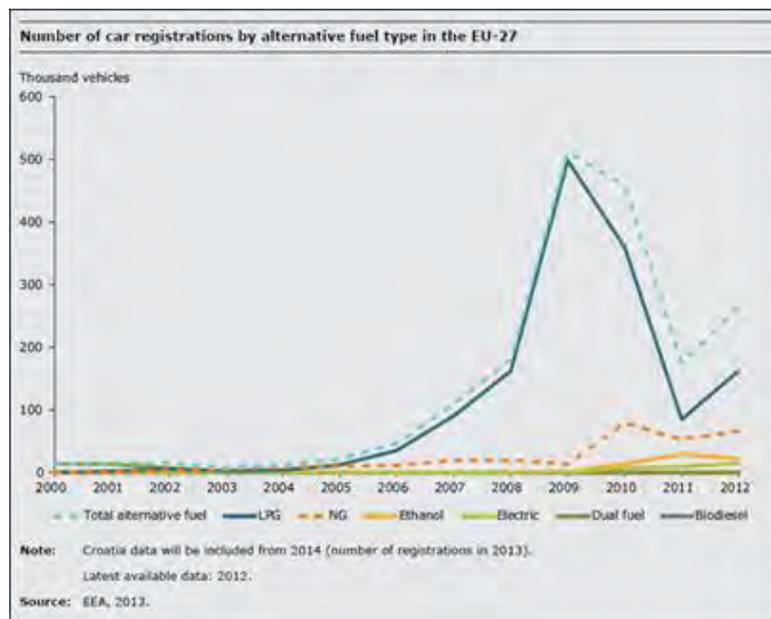
Quelle: EEA 2013, 17

Im Übrigen verändert sich offenbar am verkehrsträgerspezifischen Energieverbrauchsverhalten kaum etwas auffällig. Sollte das Wirtschaftswachstum anziehen, wird voraussichtlich auch wieder der Dieselanteil überproportional ansteigen und die angestrebte langfristige und drastische Reduktion von der Ölabhängigkeit konterkarieren.

Diese Vermutung wird überdies von unten stehender Abbildung 1-8 gestützt, die anhand der Neuzugulassungen aufzeigt, wie ab dem Jahr 2006 ein wenig Bewegung bei alternativ angetriebenen Kraftfahrzeugen aufgekommen ist, ohne dass allerdings von einem Aufbruch gesprochen werden konnte. Die Spitze bei der Neuzulassung von mit Autogas (LPG) betriebenen Pkw fällt in die Zeit des Höhepunktes

der Wirtschaftskrise 2009/2010 und flaute danach wieder ab. Der Hintergrund dürften steuerliche Vorteile beim Tanken (angeblich in Frankreich und in Italien) gewesen sein und die Tatsache, dass motortechnisch auf Benzin umgestellt und umgestiegen werden kann (s. dazu S. 34).

Abbildung 1-8: Entwicklung der Migration alternativ angetriebener Fahrzeuge in der EU-27 2000-2012



Quelle: EEA 2013, 29

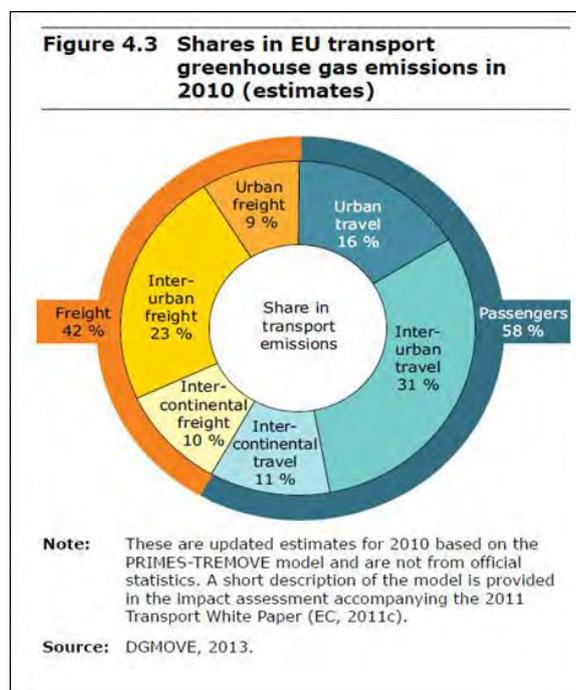
1.1.1.8 Hinweise zu güterverkehrsbedingten Treibhausgas- und Schadstoff-Emissionen

□ Modellrechnung der Europäischen Umweltagentur

Eine modellgestützte Abschätzung des Anteiles der Treibhausgasemissionen nach Verkehrszwecken, die von der Europäischen Umweltagentur vorgenommen wurde, ist ein aufschlussreicher Zugang zur Klimaproblematik und Ausgangspunkt für FTI-Initiativen auf europäischer, transnationaler und nationaler Ebene (EEA, 2013, 42). Dabei wird herausgestellt, dass sich der Emissionsanteil zwischen Personenverkehrsleistungen und Güterverkehrsleistungen im Verhältnis 58 % zu 42 % aufteilt. Des Weiteren wird zwischen interkontinentalen Verkehrsleistungen (überwiegend Seeschifffahrt) mit 10 %, Verkehrsleistungen zwischen urbanen Zentren (multimodal) mit 23 % und innerurbanen Verkehrsleistungen (hauptsächlich auf der Straße) mit 9 % unterschieden.

Ohne hier die Plausibilität dieser Aussagen überprüfen zu können, würde das bedeuten, dass der Ziel- und Quellverkehr in den Gütersenken der Bevölkerungsschwerpunkte nahezu ebenso viele Treibhausgase (THG) verursacht wie die Güterströme des Welthandels. Wenn außerdem bedacht wird, dass die THG mit anderen Schadstoffen gemeinsam emittiert werden und in Ballungsräumen sich die Verkehrsbewegungen der Fahrzeuge in baulich beengten Korridoren bündeln, wo deren konzentrierte Emissionen sich als Immissionen in der Atemluft in Form von Feinstaub akkumulieren, dann ist der Handlungsbedarf für eine umweltverträgliche Organisation der Güterversorgung und eine emissionsreduzierte Abwicklung der Güterverkehre evident (EEA, 2013, 53).

Abbildung 1-9: Anteil der geschätzten Treibhausgas-Emissionen nach Verkehrszwecken



Quelle: EEA 2013, 42

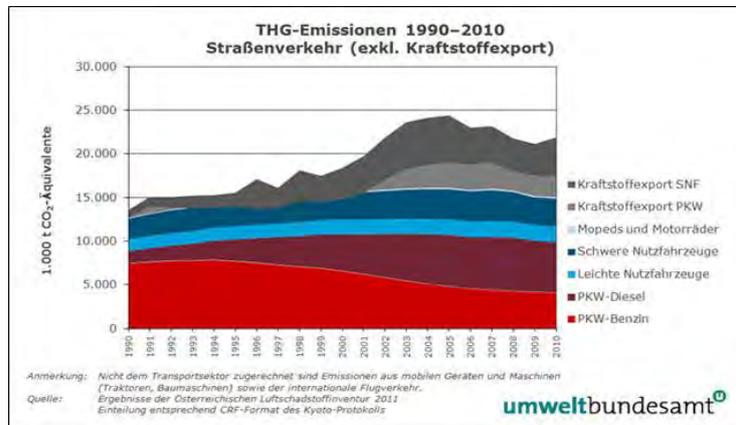
□ Luftinventur des Umweltbundesamtes 2011 für Österreich

Laut jährlicher Berichterstattung des Umweltbundesamtes zum Zustand der Luft in Österreich zählt der Verkehrssektor, insbesondere der Straßenverkehr und darunter der Pkw-Verkehr zu den Hauptverursachern für Treibhausgasemissionen, die seit 1990 um 60 % zugenommen haben⁵. Der Anteil der Nutzfahrzeuge blieb dabei aber einigermaßen konstant, weil die strengen EURO-Abgas-Vorschriften Schlimmeres verhüten haben. Übrigens das Kraftstoffexportgeschäft mag für die nationale Klimabilanz von rechnerischer Bedeutung sein, für die Umwelt sind es Emissionen hüben wie drüben (s. Abbildung 1-10).

Die Stickoxide (NO_x) begünstigen die Bildung von bodennahem Ozon und von Feinstaub-Smog. Diese Schadstoffgruppe ist zwar seit längerem mäßig rückgängig, aber der Straßenverkehr ist mit 96 % Hauptverursacher für die NO_x -Emissionen, wobei etwa zwei Drittel auf den Schwerverkehr entfallen (s. Abbildung 1-11). Am bedenklichsten für die menschliche Gesundheit sind Partikelemissionen aus Rußbestandteilen, wobei ultrafeine Partikel ($\text{PM}_{2,5}$) bis in die Blutbahn gelangen können.^d Diese Staubbelastungen, verursacht vom Verkehr, gehen durch die Einführung von Partikelfiltersystemen seit dem Jahr 2006 im Großen gesehen zwar leicht zurück, aber die lokalen Belastungen in Immissionschutzgebieten bereiten nach wie vor Sorgen. Im Vergleich zum Benzinmotor stößt der Dieselmotor aufgrund des Kraftstoffes deutlich mehr Partikel aus. Diesel-Pkw werden stark nachgefragt und bei größeren Nutzfahrzeugen ist der Dieselantrieb derzeit praktisch unersetzlich. Übrigens ist der Anteil der Bahn auch nicht unerheblich (s. Abbildung 1-12).

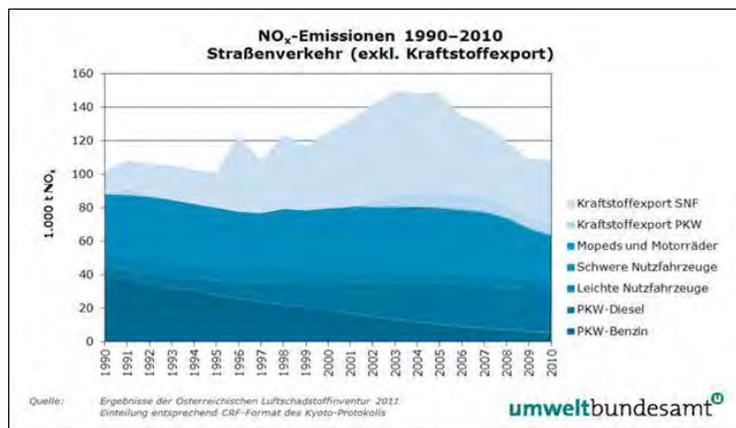
^d PM bedeutet Particulate Matter und wird in Nanometer Umfang, also meist PM_{10} oder $\text{PM}_{2,5}$, gemessen.

Abbildung 1-10: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in Österreich 1990-2010



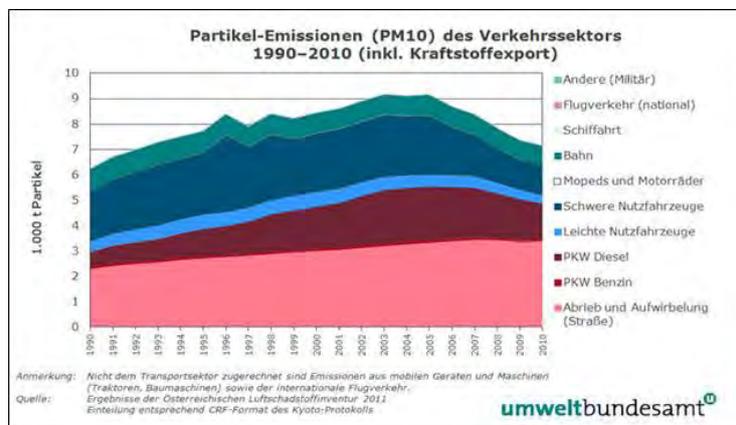
Quelle: UMWELTBUNDESAMT, Luftinventur 2011

Abbildung 1-11: Entwicklung der Stickoxid-Emissionen in Österreich 1990-2010



Quelle: UMWELTBUNDESAMT, Luftinventur 2011

Abbildung 1-12: Entwicklung der Partikel-Emissionen in Österreich 1990-2010



Quelle: UMWELTBUNDESAMT, Luftinventur 2011

1.1.1.9 Abgasnormen nach Verkehrsträgern

Die EU-Luftreinhalte-Richtlinie 2008/50/EG mit ihren Instrumenten zur Einhaltung eines Mindeststandards an Luftqualität für die Bevölkerung samt ihrer Implementierung in nationales Recht deckt die immissionsräumliche Dimension ab, während die EURO-Abgasnormen an der Verursachungsseite der verkehrsbedingten Emissionen ansetzen. Das Zusammenwirken von Schutzmaßnahmen an der Emissionsquelle und von Verkehrsregulierungen im Immissionsgebiet bei Grenzwertüberschreitungen in der Atemluft verhindert zunächst katastrophale Belastungssituationen, wie wir solche Bilder aus Mega-Cities außerhalb Europas kennen. Die kleinräumigen Auswirkungen auf die Volksgesundheit und die notwendigen Maßnahmen seitens des Immissionsschutzes sind ein wichtiges Anliegen, stehen aber hier nicht unmittelbar im Kontext dieser Arbeit.

□ Fahrzeuge im Straßengüterverkehr

Angesichts des ständig steigenden Straßengüterverkehrs hat die Europäische Kommission rechtzeitig die EU-Richtlinie 88/77 erlassen, die in weiterer Folge in regelmäßigen Abständen eine Verschärfung der Abgasgrenzwerte für die Zulassung von Dieselmotorkraftfahrzeugen über 3,5 t Gesamtgewicht mit sich gebracht hatte. Mittlerweile gilt ab 2014 die EURO-Klasse 6, deren Grenzwerte im Vergleich zu denen aus 1993 (= 100 %) bei Stickoxiden (NO_x) nur mehr 4,4 %, bei unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) 10,6 %, bei Rußpartikeln (PM₁₀) 2,5 % und bei Kohlenmonoxid 26 % ausmachen (s. Tabelle 1-1). Die jüngste Fahrzeuggeneration stützt sich, um diese strengen Grenzwerte einhalten zu können, auf mehrere technische Säulen der Abgasbehandlung:

- Innermotorische Optimierung
- Abgasrückführung
- Abgasnachbehandlung (mit Harnstofftechnologie)
- Partikelfilter

Kritisch angemerkt wurde zur Einführung der aktuellen Abgasnorm EURO VI, dass die erforderlichen technischen Maßnahmen den Kraftstoffverbrauch und damit auch den CO₂-Ausstoß ungünstig beeinflussen, also steigern können.

Tabelle 1-1: Entwicklung der EURO-Abgasnormen für Lkw mit mehr als 3,5 t Gesamtgewicht

EURO-Diesel Abgasnormen für Lkw > 3,5 t					
Norm	NO _x (g/kWh)	HC (g/kWh)	Ruß	CO (g/kWh)	Inkrafttreten für Erstzulassungen
EURO 0	15,8	2,6	-	12,3	1990
EURO I	9	1,23	0,4	4,9	1993
EURO II	7	1,1	0,15	4	1996
EURO III	5	0,66	0,1	2,1	2001
EURO IV	3,5	0,46	0,02	1,5	2006
EURO V	2	0,46	0,02	1,5	2009
EURO EEV	2	0,25	0,02	1,5	1999
EURO VI	0,4	0,13	0,01	1,5	2014

Quelle: Wirtschaftskammer Wien 2014

□ Triebfahrzeuge im Schienen(güter)verkehr

Mit einer gewissen Verzögerung gegenüber dem Straßenverkehr wurden die Abgasgrenzwerte für Eisenbahntriebfahrzeuge mit Verbrennungskraftmotoren in den Richtlinien der Europäischen Kommission zu den nicht im Straßenverkehr eingesetzten Fahrzeugen und Maschinen (Richtlinie 2004/26/EG „Non-Road Mobile Machinery Ordinance“) normiert. Die Tabelle 1-2 zeigt den die Eisenbahnfahrzeuge betreffenden Ausschnitt. Der Internationale Eisenbahnverband UIC hat in einem empfehlenden Merkblatt (UIC 623-1) jene Motoren zertifiziert, die die jüngste Emissionsgrenzwertstufe IIIB aus 2012 erfüllen. Die Leitlinien für die Abgaskontrolle von Dieselmotoren enthält das Merkblatt 624.

Da Eisenbahntriebfahrzeuge üblicherweise mehrere Jahrzehnte in Betrieb stehen, ist eine Remotorisierung von Diesellokomotiven in vielen Fällen eine günstige Möglichkeit, den Triebfahrzeugbestand antriebsmäßig an den Stand der Technik anzupassen. Der im Vergleich zur Fuhrparkerneuerung bei Straßennutzfahrzeugen dadurch anders geartete Erneuerungszyklus bei der Triebfahrzeugflotte wirkt sich auch in großzügigeren Übergangsintervallen zwischen den Richtlinien-Erlässen für die Neuzulassung von neuen Triebfahrzeugmodellen aus, die sich jahrelang überlappen können (UIC, 2006; BUND, 2012).

Tabelle 1-2: EURO-Abgasnormen für Eisenbahntriebfahrzeuge

Grenzwerte für Triebwagen	Kategorie	Leistung (kW)	NO _x (g/kWh)	HC (g/kWh)	Partikel (g/kWh)	CO (g/kWh)	Inkrafttreten für Erstzulassungen
Emissionsgrenzwerte Stufe IIIA	RCA	> 130	4	4	0,2	3,5	2006
Emissionsgrenzwerte Stufe IIIB	RCB	> 130	2	0,19	0,025	3,5	2012
Grenzwerte für Lokomotiven							
Emissionsgrenzwerte Stufe IIIA	RLA	130-560	4	4	0,2	3,5	2007
	RHA	> 560	6	0,5	0,2	3,5	2009
	RHA	2000 und Vhz > 3	7,4	0,4	0,2	3,5	2009
Emissionsgrenzwerte Stufe IIIB	RB	> 130	4	4	0,025	3,5	2012

Quelle: eigene Darstellung nach VDMA, 2011

□ Motorgüter- und Schubschiffe in der Binnenschifffahrt

Für die Binnenschifffahrt wurden Abgasnormen erst recht spät in der EU-Richtlinie „Non-Road“ 97/68/EG in der Fassung 2004/26/EG verankert, da die Auffassung vorherrschte, dass der Anteil der Emissionsbelastung durch die Binnenschifffahrt vernachlässigbar sei. Dazu kam, dass der Markt für Schiffsmotoren aufgrund der geringen Investitionsneigung auf der Nachfrageseite schwach aufgestellt ist. Wesentliche Inputs bei der Aufstellung der Abgasrichtlinien, die in mehreren Stufen für Neuzulassungen umgesetzt wird, kamen von der Zentralkommission der Rheinschifffahrt (ZKR) und lehnen sich außerdem an die US Binnenschifffahrtsvorschriften an. Angesichts der Marktbedingungen wurden den Schiffsmotoren-herstellern flexible Übergangsfristen zugestanden (PAULI, SCHWEIGHOFER, 2008, 43 ff).

Tabelle 1-3: EURO-Abgasnormen für Motorgüter- und Schubschiffe

Grenzwerte für Binnenschiffe					
Kategorie	Zylinderhubvolumen V _H (l) und Leistung P (kW)	NO _x + HC (g/kWh)	Partikel (g/kWh)	CO (g/kWh)	Inkrafttreten für Erstzulassungen
V1:1	V _H ≤ 0,9 und P > 37	7,5	0,4	5	2007
V1:2	0,9 < V _H ≤ 1,2	7,2	0,3	5	2007
V1:3	1,2 < V _H ≤ 2,5	7,2	0,2	5	2007
V1:4	2,5 < V _H ≤ 5	7,2	0,2	5	2009
V2:1	5 < V _H ≤ 15	7,8	0,27	5	2009
V2:2	15 < V _H ≤ 20 und P ≤ 3300	8,7	0,5	5	2009
V2:3	15 < V _H ≤ 20 und P > 3300	9,8	0,5	5	2009
V2:4	20 < V _H ≤ 25	9,8	0,5	5	2009
V2:5	25 < V _H ≤ 30	11	0,5	5	2009

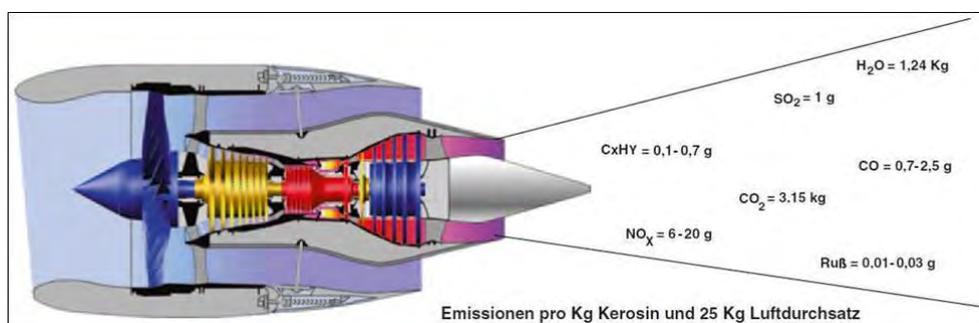
Quelle: VDMA, 2011

□ Luftfahrt

Flugzeugtriebwerke werden mit Kerosin betrieben. Dies ist ein Destillat aus Mineralöl, kann aber auch über einen Crackprozess aus schwerem Heizöl gewonnen werden. Die Triebwerke saugen für die Schuberzeugung drei- bis viermal mehr Luft an als für die Verbrennung notwendig ist. Denn das aufgeheizte Luftgemisch wird nicht verbrannt, sondern für den Schub ausgestoßen. Darin sind ca. 7 % CO₂ und 3 % Wasserdampf enthalten, die klimarelevant sind. Die Abgase aus der Verbrennung unter Reiseflugbedingungen enthalten je Kilogramm Kerosin: 6-16 g NO_x, 1 g SO₂, 0,7-2,5 g CO, 0,1-0,7 g unverbrannte CH und geringe Mengen C. Damit sind die unterschiedlichen immissionsrelevanten Auswirkungen angesprochen; die beschriebene Reiseflugphase weitgehend oberhalb der Witterung ist klimarelevant und der Start-Lande-Zyklus (LTO) bis ca. 900 m Flughöhe ist vor allem umweltrelevant.

Der Triebwerksschub beträgt beim Rollen 7 %, beim Start 100 %, im Steigflug 85 % und im Sinkflug 40 %. Auf Reiseflughöhe hängt der Kerosinverbrauch davon ab, ob Höhenwinde (jet streams) genutzt werden können. Alles in allem haben moderne Reiseflugzeuge einen Kerosinverbrauch von 3,0 bis 5,5 l pro 100 Passagier-Kilometer, wobei der Frachtanteil zwangsläufig mitenthalten ist (MENSEN, 2013, 1416 ff).

Abbildung 1-13: Emissionen aus Flugtriebwerken bei 25 kg Luftdurchsatz und 1 kg Kerosin-Verbrauch



Quelle: MENSEN, 2013, Abb. 45.1

Die Internationale Zivilluftfahrtvereinigung ICAO hat im Annex 16 (Teil 3) die Standards für die Zertifizierung der Klassen von Triebwerken in Bezug auf die Emissionen festgelegt (ICAO, 2008).

Seit 2008 ist der Luftverkehr in das CO₂-Emissionshandelssystem der EU (Richtlinie 2008/101/EG) einbezogen. Das heißt, die Luftfahrtgesellschaften müssen für eine bestimmte verifizierbare Menge an Tonnenkilometern handelbare Zertifikate erwerben. Das stellt einen gewissen Anreiz für die Anschaffung modernen Fluggeräts dar (MENSEN, 2013, 1421 ff).

1.1.1.10 Resümee zum Handlungsfeld Emissionsbewältigung und Immissionsschutz

Die Beurteilung der Abgasnormierungen kann nicht Gegenstand der EFLOG-F&E-Dienstleistung sein, aber die Fakten, wie mit diesem Phänomen umgegangen wird, sind einleitend angesprochen worden.

- Die Regelungen zu den Abgasgrenzwerten der Antriebe wurden für den Straßengüterverkehr rechtzeitig ergriffen, während vergleichbare Verankerungen in den EU-Richtlinien für die anderen Landverkehrsträger, nämlich für den Eisenbahngüterverkehr mit Diesel betriebenen Lokomotiven und für Motorgüterschiffe, erst später, mit weniger strengen Fristen und Bedingungen, nachvollzogen worden sind. Die Flugzeuge des Luftfrachtverkehrs stellen diesbezüglich eine in vielerlei Hinsicht eigene Thematik dar.
- Eine direkte Vergleichbarkeit des Transportaufwandes (Bewegung der für die Tonnenkilometer einer Nutzlast notwendigen Fahrzeugmasse einschließlich Energiespeicherung und Equipment auf einem Laufweg) in Bezug auf die THG- und Schadstoff-Emissionen ist gegenwärtig multimodal nur grob möglich, da viele Einflussfaktoren weder datenseitig ausreichend fundiert noch im Wirkungsmechanismus modelliert sind. Damit relativieren sich auch manche Ideen zur zweckmäßigen Verkehrsverlagerung zwischen den Transportmodi oder zum intermodalen Verkehr.
- Gleichbehandelnde Regulierungen, wie die EURO-Abgasnormen für Lkw gezeigt haben, wirken belebend auf Forschung und Technologieentwicklung und treiben den Erneuerungszyklus im operativen Bereich an. Der Straßengüterverkehr hat dadurch an Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den anderen Mitbewerbern Schiene, Binnenschiff und Kombiniertes Verkehr gewonnen.
- Die Marktbedingungen für die Motorenhersteller sind von der Investitionsfreudigkeit der Operateure und den branchentypischen Erneuerungszyklen der Fahrzeugflotten abhängig, sodass zwischen den Verkehrsträgern kaum vergleichbare Innovationsbedingungen herrschen. Anstöße können aber nicht schaden, wenn sie zielgeleitet und realitätsbezogen platziert werden. Dabei hilft die Orientierung an Umweltqualitätsvorgaben im lokalen und regionalen Umfeld der Betroffenheit des Güterverkehrsgeschehens.
- Dazu zählen die Emissionskorridore im Straßenverkehr, insbesondere im städtischen Netz, die Zulaufstrecken zu Verschubbahnhöfen und Bedienstrecken zu Anschlussbahnen im Schienengüterverkehr, die Start- und Landevorgänge auf Flughäfen und die besiedelten Uferzonen von Wasserstraßen.

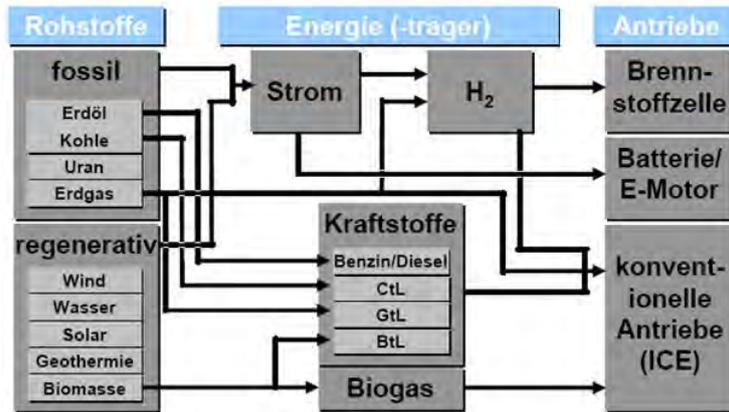
Quellenhinweise zu Kapitel 1.1.1:

- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND (BUND) et. al. (2012):** Russfrei fürs Klima. Hintergrundpapier Rußemissionen von Diesellokomotiven. Berlin
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE (BMVIT) (2011):** Metro.Freight.2020.
- BUNDESVEREINIGUNG LOGISTIK (BVL) (2011):** Grünbuch der nachhaltigen Logistik. Handbuch für die ressourcenschonende Gestaltung logistischer Prozesse. Herausg.: von G. GREGORI und T. WINTER, 1. Auflage Wien/Bremen
- BUNDESVEREINIGUNG LOGISTIK (BVL) (2014):** Grünbuch Nachhaltige Logistik in urbanen Räumen. Wien/Bremen
- DÖRR, H. (2012):** Bottom-up-Integration des Eisenbahngüterverkehrs in die Raum- und Verkehrsplanung. In: Stadt Region Land 1/2012. Tagungsbeiträge AMUS + ACMOTE 2012. Future Urban Mobility. S. 59-63. Aachen
- DÖRR, H. (2014):** Perspektiven für Schienengüterbedienung in Ballungsräumen. Versorgungsstrategien für die Gütersenke Großstadt. In: IFV Bahntechnik aktuell 48/2014. S. 49-74. Berlin
- DÖRR, H.; ENDEMANN, P. (2014):** Moving Forward Freight Mobility Innovations. In: Internationales Verkehrswesen (66) 2/2014. S. 60-63
- DÖRR, H. et al. (2010):** Friendly Supply Chains. Indikatorenkonzept für die verkehrsträgerübergreifende Bewertung von Transportketten am Beispiel der Supply Chains zu den NST/R-Gütergruppen Wein, Bier, Fruchtsaft und Milchprodukte. Endbericht zur Studie im Rahmen des izv-Forschungsprogrammes des BMVIT. IVS-Schriften Band 35. Wien
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) (2013):** A closer look to urban Transport. TERM 2013 - transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe. Kopenhagen
- FLÄMIG, H. (2014):** Autonome Fahrzeuge für die Logistik. In: Internationales Verkehrswesen (66) 2/2014. S. 82-83
- HAFEN HAMBURG (2013):** Handbuch.
- HÖRL, B. et. al. (2012):** Metro.Freight.2020. Transportmittelauswahl für die mittelbetriebliche Wirtschaft. Strategie zur Stärkung und effizienten Nutzung der Schieneninfrastruktur in Ballungsräumen. Studie finanziert im Forschungs- und Technologieprogramm iv2s plus herausgegeben vom BMVIT, Innovation und Technologie. Wien
- HÖRL, B.; WANJEK, M. (2014):** Strategien zu einer effizienten Nutzung der Schieneninfrastruktur für Güterverkehr in Stadtregionen. In: Jahrbuch Raumplanung 2013. Department für Raumplanung. TU Wien. S. 113-128. Wien
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANISATION (ICAO) (2008):** Annex 16 to the Convention on Civil Aviation. Environmental Protection. Volume II Aircraft Engine Emissions. 3rd edition. Montréal
- MENSEN, H. (2013):** Handbuch der Luftfahrt. Berlin/Heidelberg
- PAULI, G.; SCHWEIGHOFER, J. (2008):** Die Entwicklung der Abgasemissionen in der Binnenschiffahrt. In Zeitschrift für Binnenschiffahrt 9/2008. S. 41-46
- TOIFL, Y. (2013):** Innenstadtbelieferung von Gütern des täglichen Bedarfs. Bachelorarbeit am Fachbereich für Verkehrssystemplanung, TU Wien. Wien.
- UMWELTBUNDESAMT (2011):** Luftinventur Österreich. Wien
- UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER (UIC):** Merkblatt 623-1 mit der Anlage zu den zugelassenen Motoren. Paris
- UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER (UIC):** Merkblatt 624V Emissionsgrenzwerte für Bahnantriebsmotoren. Paris
- UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER (UIC) et al. (2006):** Bahndiesel-Studie. Studienbericht verfasst von S. KOLLAMTHODI. AEA Technology Environment. Didcot
- VERBAND DER DEUTSCHEN MASCHINENINDUSTRIE UND ANLAGENBAUER e.V. (VDMA) (2011):** Abgasgesetzgebung für Diesel- und Gasmotoren. Schiffe. Stationäre Anlagen. Mobile Maschinen und Geräte. Eisenbahnen. Informationsbroschüre. Frankfurt am Main
- WIRTSCHAFTSKAMMER WIEN (2014):** Mitgliederservice

1.1.2 Nutzfahrzeuge für den Straßengüterverkehr nach Antriebsart

In den folgenden Ausführungen soll der Blick auf die am Fahrzeugmarkt bereits angebotenen oder zumindest marktreif entwickelten Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien gelenkt werden. Das Angebot an konventionell ausschließlich mit Diesel-VKM^e angetriebenen Nutzfahrzeugen wird hier aber wegen der kaum überschaubaren Vielfalt an Marken und Modellen nicht ausgebreitet.

Abbildung 1-14: Übersicht der Energiebereitstellung für ICE, E-Motor und Brennstoffzelle



Quelle: LEOPOLD 2008 aus SCHWINGSHACKL 2009, 15

Wie aus der Abbildung 1-14 ersichtlich wird, sind die fossilen und die regenerativen Energiequellen in der Versorgungskette Well-to-Wheel auf vielfältige Weise verflochten und im Nutzen teilweise substituierbar oder können sich kombiniert ergänzen. Das führt zur Erkenntnis, dass der (verkehrslogistische) Einsatzzweck bei der Auswahl der Antriebsform des Nutzfahrzeuges bereits eine ausschlaggebende Vorbedingung darstellen sollte, damit ein möglichst nachhaltiger (d.h., ressourcenschonender und emissionsarmer) Verkehr produziert werden kann. Die darauf aufsetzenden individuellen Wirtschaftlichkeitsüberlegungen können aber dagegensprechen und die Forderung nach einer möglichst flexiblen Nutzung für verschiedene Einsatzzwecke ebenso. Für sensible Verkehrsräume werden daher von staatlicher Seite Rahmenbedingungen gesetzt, die die Freizügigkeit des Fahrzeugeinsatzes einschränken können oder Verkehrsverlagerungen auf bestimmte Verkehrsmodi forcieren.

1.1.2.1 Alternative Kraftstoffe für Verbrennungskraftmotoren

Vorweg werden die verwendeten Kraftstoffarten mit ihren gravimetrischen und volumetrischen Eigenschaften und Anforderungen an die Speicherung angeführt, da davon die Verfügbarkeit für die Betankung, die Sicherheit (als Gefahrgut), der spezifische Schadstoff- und Treibhausgas-Ausstoß und letztlich die Wirtschaftlichkeit für die FahrzeugbetreiberInnen abhängen (s. S.43). Der überwiegende Teil der Fahrzeuge für den Straßenverkehr wird mit Verbrennungskraftmotoren (VKM) angetrieben. Solche Fahrzeuge werden vor allem mit Flüssigkraftstoffen betankt, die eine hohe Energiedichte aufweisen und einfach zu lagern und zu handhaben sind. Flüssigkraftstoffe gelten deshalb für sämtliche Transportarten als geeignet.

^e VKM = Verbrennungskraftmotor

Im Straßengüterfernverkehr sind gasförmige Kraftstoffe wie CNG/LPG aufgrund ihrer begrenzten Tankkapazität und der dadurch eingeschränkten Reichweite weniger geeignet. Im güterverteilenden Regionalverkehr mit täglich wiederkehrenden Touren sind verschiedene „alternative“ Kraftstoffe in unterschiedlichen Antriebskonfigurationen aber durchaus einsetzbar. Schwere Nutzfahrzeuge mit einer Fahrleistung von bis zu 200.000 km pro Jahr und kurzen Standzeiten können von Flüssiggas (LNG) profitieren. Nicht zuletzt wurden sie im öffentlichen Personenlinienverkehr, wie von den Wiener Linien, jahrelang flächendeckend eingesetzt.

❑ Erd- und Biogas

Erdgas ist ein brennbares natürliches Gas, das aus dem Erdinneren gefördert wird. Es besteht zu über 90 % aus dem farb- und geruchsneutralen Methan (CH_4). Das chemisch idente Biogas entsteht aus dem Vergärungsprozess von biogenem Material, das anschließend aufbereitet und in die Erdgas-Versorgungskette eingespeist werden kann.⁶ Erdgas kann in einem Diesel Dual Fuel Modus im Dieselmotor mitverbrannt werden, jedoch kann der Dieselmotor nicht alternierend nur mit Erdgas betrieben werden.

Gas hat im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen bei Umgebungszustand eine geringere volumetrische Energiedichte. Es gibt jedoch zwei Möglichkeiten, Erdgas in einem Zustand höherer Energiedichte zu speichern: Es kann entweder zu Compressed Natural Gas (CNG) komprimiert oder zu Liquefied Natural Gas (LNG) verflüssigt werden. Denn die Energiedichte der als Brennstoffe relevanten Gase hängt hauptsächlich von den Druck- und Temperaturverhältnissen ab (SHELL, 2013).

❑ Compressed Natural Gas (CNG)

Um CNG zu erhalten, wird das Erdgas auf ca. 200 bar verdichtet. CNG hat dann mit 10 bis 14 kWh/kg eine deutlich höhere Energiedichte als die konventionellen fossilen Brennstoffe (8 bis 9 kWh/l). Die durchschnittliche Reichweite beträgt 300 bis 400 km pro Tankfüllung. Zudem sind weitere Effizienzsteigerungen bei CNG-Motoren zu erwarten.⁷

CNG hat den Vorteil, dass es kostengünstiger herzustellen ist, da für die Komprimierung weniger Energie aufgewendet werden muss als für die Verflüssigung. Die druckfeste Tankausführung erhöht jedoch das Fahrzeuggewicht bzw. vermindert die Reichweite einer Füllung gegenüber der Dieselausführung desselben Fahrzeuges um etwa 1/5 (SHELL, 2013).

❑ Liquefied Natural Gas (LNG)

Die Verflüssigung von Erdgas zum LNG geschieht durch Abkühlung. Es kann als Kraftstoff für schwere Fahrzeuge, wie Lkw oder Reisebusse, dienen, die lange Strecken zurücklegen müssen, wofür die gasförmige Speicherung nicht ausreicht. Denn LNG speichert etwa die dreifache Menge an Energie.

Damit lässt sich im Fernlauf mit rund einem Fünftel des Tankvolumens gegenüber CNG eine Reichweite von 600 bis 1.000 km erzielen (LINDE GROUP, o.J.). Außerdem stellen sich die Treibstoffkosten günstiger dar. Bei der Betankung müssen sich die Fuhrparkbetreiber aber auf eigene Versorgungsinfrastrukturen oder die von PartnerInnen stützen können. Der Tank muss gut isoliert sein und das LNG über die Versorgungskette kühl gehalten werden, um die Verdampfung weitgehend zu vermeiden. Außerdem ist Methan ein hochgradiges Treibhausgas, wenn es entweicht.⁸

❑ **Liquified Petroleum Gas (LPG)**

LPG besteht aus Propan (C_3H_8) und Butan (C_4H_{10}) und fällt als Nebenprodukt bei der Raffination von Rohöl an und wird dabei unter Druck verflüssigt. Seine Verfügbarkeit ist daher mit der von Benzin und Diesel gleichzusetzen. LPG kann mit deutlich geringerem Volumen in leicht modifizierten Ottomotoren verbrannt werden. Der Vorteil liegt in den reduzierten Emissionen. Fahrzeuge mit Ottomotoren lassen sich kostengünstig auf bivalenten LPG- und Benzin-Betrieb umrüsten. LPG hat im Vergleich zu Benzin und Diesel einen geringeren Energiegehalt von 6,6 kWh/l, weshalb sich der Verbrauch etwas erhöht.⁹ Ein solcher Antrieb kommt für den Personenwirtschaftsverkehr, aber kaum für den Gütertransport in Frage (SHELL, 2013).

❑ **Tankstellen-Infrastruktur für alternative fossile Kraftstoffe**

Die Versorgungsdichte ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Innovationsdiffusion alternativer Kraftstoffe und der dazugehörigen Antriebstechnologien, denn Energiekosten einsparen kann nur derjenige/diejenige FahrzeughalterIn, der nicht zusätzliche Umwege bis zur Tankstelle in Kauf nehmen muss. Diese Interdependenz von geringer Infrastrukturdichte wegen mangelnder Nachfrage ist ein wesentlicher Blockadefaktor, dem mit einer verkehrsräumlichen Anreizstrategie beigegeben werden müsste. Die verschiedenen Quellen zur Tankstellen-Statistik differieren ein wenig, jedenfalls kann festgestellt werden, dass im Vergleich zur Versorgungsdichte mit herkömmlichen Kraftstoffen nur CNG derzeit eine annehmbare Versorgungsdichte (ca. jede 9. Tankstelle hat eine CNG-Zapfsäule) in Österreich aufweist.

Tankstellen in Österreich mit:¹⁰

Diesel: 1692

Super: 1395

Normal: 1290

Biodiesel: 89

Ethanol: 33

CNG: 140 (andere Quelle besagen, dass es 175¹¹ (2013) bzw. 200 öffentliche Tankstellen (2012) seien¹²

LPG: 31

❑ **Fossile Kraftstoffe und Wasserstoff im Energiedichte-Vergleich**

Die Energiedichte wird entweder als volumetrisches Maß (Energieeinheit pro Raumvolumen, wie J/m³) oder als gravimetrisches Maß (Energieeinheit pro Masse des Energieträgers, wie J/kg) angegeben. Aus der Sicht des Fahrzeugbaues sind beide Bezugsgrößen bedeutend, weil entsprechender Raum konstruktiv vorgesehen werden muss, der Nutzvolumen für die Güterbeladung kosten kann, oder ein entsprechender Anteil am zulässigen Fahrzeuggesamtgewicht beansprucht wird, der zulasten der Nutzlastkapazität geht. Insbesondere das Verhältnis zwischen den Dimensionen des Tanks samt der notwendigen Ausrüstung für Kühlisolierung und Druckbehältnis und der durchschnittlich erzielbaren Leistung ausgedrückt in Reichweite (in tkm) und Spitzenenergie für den Antrieb (in kW) ist von Interesse, wenn die Antriebsformen und ihre Kraftstoffe in Hinblick auf ihre Einsatzfähigkeit verglichen werden sollen.

Tabelle 1-4: Fossile Kraftstoffe und Wasserstoff im Vergleich der Energiedichte

Kraftstoffart	Aggregatzustand im Tank	Dichte	Heizwert kWh/kg	Tankvolumen m ³ /100 kWh
Superbenzin	flüssig	740 kg/m ³	12,00	0,0112
Diesel	flüssig	830 kg/m ³	11,80	0,0102
Ethanol (Biodiesel)	flüssig	789 kg/m ³	7,44	0,0170
Autogas als LPG	flüssig	540 kg/m ³	12,80	0,0147
Erdgas H-Gas als CNG	gasförmig	0,81 kg/Nm ³ unkomprimiert	13,00	9,4967 unkomprimiert
Erdgas L-Gas als LNG	flüssig	0,82 kg/Nm ³ unkomprimiert	11,30	10,792 unkomprimiert
Wasserstoff	flüssig	70 kg/m ³	33,30	0,0429

Quelle: eigene Zusammenstellung (arp) aus KRAFTSTOFF-INFO¹³

Anmerkung 1 zum Unterschied kg/Nm³ und kg/m³ bei Gas:

Die Ausdehnung von Gas ist abhängig von Volumen, Druck und Temperatur. Um Gase miteinander vergleichen zu können, wurde ein Bezug normiert: „Die stoffliche Menge eines Gases (mol oder kg), welche bei einem Druck von 1,013 bar (1013 mbar) und einer Temperatur von 273,15 K (0 °C) ein Volumen von 1 m³ ausfüllt, wird als ein Normkubikmeter (Nm³) Gas bezeichnet. Damit erhält man eine eindeutige Quantifizierung der Gase über das Volumen.“¹⁴

Anmerkung 2 zum Qualitätsmerkmal H und L und zur Maßeinheit kg bei Gas:

1 kg Erdgas, mit einem Methangehalt von 84-99 % wird als High-Gas, mit weniger Methangehalt als Low-Gas bezeichnet. 1 kg H-Gas entspricht ungefähr 1,5 l Benzin oder 1,33 l Dieselkraftstoff. Nach dem Eichgesetz darf Erdgas nicht nach Volumen (Liter) oder Energiegehalt (Kilowattstunde), sondern muss nach Masse (Kilogramm) verkauft werden. Ein in den Zapfsäulen eingebautes Messinstrument (Coriolis-Zähler) misst die durchströmende Masse beim Tankvorgang.¹⁵

1.1.2.2 Wasserstoff als Energiequelle

Wasserstoff kann als Kraftstoff entweder direkt zum Antrieb in einem VKM verbrannt werden oder als Reaktionsstoff einer Brennstoffzelle zur elektrochemischen Stromerzeugung zum Antrieb eines Elektromotors zugeführt werden. Daher sind Fahrzeuge des ersten Typs VKM-angetriebene und des zweiten Typs (Fuel Cell Vehicle) elektrisch angetriebene Fahrzeuge, die keine Batterie für den Antrieb brauchen.

Das grundlegende Problem bei der Bereitstellung von Wasserstoff ist, dass er seinerseits je nach Ausgangsstoffen chemisch über Elektrolyse, Pyrolyse oder Katalyse mit Energieeinsatz erzeugt werden muss, weil Wasserstoff natürlich nicht vorkommt. Als industrielles Nebenprodukt, wie bei der Rohölraffinierung oder der Kunststoff-Produktion, fällt Wasserstoff jedoch als Quelle an.

Eine andere hoffnungsvolle Quelle könnte die Nutzung von Überschussstrom aus der Windkraftherzeugung für die Wasserstoffproduktion sein. Um Wasserstoff aber als kommerziell verwendbaren Brennstoff

einzusetzen, bedarf es noch einer Kette von technischen und wirtschaftlichen Problemlösungen, die von der Erzeugung über die Speicherung, Lagerung und Verteilung bis zur Sicherheit seiner Nutzung reichen.

❑ Wasserstoffverbrennung

Funktional gleicht der Wasserstoffverbrennungsmotor einem benzinbetriebenen VKM, wobei der Wasserstoff entweder durch Zündkerzen oder durch einen Dieselmotorkraftstoff-Zündstrahl zur Verbrennung gebracht wird. Der Vorteil der Wasserstoffverbrennung ist, dass kein CO₂ und keine Feinstaubpartikel entstehen. Wohl aber werden, wenngleich um die Hälfte reduziert gegenüber einem herkömmlichen VKM, Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) und natürlich Wasserdampf ausgestoßen. Zudem wird ein höherer Wirkungsgrad bis zu 45 % erzielt. Allerdings ist die Antriebsleistung nicht ebenbürtig, da das Wasserstoffgas einen niedrigeren Energiegehalt beziehungsweise als Gas-Luft-Gemisch einen hohen Volumenanteil aufweist. Wasserstoff hat bezogen auf seine Masse eine relativ hohe Energiedichte, die etwa drei Mal so hoch ist wie die von Benzin. Wasserstoff muss auf bis zu 700 bar komprimiert (oder auf -253 °C heruntergekühlt und verflüssigt) werden, um eine akzeptable Tankreichweite zu erzielen (SHELL, 2013).

Die Versorgungskette von Wasserstoff (Well-to-Wheel), insbesondere die Tankstelleneinrichtung und der Tank, ist mit einem erheblich höheren Aufwand als bei Benzin oder Diesel verbunden, weil hierzu ein spezieller Tank nötig ist, der unter 700 bar Druck gefüllt wird. Zusätzlich muss Wasserstoff gekühlt werden.¹⁶ Gegenwärtig betreibt die OMV, bei der Wasserstoff anfällt, eine Tankstelle in Wien Floridsdorf und eine zweite wird in Innsbruck im Herbst 2014 eröffnet. Damit zumindest diese Distanz tour/retour zurückgelegt werden kann.

Im Übrigen sei erwähnt, dass der Wasserstoffverbrennungsmotor bei drei Bussen von MAN am Flughafen München im Vorfelddienst Anwendung fand.¹⁷

Abbildung 1-15: Österreich-Premiere einer Fuel-Cell-Testfahrt an der Wasserstofftankstelle in Wien-Floridsdorf



Bild: Hyundai, 2014

❑ Wasserstoff für die Brennstoffzelle (Fuel Cell)

Fahrzeuge mit Brennstoffzelle sind antriebsseitig Elektroautos, wobei die Brennstoffzelle gespeist aus einem Wasserstofftank, dessen Anforderungen zuvor beschrieben wurden, die elektrische Energie für den Antrieb des Elektromotors je nach fahrdynamischer Anforderung erzeugt. Dadurch kann zwar auf große

und schwere Batterien verzichtet werden, jedoch sind der spezielle, vergleichsweise größere Tank und die Brennstoffzelle nebst dem Motor im Fahrzeug unterzubringen.

Positiv anzuführen ist die ausreichende Tankreichweite, die bei 500 bis unter 600 km liegt und der gute Wirkungsgrad mit bis zu 55 % des elektrischen Antriebes, der ohne Getriebe das Drehmoment unmittelbar wirksam werden lässt. Das ist fahrdynamisch im dichten Verkehrsfluss vorteilhaft, für eine Rekuperation fehlt aber die speichernde Batterie. Das **Hauptargument für einen Einsatz der Brennstoffzellentechnologie** ist, dass weder CO₂ noch Partikel an die Umwelt abgegeben werden.¹⁸

Der koreanische Autohersteller Hyundai hat bereits ein SUV-Modell als 48-Monate-Leasing-Angebot für Frühankommlinge auf den Markt gebracht. Dazu müsste aber das nationale Tankstellennetz wohl noch verdichtet werden und eine kg-Preisspanne für den Kraftstoff festgelegt werden.

Die **Hauptürde ist die aufwendige Sicherheitsarchitektur für die Wasserstoffversorgungskette Well-to-Wheel**. Übrigens eignet sich das Fuel-Cell-Konzept prinzipiell für den täglichen Personenverkehrsverkehr von Dienstleistungsunternehmen mit eigener überschaubarer Flotte stationiert im näheren Umkreis einer Wasserstoff-Tankstelle. Wie bei allen neuen Technologien wird eine qualifizierte Wartung zum Angebot für die potenziellen KundInnen gehören müssen.

➤ **Resümee Handlungsfeld Wasserstoffantriebstechnologien**

- Das FTI-Potenzial, das noch zu heben sein wird, ist die antriebsseitige Leistungssteigerung für Einsatzbereiche als Nutzfahrzeug, der Einbezug der Möglichkeiten der Leichtbauweise am Fahrzeug und bei den Lademitteln sowie die Entwicklung einer Infrastrukturstrategie zur Verdichtung des Wasserstoffversorgungsnetzes. Schließlich sollten der Wasserstoffantrieb und der auf Brennstoffzellen gestützte E-Antrieb mit ihrem gemeinsamen Nenner Wasserstoffversorgung in den Forschungsblick genommen werden.
- Resümierend kann zum Forschungspfad gesagt werden: Da sich ein Pionierhersteller – trotz bestehender Zweifel an der Operabilität dieser Wasserstofftechnologien für die FahrzeugnutzerInnen – auf den SUV-Markt wagt, sollte dieser Forschungskomplex mit einer längerfristigen Perspektive versehen aufrecht bleiben. Nicht zuletzt dann, wenn der Nachweis einer umfassend positiven Umweltbilanz gelingen kann.

1.1.2.3 Elektroantrieb und Infrastruktur für die E-Mobilität

□ **Elektrifizierung bzw. Hybridisierung des Antriebsstranges**

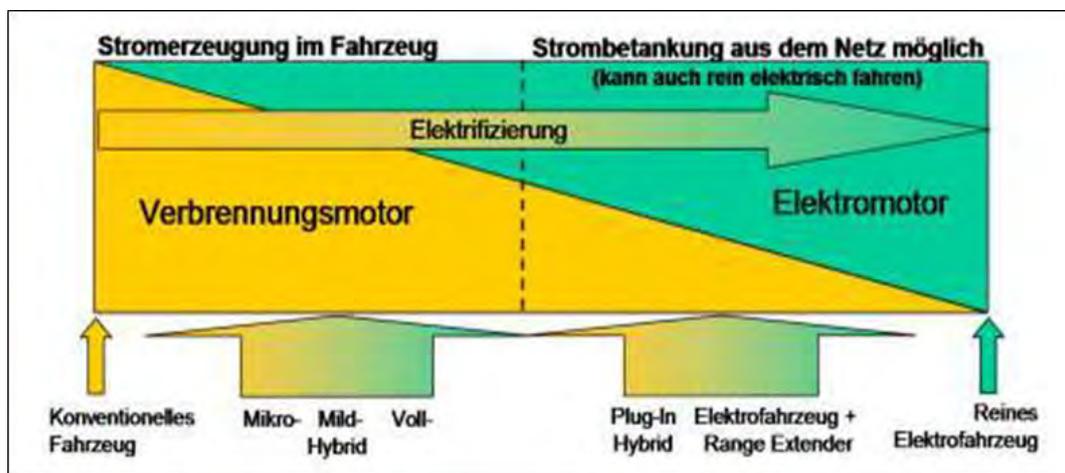
Trotz der Weiterentwicklung der Batterietechnologie kann das Elektrofahrzeug vor allem in Hinblick auf die Einsatzreichweite mit den Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmotoren bei weitem noch nicht mithalten. Daher bieten Hybridlösungen dann eine Alternative, wenn nicht nur fahrzeugtechnische Leistungsparameter zu erfüllen sind, sondern außergewöhnliche umweltseitige Anforderungen (Low-/Zero Emission) gestellt werden und der beabsichtigte Einsatzzweck außerdem Energieeinsparungen ermöglicht.

Hybrid-Antriebe besitzen mindestens zwei Energiewandler (Otto- oder Diesel- und Elektromotor) und zwei Energiespeichersysteme (Batterie und Kraftstofftank). Im Vergleich zum reinen Elektrofahrzeug benötigt der Hybridantrieb eine kleinere und damit kostengünstigere Batterie. Durch die Kombination aus zwei

Energiewandlern können sich Kraftstoffeinsparungen sowie eine Verbesserung der Fahrdynamik ergeben. Eine niedrige Drehzahl bzw. eine niedrige Fahrgeschwindigkeit bedeutet für den Elektromotor einen guten Wirkungsgrad, für den Verbrennungsmotor aber einen hohen Kraftstoffverbrauch. Umgekehrt ist der Elektromotor bei einer hohen Drehzahl überfordert und der Verbrennungsmotor erreicht hier einen guten Kraftstoffverbrauch (SCHWINGSHACKL, 2009).

Die verschiedenen Hybridkonzepte werden nach der Anordnung und den Leistungsklassen der elektrischen Antriebe unterschieden (WALLENTOWITZ, H.; FREIALDENHOVEN, A., 2011). Nachfolgende Abbildung 1-16 bis Abbildung 1-18 fassen die Hybridkonzepte und ihre Funktionalitäten zusammen:

Abbildung 1-16: Kombinationsmöglichkeiten von Verbrennungsmotor und Elektromotor in Hybridkonzepten



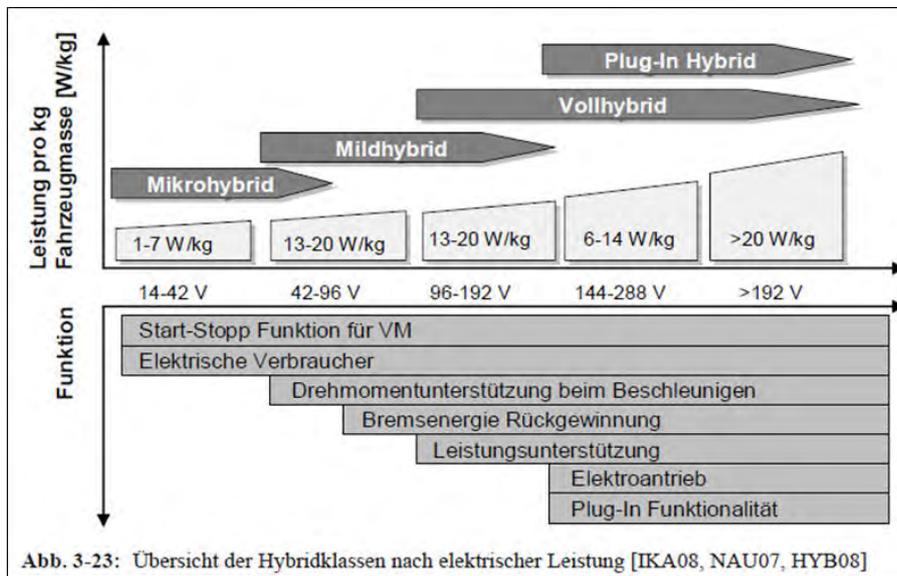
Quelle: IFEU 2009

- Beim **Mikro-Hybrid** werden die Lichtmaschine und der Anlasser durch einen integrierten Starter-Generator ersetzt, welcher die Start/Stop-Funktion erfüllt. Wenn eine gewisse Geschwindigkeit unterschritten wird, während der/die FahrerIn den Fuß auf der Bremse hat, schaltet sich der Motor aus. Der Motor springt wieder an, wenn der/die FahrerIn von der Bremse geht. Durch einen Mikro-Hybrid ist eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 11 % zu erwarten, wobei im Langstreckenbetrieb die Einsparung deutlich geringer ausfällt. Diese Hybrid-Variante stellt eine kostengünstige Alternative mit geringem technischem Aufwand dar.
- Bei einem **Mild-Hybrid** wird eine 5-15 kW leistende Elektromaschine eingesetzt. Damit wird die Bremsenergie rückgewonnen (Rekuperation) sowie eine elektrische Antriebsunterstützung bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten und die Kraftstoffeinsparung durch die Start/Stop-Funktion ermöglicht. Die Spannungen liegen zwischen 42-150 Volt, wodurch gesonderte Energiespeicher, wie beispielsweise Hochvoltbatterien, erforderlich sind, um hohe Ströme abgeben bzw. aufnehmen zu können.
- Der **Vollhybrid** ermöglicht ein rein elektrisches und somit abgasfreies Fahren über gewisse Strecken, wobei zwischen parallelen, seriellen und leistungsverzweigten Hybridantrieben unterschieden wird. Üblicherweise liegt die E-Motorleistung über 20 kW und die Batterie hat eine Spannung von 300 Volt.

Die Elektromotoren sind damit leistungsstärker, aber auch teurer als jene bei Mikro- und Mild-Hybriden (s. Abbildung 1-18).

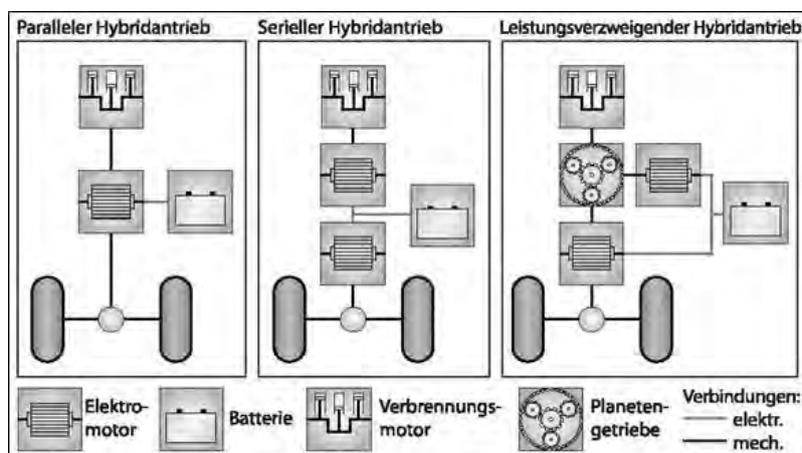
- Unter einem **Parallel-Hybrid** ist zu verstehen, dass beide Antriebsquellen (Verbrennungsmotor und Elektromotor) gemeinsam, als auch jede für sich alleine, das Fahrzeug antreiben kann. Üblicherweise wird der reine Elektro-Betrieb bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h verwendet und darüber hinaus arbeitet der Verbrennungsmotor alleine. Als zusätzliche Unterstützung (Booster) kann auch bei höheren Geschwindigkeiten der Elektromotor zugeschaltet werden. Dadurch können mit sparsamen Antrieben kurzzeitig hohe Fahrleistungen bereitgestellt werden.
- Im Vergleich dazu treibt beim **seriellen Hybrid** der Verbrennungsmotor nur einen Generator an, wodurch sowohl Strom zum Fahren als auch zum Laden der Batterie erzeugt wird. Dadurch kann der Verbrennungsmotor im Bestpunkt seines Verbrauchs betrieben werden. Anders als beim Parallel-Hybrid sind der Verbrennungsmotor, der Generator und der Elektromotor im seriellen Hybrid größer und schwerer, damit sie die maximal erforderlichen Leistungen bereitstellen können. Diese Antriebsform eignet sich besonders für Stadtbusse, da aufgrund der Haltestellenstandzeiten der Dieselmotor die Batterie aufladen kann und aufgrund der regelmäßigen Bremsvorgänge das Rekuperationspotenzial genutzt werden kann.
- Beim **leistungsverzweigten Hybrid** werden die Leistungen des elektrischen und des mechanischen Antriebsstranges addiert (Drehzahladdition). Dafür werden neben dem VKM ein Generator und ein elektrischer Motor benötigt, denn bei dem leistungsverzweigten Hybrid wird einerseits die Verbrennungsmotorleistung sowohl für den Generator zur Ladung der Batterie als auch für den auf den elektrischen Antriebsmotor verwendet. Im Vergleich zum Parallel-Hybrid sind ein größerer Verbrennungsmotor und ein Planetengetriebe für die Leistungsverzweigung erforderlich.
- Der **Plug-In-Hybrid** ist nicht (nur) auf den VKM für die Stromerzeugung mittels Generator angewiesen, sondern verfügt über Ladeeinrichtungen für seine Batterie aus dem allgemeinen Stromnetz, ist also ein vollständiges Elektrofahrzeug, aber auch ein vollständiges VKM-Fahrzeug.
- Elektrofahrzeuge, die mit einem **Range Extender** ausgestattet sind, vergrößern mittels eines kleinen VKM zur Aufladung der Batterie ihre begrenzte Reichweite. Die hauptsächliche Funktion scheint aber das höhere Sicherheitsgefühl für den Benutzer oder die Benutzerin zu sein, mit dessen Hilfe eine Ladestation anfahren zu können.
- Das reine **Elektrofahrzeug** besitzt ausschließlich einen elektrischen Antrieb und bezieht die gesamte Energie aus einer Batterie, welche am Netz geladen wird.
- Schließlich ist ein Fahrzeug mit **Brennstoffzelle** ein reines Elektrofahrzeug, dessen Energiequelle ein Gas, wie Wasserstoff oder Methan ist, welches in der Brennstoffzelle mit Sauerstoff reagiert und durch umgekehrte Elektrolyse zur Stromerzeugung dient, die den Elektromotor versorgt.

Abbildung 1-17: Hybrid-Varianten nach Funktionalität und Leistung



Quelle: SCHWINGSHACKL (2009) nach WALLENTOWITZ et al. (2011)

Abbildung 1-18: Beispielhafte Strukturvarianten von Hybridfahrzeugen



Quelle: SCHWINGSHACKL (2009) nach WALLENTOWITZ et al. (2011)

□ Komponenten des Elektroantriebes

Der elektrische Traktionsantrieb besteht aus den hauptsächlichen Komponenten (SCHWINGSHACKL, 2009, 34):

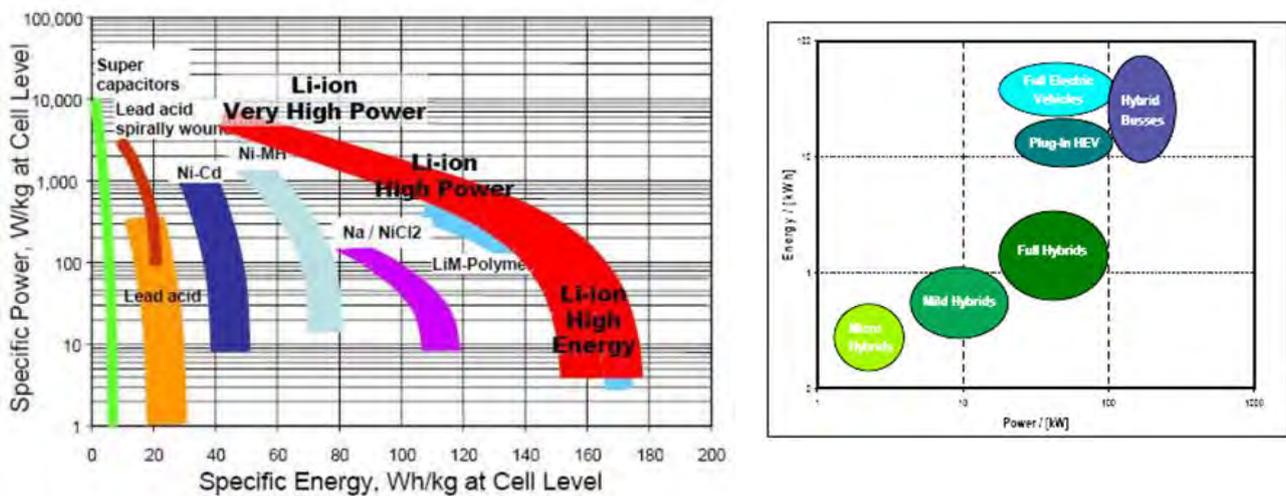
- Elektromotor (Ein- oder Tandemmotorsystem, Radnabenmotor, Elektromotor im hybridisierten Antriebsstrang mit Batterie und/oder als Generator)
- Energiespeicherung (Batterietechnologie, Kühlung, Anspeisung, wenn nicht andere Energiequelle)
- Leistungselektronik einschließlich Regelung

□ Batterie-Leistung und Speicherkapazität

Die Batterie als Energiespeicher und deren technologische Weiterentwicklung ist die Schlüsselkomponente der Elektromobilität. Sie stellt auch gegenwärtig den kritischen Kostenfaktor bei der Umstellung der Fahrzeugflotten dar und bildet vor allem auch bei Nutzfahrzeugen den (gewichts)limitierenden Faktor für die verkehrslogistische Einsatzfähigkeit. Ihren besonderen Wert hat die Batterie als Speichermedium on board für die Energierückgewinnung durch die Rekuperation von Bremsenergie. Die Energierückgewinnung ist aber nicht beliebig ausbaubar, weil das Gewicht des Speichermediums derzeit die praktische Kapazitätsgrenze für die Rekuperation darstellt (s. dazu die Diagramme in Kap. 2.3 und Abbildung 1-19). Nutzfahrzeuge der höheren Gewichtsklassen brauchen beide Leistungsdimensionen, nämlich kurzfristige Spitzenleistungen (kW) zur Beschleunigung des Fahrzeuggesamtgewichts und eine für die verkehrslogistische Aufgabe ausreichende Leistungskapazität (kWh), die sich in der durchschnittlichen Einsatzreichweite (tkm) auswirkt.

Die Entwicklung der Speichertechnologien reicht von der Blei-, der Nickel-Cadmium-, der Nickel-Metallhydrid- bis hin zur heute als zeitgemäßer Standard geltenden Lithium-Ionen-Batterie, die den Leistungsanforderungen am ehesten gerecht wird. Zu den Speichermedien zählen auch Doppelschicht-Kondensatoren („Super-Caps“), die aber nicht zu den elektrochemischen Energiespeichern gehören, sondern durch die Polarisierung einer elektrolytischen Lösung Energie elektrostatisch speichern. Sie können vor allem kurzfristig angeforderte Spitzenleistung liefern (s. Abbildung 1-19).

Abbildung 1-19: Speicherkapazität (Wh/kg) und Leistungsgewicht (W/kg) nach Art der Batterie und Antrieb



Quelle: KÖHLER 2007 aus SCHWINGSHACKL 2009, 35

Gerade bei Nutzfahrzeugen ist der Indikator Leistungsgewicht ein „vor-wirtschaftliches“ Kriterium, weil die abrufbare elektrische Kraft-Leistung je kg Speichermedium und Antriebsaggregate in einem umgekehrt kommunizierenden Verhältnis zur potenziellen Transportleistung steht. Trivialer ausgedrückt, je schneller und weiter der Transportlauf gehen soll, desto leichter muss die Nutzlast und desto ärmer muss der Laufweg an Stopps sein.

In wirtschaftlicher Hinsicht sind es die Gestehungskosten der Batterie und die durch eine bestimmte Anzahl von Ladezyklen (Ent- und Aufladungen) und der Qualität des Kühlungsmanagements der Zellen begrenzte Lebensdauer von derzeit rund fünf Jahren bei Kraftfahrzeugen, nach der die Batterie ausgetauscht werden muss. Einige FahrzeuganbieterInnen vermieten daher die Komponente Batterie auf Zeit. Positiv auf die Lebensdauer einer Fahrzeugbatterie wirkt sich ein Batterie-Lademanagementsystem aus, das den Ladezustand etwa zwischen 20 % im Minimum und 80 % im Maximum halten soll. Normale Ladevorgänge, die mehrere Stunden in Anspruch nehmen, sind Schnellladevorgängen in Hinblick auf die Lebensdauer vorzuziehen. Dieser Umstand ist bei der Gestaltung der Ladeinfrastruktur strategisch mitzubedenken.

❑ Ladevorgänge und Ladeinfrastruktur

Das Aufladen einer Batterie kann erstens konduktiv durch temporäres Anschließen an das Stromnetz, zweitens durch fahrdynamisches Rekuperieren, das Bremsvorgänge für eine kurzfristige Steigerung des Ladezustandes ausnutzt, und drittens - eher noch als Zukunftsoption für Wirtschaftsverkehre - durch induktives Laden, also die berührungslose Energieübertragung im stationären oder sogar fahrdynamischen Betrieb des Fahrzeuges, erfolgen.

➤ Abgesehen vom Rekuperieren sind somit das Wechselspiel und die Interdependenz zwischen der Speicherleistung der Fahrzeugbatterie und der Dichte der externen Ladeinfrastruktur sowie die darauf auszurichtende Einsatz- und Tourenplanung maßgebende Faktoren für die verkehrslogistische Einsatzfähigkeit von elektrischen Nutzfahrzeugen.

Die nachfolgende Auflistung zeigt die vielfältigen Möglichkeiten zum Laden auf, die sich anbieten, wenn man zunächst von elektrotechnischen Spezifikationen absieht:

- Energieaufnahme konduktiv zum Straßenfahrzeug
 - Stationäre Ladestationen mittels Stecker (über proprietär, gemeinschaftlich oder öffentlich betriebene Ladeinfrastruktur)
 - Stationäre Aufladung über Oberleitung und Dach-Stromabnehmer (Infrastruktur wie oben)
 - Fahrdynamisch über Fahrleitung zum Antrieb (wie O-Bus im öffentlichen Straßenraum)
 - Fahrdynamisch über Fahrleitung zur Batterie(aufladung) (z.B. abschnittsweise auf Sonderspuren)
 - Fahrdynamisch über Unterleitung in spurgeführten Abschnitten (wie Tram in Bordeaux)
- Stationärer Batteriewechsel in Wartungsstationen
- Energieaufnahme induktiv zwischen Fahrbahn und Fahrzeug als spezielles technisches System
 - Stationär induktiver Lade-Fahrestreifen zur Batterie (Vorteil gut abschirmbar außerhalb öffentlicher Verkehrsflächen)
 - Fahrdynamisch auf speziellem Fahrweg(abschnitt) zur Batterie (derzeit noch nicht praxistauglich)
- Energiezufuhr im Antriebsstrang des Nutzfahrzeuges
 - Fahrdynamisch Rekuperation der Bremsenergie zur Batterie
 - Fahrdynamisch durch Brennstoffzellen-Elektroantrieb versorgt über Wasserstofftank
 - Range Extender zur Aufladung der Batterie mittels (kleinem) VKM

- Hybrid-Fahrzeuge mit VKM und/oder Elektro-Antrieb

Ein wichtiges Kriterium, um die Elektromobilität attraktiv zu machen, ist der Ausbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur, die einfach und sicher zu verwenden ist. Dazu gehören sowohl öffentliche Ladestationen als auch solche in Eigenheimen, auf Betriebsgeländen oder auf anderen privaten Standorten, die einem beschränkten NutzerInnenkreis zugänglich gemacht werden sollen (z.B. Lagerhaus am Land, im Wirtschaftspark, an Bahnhöfen oder bei Häfen etc.).

In Hinblick auf die Gestaltung der Ladeinfrastruktur sind elektrotechnische Komponenten fahrzeugseitig und stationsseitig sowie raumplanerische und straßenbautechnische Aspekte zu beachten:

- Beim Plug-In-Fahrzeug: Die Stecker- und Kabelsysteme sowie die passenden Ladeeinheiten am Fahrzeug.^f
- Im öffentlichen Raum: Die Dichte, die Ausgestaltung und das Zugangsmanagement der öffentlich zugänglichen Ladestationen sowie die verfügbare Leistung der versorgenden Leitungen
- Auf der (auch privaten) Verkehrsfläche: Beim induktiven Laden sind es vor allem die straßenbautechnische Konzeption der Fahrbahngestaltung und die Anlage im Straßenraum.

❑ Komponenten des konduktiven Ladens einer Batterie über Steckvorrichtungen

Die International Electrotechnical Commission (IEC) hält in der Norm „IEC 62196 - Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckverbindungen und Fahrzeugstecker - Konduktive Ladung von Elektrofahrzeugen“ die wichtigsten Anforderungen für das leitungsgebundene Laden für E-Fahrzeuge fest. Damit gibt es einen globalen Standard für das Aufladen von E-Fahrzeugen. Durch die Standardisierung genießen die Fahrzeugindustrie sowie die Stromlieferanten folgende Planungssicherheiten (MENNEKES, 2011):

- Das leitungsgebundene Laden von E-Fahrzeugen erfolgt bei einer Nennbetriebsspannung von nicht mehr als 690 V Wechselstrom bei bis zu 250 A Stromstärke und nicht mehr als 1.500 V Gleichstrom bei 400 A.¹⁹
- Die notwendigen Anforderungen und Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift und Buchsensteckvorrichtungen für Wechselstrom, also die Erfordernisse und vorrangigen Größenordnungen für Infrastrukturstecker, Infrastruktursteckdosen, Fahrzeugstecker und Fahrzeugkupplungen (s. Abbildung 1-20) werden charakterisiert, wobei in drei unterschiedliche und inkompatible Steckertypen (s. Abbildung 1-20) differenziert wird:
 - Beim Typ 1 handelt sich hierbei um einen einphasigen Ladestecker mit einer Stromstärke von bis zu 32 A, einer Spannung von 110 V - 230 V sowie einer maximalen Leistung von 7,4 kW. Der Steckertyp 1 wurde in Kooperation des Autozulieferers Yazaki aus Japan und japanischen Energieversorgungsbetrieben entwickelt, welcher bereits in dem amerikanischen Automobilstandard SAE J1772 genormt ist.

^f Die kabelgebundenen Ladebetriebsarten werden von der International Electrotechnical Commission (IEC) in der dreiteiligen Norm IEC 61851 - Leitfähige Elektrofahrzeugladesysteme aufgelistet und definiert.

- Der Typ 2 wurde vom deutschen Unternehmen Mennekes zusammen mit europäischen Energieversorgungsunternehmen sowie mit der Automobilindustrie entwickelt. Der Ladestecker ist sowohl für die Einphasigkeit wie auch für die Dreiphasigkeit geeignet. Die Stromstärke ist bei diesem Typ auf maximal 63 A begrenzt, die Spannweite der Spannung ist zwischen 110 V und 500 V (Anschlussspannung 230 V einphasig und 400 V dreiphasig). Die Ladeleistung bewegt sich zwischen 3,7 kW und 43,5 kW.
- Typ 3 ist eine Entwicklung des französisch-italienischen Konsortiums EV-Plug-Alliance, unter denen sich Firmen wie Schneider Electric, Legard oder Scame befinden. Die Spannungsbreite bewegt sich hier, wie bei Typ 2, zwischen 110 V und 500 V sowie der gleichen Anschlussspannung für die Ein- und Dreiphasigkeit. Die Leistung ist ebenfalls zwischen 3,7 kW und 43,5 kW angesiedelt. Allerdings ist zu beachten, dass aufgrund der verschiedenen Leistungsstufen drei unterschiedliche Steckergeometrien (a, b, c) vonnöten sind.
- Die notwendigen Anforderungen und Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift und Buchsensteckvorrichtungen für Gleichstrom befinden sich nach Stand Februar 2014 noch in Ausarbeitung (MENNEKES, o.J.; MENNEKES, 2011).

Abbildung 1-20: Bestandteile einer Ladesteckvorrichtung für konduktives Laden



Quelle: MENNEKES, o.J.

Um zumindest eine europaweit einheitliche E-Mobility-Ladeinfrastruktur zu gewährleisten, wurde 2013 durch das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) der Steckertyp 2 von Mennekes als europäischer Standard festgelegt.²⁰

Der nun standardisierte Typ-2-Stecker soll auch als Kern des künftigen Combo-Steckers für die Gleichstromladungen verwendet werden.²¹

Eine weitere wichtige Norm ist die „IEC 61851 - Leitfähige Elektrofahrzeugladesysteme“. Diese gilt sowohl für On-Board- als auch für Off-Board-Vorrichtungen zum Laden bei Versorgungsspannungen (gemäß IEC 60038) bis zu 1.000 V bei Wechselstrom sowie 1.500 V bei Gleichstrom. Für das sichere und bedarfsgerechte Laden von Elektrofahrzeugen wird nach vier Lademodi differenziert:

- Bei Mode 1 mit Wechselstrom erfolgt die „Betankung“ über eine Standard-Haushaltssteckdose (Schuko) bis maximal 16 A dreiphasig ohne Datenaustausch mit dem Elektrofahrzeug. Die Ladeapparatur ist im Elektrofahrzeug untergebracht.
- Bei Mode 2 mit Wechselstrom erfolgt die Aufladung bis 32 A dreiphasig aus einer Haushaltssteckdose (Schuko). Im Ladekabel oder in der Infrastruktursteckdose ist eine Steuer- und Schutzfunktion integriert und die Ladeapparatur ist im Elektrofahrzeug eingebaut.
- Bei Mode 3 mit Wechselstrom ist das Laden bis 63 A dreiphasig mittels einer speziellen Ladesteckvorrichtung möglich. Das Elektrofahrzeug besitzt eine fest installierte Steuer- und Schutzfunktion in der Ladeapparatur.
- Bei Mode 4 erfolgt das Laden an einer Gleichstrom-Ladestation, in der die Steuer- und Schutzfunktion in der Ladeapparatur installiert und das Ladekabel montiert ist (MENNEKES, 2011).

Betriebsspannung (V) und Stromstärke (A) beeinflussen die Ladezeit in Abhängigkeit von der Batteriekapazität bzw. ihres Ladezustandes (kWh). Welcher Lademodus mit Wechselstrom oder mit Gleichstrom für kommerziell eingesetzte Fahrzeuge bzw. Fuhrparke in Frage kommt, hängt von vielen Faktoren am Betriebsstandort und in den durch den Fahrzeugeinsatz zu bedienenden Räumen ab.

Als Standardvoraussetzung für den Einsatz elektrischer Nutzfahrzeuge kann aber gelten: Es gibt zumindest einen Betriebsstützpunkt für die Wartung und das Aufladen der Batterie (allenfalls auch fahrzeugextern im Batteriewechselsystem) und eine Einsatzplanung, die eine regelmäßige Rückkehr dorthin vorsieht. Werksfuhrparke, wie z.B. von Handelsketten, die ihre PoS-Standorte in Baugebieten von Einkaufs- oder Fachmarktzentren bedienen, können für die Aufladung zwischendurch ausgerüstet werden, wenn es die räumliche und behördlich genehmigte Situation zulässt. Kleinbetriebe in baulichen „Innenhoflagen“ mit wenigen und kleineren Fahrzeugen im Personenwirtschafts- und Service-Verkehr können, ähnlich wie private E-FahrzeughalterInnen, einfachere Ladevorrichtungen nützen, sofern die Arbeitssicherheit dadurch nicht gefährdet wird. Die kritische Frage ist dabei, ob eine für den Geschäftszweck ausreichende Disponibilität der Fahrzeuge gewährleistet werden kann.

□ Überblick über Ladestationen in Österreich

Die nachfolgenden Tabellen geben einen ungefähren Überblick der E-Ladestationen in Österreich, die von E-Pkw und grundsätzlich auch von E-Nutzfahrzeugen der Kategorie N1 genutzt werden können. Die Dichte und zeitliche Verfügbarkeit von Ladestationen ist bei einer Antriebsform mit raschem Verzehr der gespeicherten Energie - und damit einem Reichweitenproblem - kompensativ sehr wichtig (s. Tabelle 1-5). Es bedarf außerdem zum Ersten wesentlicher Zusatzinformationen über die elektrotechnischen Ladebedin-

gungen und zum Zweiten über das Zugangs- und Benutzungsmanagement an der Ladestation selbst. Dazu gehören Angaben über Zugangszeiten, Kosten, Authentifizierung (KundInnenkarte), Anmeldemodalität und Wartezeit bzw. zulässiger und erforderlicher Ladezeitraum und welche Steckertypen vor Ort angeboten werden. Angaben, die umso dringlicher gebraucht werden, je mehr sich die E-Mobilität künftig verbreitet und erst recht, wenn an die Nutzung im Wirtschaftsverkehr durch Kleinunternehmen gedacht wird, die auf kein eigenes Netz an Betriebsstandorten zum Laden zurückgreifen können.

Tabelle 1-5: E-Ladestationen nach Bundesländern und Verfügbarkeit

	Anzahl	24h	kostenlos	24h & kostenlos
Burgenland	58	21	42	17
Kärnten	241	178	232	174
Niederösterreich	375	159	297	138
Oberösterreich	216	101	198	96
Salzburg	104	56	52	20
Steiermark	138	77	115	66
Tirol	61	33	40	24
Vorarlberg	32	21	17	12
Wien	62	29	28	9
Österreich	1.298	683	1.026	560

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Angaben aus e-tankstellen-finder.at ²²

Wie der Ausschnitt einer selbst erstellten Muster-Informationstafel (s. Tabelle 1-5) für Wien zeigt, bieten schon etliche kommerzielle Standorte für ihre KundInnen Ladestationen an. Bei stärkerer Inanspruchnahme, als sie heute gegeben ist, wird die Frage der Kapazität in räumlicher und zeitlicher Hinsicht (Zahl der Stellplätze für das Aufladen und zulässige Aufladezeit) durch ein Benutzungsmanagement zu regeln sein, um Verärgerungen bei KundInnen und BetreiberInnen zu vermeiden.

Abbildung 1-21: Ausschnitt einer Mustertabelle zur E-Ladestationen-Info-Tafel

Betreiber	Adresse	PLZ	Öffnungszeiten	Plätze	Anschlüsse	Kosten	Öko	Bezahlung	Authentifizierung	Zusatzinfo	
Wien Energie GmbH	Am Hof (Parkgarage) - Am Hof 1	1010	jederzeit	8	4x Typ2-Stecker, 400 V - 16 A; 11,1 kW	€ 2,35/h			Liefervertrag	Kundenkarte	Parkgebühr
ÖAMTC	Pasettistraße 96-98	1020	Mo-Sa 07:00 - 18:00	1	2x Schuko-Stecker, 230 V - 16 A; 3,7 kW	1h gratis f. ÖAMTC-Mitg.					
A1 Telekom Austria AG	Lassallestrasse 9	1020	jederzeit		2x CEE 3polig, 230 V - 16 A; 3,7 kW	kostenlos					Caravan Stecker
e-Carage - Parkhaus Eibl Betriebsges.	Mariahilfer Straße 18	1070	jederzeit	5	5x Schuko-Stecker, 230 V - 16 A; 3,7 kW	€ 0,50/kWh	ja	bar, EC, CC	Parkschein/Gutschein		Parkgebühr
REWE (Merkur)	Laxenburger Straße 66	1100	Mo-Do 07:30-19:30 Fr 07:00-20:00 Sa 07:00-18:00	2	2x CEE 3polig, 230 V - 16 A; 3,7 kW 2x Schuko-Stecker, 230 V - 16 A; 3,7 kW	kostenlos					
Q19 Einkaufsquartier Döbling	Grinzinger Straße 112	1190	jederzeit	2	2x CEE 3polig, 230 V - 16 A; 3,7 kW 1x CEE 5polig, 230 V - 16 A; 3,7 kW	2 Stunden gratis				SMS, Kundenkarte	
Fastbox Autoservice GmbH & CO KG	Donaustadtstrasse 17	1220	Mo-Sa 08:00-17:00	1	1x CEE 3polig, 230 V - 16 A; 3,7 kW						
Donauzentrum BetriebsführungsgesmbH	Dr. Adolf Scharfplatz 4	1220	jederzeit	2	3x CEE 3polig, 230 V - 16 A; 3,7 kW						

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Angaben aus e-tankstellen-finder.at ²³

□ Induktives Laden - eine Zukunftsoption

Die berührungslose Energieübertragung findet über deckungsgleich gebrachte Spulen, je eine in der Fahrbahndecke und eine im Fahrzeug-Unterboden, statt, zwischen denen ein Magnetfeld entsteht, das in der sekundären Spule des Fahrzeuges einen Strom induziert. Der zwischen den Spulen klaffende Luftspalt sollte etwa 8 bis 16 cm betragen. Die Übertragung erfolgt aus radiotechnischen Gründen im Frequenzbereich unter 50 Hz oder über 150 Hz (HILLGÄRTNER et al., 2012, FRAUNHOFER-ISI, 2012). Der Bereich zwischen den Spulen darf während der Übertragung nicht berührt werden, was bei stationärer Einrichtung als „Lade-Standstreifen“ leichter zu bewerkstelligen ist, als es bei fahrdynamischer Übertragung entlang eines „Lade-Fahrstreifens“ der Fall wäre. Im Prinzip kann das Magnetfeld auch von einer Ladesäule (-fläche) zur Fahrzeugfront („Kühlergrill“) oder zum Heck knapp herangeparkt aufgebaut werden. Das käme für Parkdecks oder Parkgaragen in Frage, aber wohl kaum im öffentlichen Freiraum (s. Abbildung 1-22, rechts).

Abbildung 1-22: Ladeeinrichtungen für das induktive Laden am Fahrzeug und in der Fahrbahn



Quelle: Automativ²⁴ und Karabag²⁵

Die induktive Aufladung könnte an dafür geeigneten Orten – wie die Rekuperation und/oder der Range Extender – vor allem der ergänzenden temporären „Zwischenaufladung“ zur Reichweitensteigerung während einer Liefertour dienen. So wie das bei einer städtischen Buslinie im Probetrieb an bestimmten Haltestellen in Braunschweig geschieht (KURCZWEIL et al., 2014).

Abbildung 1-23: Induktive Ladestandstreifen in der Fahrbahn von Bushaltestellen



Quelle: Heise²⁶

Eine Ausstattung über längere Strecken im öffentlichen Straßennetz wird wegen der hohen Infrastrukturkosten erst in einigen Jahrzehnten erwartet (FRAUNHOFER-ISI, 2012). Als Alternativ- oder Zwischenlösung hat Siemens in Deutschland ein Fahrleitungssystem – wie bei O-Bussen im Stadtverkehr – für den ersten Fahrstreifen auf wichtigen transnationalen Autobahnen vorgeschlagen.

Damit würde sich aber die Verkehrsabwicklung auf den Autobahnen künftig komplizierter gestalten, denn der 1. Fahrstreifen wäre dann nur für (Lang-)Lkw mit Dachstromabnehmer vorgesehen, der 2. Fahrstreifen für andere Lkw und Busse und der 3. Fahrstreifen für Pkw u.s.f. Der Verkehrsablauf würde sich dem Eisenbahnnetzbetrieb mit einer Trassenvergabe annähern, dessen Güterverkehr außerdem dadurch stärker konkurrenziert werden würde (DÖRR, 2013, 15).

Abbildung 1-24: Schweres Nutzfahrzeug mit Stromabnehmern unter Fahrleitung auf Teststrecke



Quelle: Scania

Mit dem Projekt „ENUBA 2“, das Teil des Leuchtturms „Elektromobilitätskonzepte“ der deutschen Bundesregierung ist, soll, laut den Studienerstellerinnen Siemens AG und TU Dresden, der Grundstein für ein neuartiges, ökologisch orientiertes Güterverkehrskonzept gelegt werden. *„Damit können erhebliche Beiträge zur Reduzierung der verkehrsbedingten Emissionen geleistet werden. Bisherige Studien und Versuche haben gezeigt, dass das Konzept das Potenzial besitzt, bereits mittelfristig eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige Lösung für den schweren Straßengüterverkehr zu liefern. Es gilt nun, die erprobte Technik in Richtung Serienproduktion weiterzuentwickeln. Gemeinsam mit Lkw-Herstellern arbeitet Siemens an der Fahrzeugintegration für Stromabnehmer und der Erprobung der Antriebskomponenten sowie dem Aufbau eines integrierten Gesamtsystems einschließlich geeigneter Automatisierung und Steuerung.“* (BMU, 2014).

1.1.2.4 Gegenwärtiges Marktangebot alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge

Der nachfolgende Marktüberblick ist nach Fahrzeugherstellern alphabetisch geordnet und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, insbesondere was die Verfügbarkeit für den Heimmarkt betrifft. Da die Hersteller verschiedene Antriebsvarianten in unterschiedlichen Modellvarianten anbieten, sind Zuordnungen zu logistischen Aufgabenbereichen oder zur Kraftstoffquelle nicht immer eindeutig vornehmbar. Die Leistungsangaben stammen aus den KundInneninformationen der Hersteller und sind nicht immer vollständig und vergleichbar erhältlich. Angesichts des beschränkten KundInnenkreises sind Sonderanfertigungen auf Kundenwunsch nicht ausgeschlossen. Preise werden im Allgemeinen nicht deklariert, weil sie Verhandlungssache sind, insbesondere wenn es sich um eine Flottenbestellung handeln sollte. Da Busse in den Leistungsmerkmale durchaus mit bestimmten Nutzfahrzeugmustern vergleichbar

sind, wurden einige Modelle von Herstellern auf diesem Markt mit in die Betrachtung einbezogen, nicht zuletzt weil deren Einsatz vor allem im ÖPNV und in ähnlichen Diensten (z.B. auf Flughäfen im Vorfeldverkehr) eine Vorbild- oder eine Eisbrecher-Funktion haben kann.

Übrigens aus der Tankstellenstatistik geht hervor, dass CNG, also komprimiertes Erdgas, nach den herkömmlichen flüssigen Kraftstoffen, die größte Versorgungsdichte mit rund 200 Tankstellen in Österreich aufweist. Das signalisiert die Nachfrage der FahrzeughalterInnen, allerdings noch nicht im Nutzfahrzeugbereich, korrespondiert aber mit den Marktangeboten von erdgasbetrieben Fahrzeugen auch in diesem Segment.

❑ **Cobus (P)**

Der E.Cobus fährt rein elektrisch und seine sieben Lithium-Ionen-Batterien bieten eine Reichweite von 120-160 km. Um das Batteriesystem vollständig aufzuladen werden in etwa drei Stunden benötigt.²⁷

Seit März 2014 wird der E.Cobus als rein elektrischer Flughafenbus in Porto (Portugal) eingesetzt.²⁸ Auch auf anderen Flughäfen, wie beispielsweise in Stuttgart, ist der E.Cobus bereits im Einsatz. Neben dem Einsatzbereich als Flughafenbus wird der E.Cobus auch im ÖPNV eingesetzt. Die ESWE Verkehrsgesellschaft Wiesbaden und Cobus haben einen Leasingvertrag für zwei Elektrobusse unterschrieben. Dabei sollen die beiden zwölf Meter langen Elektrobusse ab Juli 2014 zwei Jahre lang im Hessener Linienbetrieb getestet werden.²⁹

Tabelle 1-6: Leistungsmerkmale des E-Cobus

	E.Cobus
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	4.200
Nutzlast [kg]	
Kraftstoff	Elektrisch (Lithium-Ionen)
Reichweite [km]	120 - 160 km

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-25: E-Cobus



Quelle: Cobus

❑ **DAF**³⁰

Tabelle 1-7: Leistungsmerkmale des DAF LF Hybrid

	DAF LF Hybrid
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	12.000
Nutzlast [kg]	7.500
Kraftstoff	Hybrid
Reichweite [km]	

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-26: DAF LF Hybrid



Quelle: DAF

Nach Vollauffladung der Batterie kann der DAF LF Hybrid etwa zwei Kilometer rein elektrisch und ohne Hilfe des Dieselmotors fahren. Während diesem Vorgang bleibt der Dieselmotor im Leerlauf, um verschiedene andere Komponenten, wie beispielsweise die Lenkhilfepumpe, anzutreiben. Weiters verfügt der DAF LF Hybrid über ein Start/Stop-System, wodurch zusätzlich Kraftstoff eingespart werden kann.

❑ **E-Force (CH)³¹**

Der E-Force ist aufgrund seiner Reichweite sowohl für den innerstädtischen als auch für den regionalen Lieferkreis geeignet. Er ist mit zwei Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LiFe-Po₄) mit jeweils 120 kWh ausgestattet. Diese Batterien wiegen insgesamt 2.600 kg und können innerhalb von sechs Stunden aufgeladen werden.

Von September bis Dezember 2013 wurde der E-Force in der Schweiz bereits getestet. Hier beliefert er im Auftrag der Feldschlösschen Getränke AG 11 KundInnen in der Agglomeration Zürich mit Bier und Getränken (4,6 t) und legt pro Tag durchschnittlich 65 km zurück.

Tabelle 1-8: Leistungsmerkmale des E-Force

	E-FORCE
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	18.000
Nutzlast [kg]	10.000
Kraftstoff	Elektrisch (Lithium-Eisenphosphat)
Reichweite (km)	200 - 300 km

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-27: E-Force



Quelle: E-Force

❑ **FIAT (I)³²**

Der italienische Hersteller hat nur N1-Fahrzeuge in seinem Portfolio. Ausschlaggebend für dieses Angebot an solchen stadtgängigen Fahrzeugen dürfte die Nachfrage für die Bedienung der historischen Altstädte Italiens sein.

Abbildung 1-28: Fiat Fiorina, Doblo und Ducato Maxi



Quelle: Fiat

Tabelle 1-9: Leistungsmerkmale der alternativen Nutzfahrzeugmodelle von Fiat

	Ducato Maxi Natural		Doblo Cargo		Fiorina 1.4 Natural		
	Power		Natural Power		Power		
Ladevolumen [m ³]	11,5-17		3,4-3,8		2,1-2,4		
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	3.500		2.430		1.680		
Nutzlast [kg]	800		980		500		
Kraftstoff	Erdgas	Benzin	Erdgas	Benzin	Erdgas	Benzin	
Reichweite [km]	400	> 100	325	300	300	660	
Tankinhalt	220 l (37kg)		15 l	16,5 kg	22 l	13,2 kg	45 l

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Bei allen drei Modellen ist ein kleinerer Benzintank vorhanden, wodurch sichergestellt wird, dass sich die nächste Tankstelle in Reichweite befindet. Beim Ducato Maxi erfolgt die Umstellung von Erdgas- auf Benzinbetrieb automatisch, wenn der Erdgastank leer ist. Bei den anderen beiden Modellen, Doblo Cargo und Fiorina, handelt es sich um einen bivalenten Benzin-Erdgasantrieb, bei dem das Umschalten per Knopfdruck erfolgt und vom Fahrpersonal selbst steuerbar ist. Bei allen drei Modellen werden die Gasflaschen am Unterboden des Fahrzeuges angebracht, wodurch das Ladevolumen nicht eingeschränkt wird.

□ IVECO (I)

Dieser italienische Hersteller schwerer Nutzfahrzeuge deckt das Angebot im Bereich der Fahrzeugklassen N₂, N₃ bzw. O (Sattelzugmaschinen) und von Bussen ab. Er bietet ein breiteres Spektrum an Antriebsvarianten an: CNG und LNG betriebene N₃-Fahrzeuge sowie die Citelis-Busse³³. In der N₁-Klasse ist es der Zustellwagen Daily für KEP-Dienste. Dieser ist neben dem konventionellen Antrieb mit den beiden Varianten Elektrofahrzeug und Mild-Hybridantrieb verfügbar, wenn eine umweltfreundlichere und leisere Alternative für die städtischen Auslieferfahrten gesucht wird.^{34 35} Bei der Hybrid-Variante kommt ein sogenannter „Mild“-Hybrid zum Einsatz, wodurch ein vergleichsweise günstiges Verhältnis zwischen Nutzlast, Reichweite und Verbrauch erreicht werden kann. Der an die Umweltbedingungen angepasste Einsatz der Antriebe im Stadtverkehr wird vom Hersteller in Abbildung 1-30 dargestellt.

DB Schenker, genauer die Geschäftsstelle Linz, nahm 2012 die ersten beiden Erdgas-Lkw in ihrer Flotte auf. Bei diesen Fahrzeugen, die im Verteilverkehr eingesetzt werden, handelt es sich um den Iveco Daily 35S14G EEV und um den Iveco Eurocargo MLC 150 E 20 P CNG. Der Iveco Daily wird mit seinen bis zu 730 kg Nutzlast und seinen acht Palettenstellplätzen in der Linzer Innenstadt eingesetzt. Im Auftrag von DB Schenker wird die Firma Bucher Transporte mit dem Iveco Eurocargo, welcher eine Nutzlast von 7,5 t aufweist (15 Paletten können transportiert werden), das Industriedreieck Linz-Wels-Steyr bedienen.³⁶

Die Lebensmittelkette SPAR hat in den Niederlanden vier Lkw mit LNG-Antrieb in ihrem Fuhrpark. Diese sind bereits seit zwei Jahren im Einsatz und weisen eine Jahreslaufleistung von rund 125.000 km auf.³⁷

Abbildung 1-29: Die Nutzfahrzeugmodelle von IVECO: Daily, Stralis Hi Road CNG, Stralis CNG und Irisbus Citelis



Quelle: IVECO

Tabelle 1-10: Leistungsmerkmale der alternativen Nutzfahrzeugmodelle von IVECO

	Iveco Daily Natural Power		Iveco Daily Electric
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	150		70
Ladevolumen [m ³]	bis 17 m ³		bis 17 m ³
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	3.500		3.500
Kraftstoff	Erdgas	Benzin	Elektrisch (ZEBRA)
Reichweite [km]	400	> 100	~120 km
Tankinhalt	39 kg	15 l	

	Iveco Stralis Hi Road CNG	Iveco Eurogarco MLC 150 E 20 P	Iveco Stralis LNG	Irisbus Iveco Citelis
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	18.000	15.000		18.000
Nutzlast [kg]	10.650	7.500		~7.000
Kraftstoff	CNG	CNG	LNG	CNG
Reichweite [km]	~450 km	~400 km	~750 km	~250 km
Tankinhalt	85 kg CNG		200 kg LNG + 48 kg CNG	200 kg CNG

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-30: Verkehrsraumgerechter Einsatz von Hybrid- und Elektro-Nutzfahrzeugen im Ballungsraum



Quelle: IVECO

❑ KÖGEL-CNG-Modul³⁸

Der Trailer von Kögel dient dazu, die Reichweite von gasbetriebenen Zugmaschinen deutlich zu erhöhen. Dies erfolgt durch das CNG-Modul, welches im Palettenkasten oder zwischen dem Fahrzeugrahmen montiert bzw. nachgerüstet wird. Darin befinden sich zusätzliche Gastanks, welche rund 1.100 l Erdgas fassen. Durch diese zusätzlichen 180 kg CNG kann die Reichweite um zusätzliche 500-700 km ausgedehnt werden und somit schafft ein erdgasbetriebener Lkw fernverkehrstaugliche 1.000 km. Insgesamt wiegt das CNG-Modul 524 kg, wodurch sich die Nutzlast zwar etwas reduziert, was jedoch durch Kostenvorteile und die Umweltverträglichkeit kompensiert wird.

Abbildung 1-31: KÖGEL-CNG-Modul am Trailer



Quelle: KÖGEL

□ MAN (D)

MAN Lion's City CNG und MAN Lion's City Hybrid

MAN ist führend im Bereich der Erdgas-Busse. Mehr als 7.500 Erdgas-Busse und CNG-Motoren wurden seit dem Jahr 2000 weltweit ausgeliefert. Beispielsweise stammen 90 von den 100 CNG-Bussen, welche in Göteborg im Einsatz sind, von MAN. In den vergangenen Jahren lieferte MAN etwa 220 CNG-Busse (Typ: Lions City) an das türkische Verkehrsunternehmen EGO-Ankara, welches mit 1.092 MAN Lions City CNG eine sehr große Gasbusflotte besitzt.

Der MAN Lions City ist neben dem konventionellen Dieselantrieb auch als CNG- und Hybrid-Variante erhältlich. Die Erdgasvariante unterscheidet sich äußerlich nur durch die Dachhaube, unter der sich die Gastanks befinden.³⁹ Bei der Hybridvariante handelt es sich um einen Common Rail-Motor, wobei der Bus in der Regel elektrisch beschleunigt und zusätzlich von der Rekuperation (Nutzung der Bremsenergie) profitiert.⁴⁰ Damit können durch die Stadtkerne transversal geführte Linien mittelgroßer Städte umweltfreundlich betrieben werden.

Tabelle 1-11: Leistungsmerkmale des MAN Lions City

	MAN Lion's City CNG
max. Leistung	310 PS
Kraftstoff	CNG
Reichweite [km]	450 km
Tankinhalt	188 kg

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-32: MAN Lion's City



Quelle: MAN

Ähnlich der transversalen Buslinien gestalten sich von der Streckenführung Pendelverkehre bzw. Liefertouren für die innerstädtische Konsumsenke oder für Sammelverkehre kommunaler Entsorgungsdienste. Allen diesen Verkehrsaufgaben ist gemeinsam, dass sie geräusch- und emissionsarm abgewickelt werden und kurze Haltezeiten aufweisen sollen. Die nachgenannten Beispiele von Fahrzeugentwicklungen des Herstellers weisen in diese Zielrichtung.

MAN Erdgas-Lkw für AmBev⁴¹

Speziell für die Fußball-WM in Brasilien 2014 hat der größte Getränkehersteller Lateinamerikas (AmBev) MAN beauftragt, einen komplett mit Erdgas angetriebenen Lkw zu entwickeln. Die Erdgasspeichersysteme des Lkws bestehen aus drei Zylindern und fassen 150 m³ Gas, womit er eine Reichweite von 200 km erzielt (s. Abbildung 1-33, links).

Abbildung 1-33: MAN Erdgas-Lkw für AmBev (li.) und MAN Metropolis (re.)



Quelle: MAN

Man Metropolis – ein urbanes Spezialfahrzeugkonzept mit Batterie-Range Extender ⁴²

MAN erforschte zusammen mit Benteler Engineering Services die Realisierbarkeit eines Fahrzeugkonzepts, dem die künftigen Anforderungen an schwere Lkw im stadtdienlichen Verkehr zugrunde lagen. Der MAN Metropolis besitzt eine modulare Lithium-Ionen-Batterie, welche sich mittels Plug-In-Funktion an der Steckdose aufladen lässt. Zusätzlich ist ein Range Extender im Fahrzeug integriert, welcher bei Bedarf mittels Generator elektrische Energie an die Batterie liefert. Aufgrund der erforderlichen Größe der Batterie für den Betrieb von schweren Nutzfahrzeugen kann der Metropolis rund 15 km rein elektrisch zurücklegen.

Neben der theoretischen Realisierbarkeit wird die Alltagstauglichkeit durch einen Testbetrieb getestet. Dabei handelt es sich um einen Abfallsammelbetrieb (SITA) in der Innenstadt Belgiens, der den MAN Metropolis seit Januar 2013 bis zu zwei Jahre testen wird. Der elektrische Betrieb des MAN Metropolis ist auf eine komplette Tagesschicht ausgelegt, welche aus zwei Zyklen zu je vier Stunden und mit je 15 km Fahrstrecke besteht. Pro Runde kann die gleiche Menge Müll wie mit einem herkömmlichen Fahrzeug transportiert werden, da der frei werdende Platz unterhalb der Fahrkabine durch den entfallenen Dieselmotor für die Batterie verwendet werden kann. Der Range Extender ist vergleichsweise klein und befindet sich hinter der Vorderachse.

❑ Mercedes-Benz (D)

Der Mercedes Benz Sprinter ist neben dem konventionellen Antrieb auch mit Erdgas (CNG) erhältlich. Dabei ist sowohl ein monovalenter als auch ein bivalenter Erdgasantrieb möglich. Bei der bivalenten Ausführung wird auf Knopfdruck zwischen dem Erdgas- und dem Benzinbetrieb umgeschaltet. Bei der monovalenten Ausführung erfolgt das Umschalten automatisch und kann nicht beeinflusst werden. Dabei dient der kleine Benzintank (max. 15 l) lediglich zum Starten des Motors und als Notreserve. ⁴³

Der Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid hat einen seriellen Hybridantrieb, wobei das Kernstück die aus zwei Modulen bestehende Brennstoffzelle ist. Diese befindet sich auf dem Fahrzeugdach, direkt neben den vier großen Lüftern, welche die Brennstoffzelle auf einer Betriebstemperatur von rund 80°C halten. Auf der vorderen Dachhälfte des Fahrzeuges befindet sich der Wasserstoffvorrat (diese bis zu sieben Druckgastanks fassen etwa 35 l). Derzeit sind etwa 22 Citaro FuelCELL-Hybrid bei verschiedenen europäischen Betrieben im Einsatz.

Der Mercedes Benz Econic wird europaweit beispielsweise als Entsorgungsfahrzeug in Berlin, als Straßenreinigungsfahrzeug in Prag sowie im Verteilverkehr in den Niederlanden und in London eingesetzt.⁴⁴ Der Mercedes Benz Citaro ist neben der konventionellen Variante auch als Erdgas- und Hybrid-Variante erhältlich. Bei dem Hybridsystem werden eine Brennstoffzelle, ein Elektromotor und eine Lithium-Ionen-Batterie kombiniert, sodass während der Fahrt keine Schadstoffe entstehen. Die sieben Behälter, mit insgesamt 35 kg Wasserstoff, sind auf dem Dach des Fahrzeuges untergebracht. Die Lithium-Ionen-Batterie wird wassergekühlt und dient zum Antrieb des Elektromotors.⁴⁵

Abbildung 1-34: Mercedes-Benz Sprinter NGT, EvoBus Citaro CNG, Econic LNG und Econic NGT



Quelle: Mercedes Benz

Tabelle 1-12: Leistungsmerkmale der alternativen Nutzfahrzeugmodelle von Mercedes-Benz

	Mercedes Benz Sprinter Kastenwagen		Mercedes Benz Econic	Mercedes Benz Citaro FuelCELL-Hybrid	Mercedes Benz EvoBus Citaro
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	3.500		26.000	18.000	18.000
Nutzlast [kg]	1.070		14.800	4.800	~7.500
Kraftstoff	CNG	Benzin	LNG	Hybrid	CNG
Reichweite [km]	~450 km	> 100 km	~650 km	~250 km	
Tankinhalt	~40 kg	15 l	~160 kg		~150 kg

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

❑ General Motors - Opel (D)

Neben den konventionellen Antrieben ist der Opel Combo Kastenwagen auch mit Erdgas (CNG) erhältlich. Er verfügt zusätzlich über einen kleineren Benzintank. Durch diesen kombinierten Betrieb kann die Reichweite erhöht werden und das Erreichen der Tankstelle wird bei leerem Erdgastank sichergestellt.⁴⁶

Tabelle 1-13: Leistungsmerkmale des Opel Combo

Opel Combo 1.4 CNG	
Ladevolumen [m ³]	bis zu 4,6 m ³
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	1.945
Nutzlast [kg]	625
Kraftstoff	CNG Benzin
Reichweite [km]	270 300
Tankinhalt	16- 22 kg 22 l

Abbildung 1-35: Opel Combo



Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Quelle: Opel

❑ PSA – Peugeot⁴⁷ Citroën⁴⁸ (F)

Die französische Herstellergruppe PSA ist auf Kleinlieferwagen spezialisiert, die auch für den Service-Verkehr von HandwerkerInnen geeignet sind. Der Peugeot Partner Electric ist mit einer Lithium-Ionen-Batterie ausgestattet und kann über eine herkömmliche Haushaltssteckdose oder über eine Schuko-Elektroauto-Ladesteckdose aufgeladen werden, wofür bis zu 8,5 Stunden benötigt werden.

Der Citroën Berlingo Electric ist mit einer vollständig unter der Ladefläche eingebauten Lithium-Ionen-Batterie ausgestattet, wodurch eine vollkommen ebene Ladefläche gewährleistet wird. Weitere Teile des elektrischen Antriebsstrangs sind unter der Fronthaube angebracht. Die Aufladung erfolgt entweder mittels Standardladung und benötigt dafür 6-12 Stunden oder mittels Schnellladung, bei der die Batterie innerhalb von 30 Minuten auf 80 % aufgeladen wird.

Tabelle 1-14: Leistungsmerkmale der Elektro-Lieferfahrzeuge Peugeot Partner und Citroën Berlingo

Peugeot Partner		Citroen Berlingo Electrique	
Ladevolumen [m ³]	3 m ³	Ladevolumen (m ³)	4,1 m ³
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	2.025	zulässiges Gesamtgewicht [kg]	1.950
Nutzlast [kg]	510	Nutzlast [kg]	685
Kraftstoff	Elektrisch (Lithium-Ionen)	Kraftstoff	Elektrisch
Reichweite [km]	120 km	Reichweite (km)	120 km

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-36: Peugeot Partner und Citroën Berlingo



Quelle: Peugeot und Citroën

□ Renault (F)⁴⁹

Der französische Hersteller bietet eine breite Größenpalette an Lieferfahrzeugen von 2 bis 22 m³ Nutzraum an, von welchen im kleineren Segment auch rein elektrische Fahrzeuge erhältlich sind (s. Abbildung 1-37). Der Renault Kangoo Z.E. fährt zu 100 % elektrisch und wird mittels Plug-In aufgeladen. Zudem bietet Renault eine Pannenhilfe bei leerem Akku, bei der das Fahrzeug rund um die Uhr und sieben Tage die Woche zu einem gewünschten Ladepunkt im Umkreis bis zu 80 km abgeschleppt wird. In der schweren N₃-Klasse werden mit CNG betriebene Lkw vorerst in Frankreich, in Spanien, in der Schweiz, in Italien, in Belgien, in den Niederlanden und in Norwegen angeboten.

Der Renault Premium Distribution ist speziell für den Verkehr im urbanen Raum ausgelegt und kann dafür mit verschiedenen Aufbauten ausgestattet werden (Lebensmitteltransport, Müllsammelfahrzeug, Straßenreinigungsfahrzeug, usw.). Der Renault Premium Distribution kann bis zu 8 Erdgasflaschen mitführen, was einer Menge von rund 160 m³ Erdgas entspricht.⁵⁰ Zudem hat Renault eine Marktstellung im generell straßenverkehrsaffinen mediterranen Europa und in Ländern, in denen die nationalen Seehäfen-Hinterlandverkehre auf der Straße eine wichtige Rolle spielen.

Tabelle 1-15: Leistungsmerkmale der alternativen Nutzfahrzeugmodelle von Renault

	Renault Premium Distribution GNV	Renault Kangoo Z.E.
Ladevolumen [m ³]		4,6 m ³
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	26.000	2.126
Nutzlast [kg]	17.820	625
Kraftstoff	CNG	Elektrisch (Lithium-Ionen)
Reichweite [km]	250 km	125 - 170 km
Tankinhalt	128 kg	

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-37: Renault-Angebot an Lieferwagen von 2 bis 22 m³ Nutzraum



Quelle: Renault Österreich; Bild: arp

Abbildung 1-38: Renault Kangoo Z.E. und Renault Premium Distribution



Quelle: Renault

❑ Scania (S)₅₁

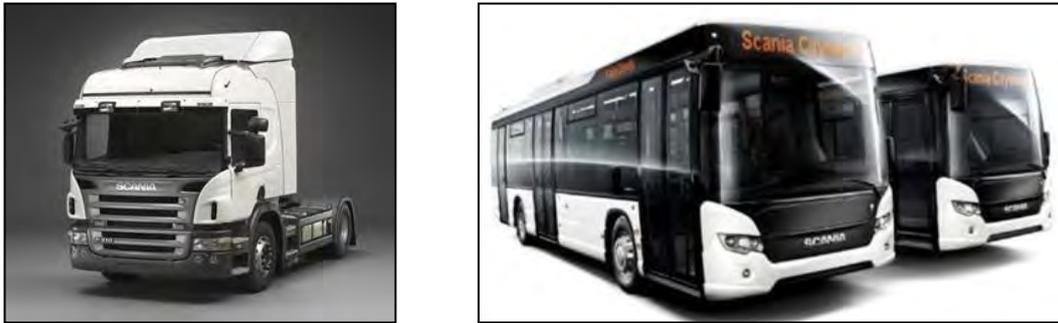
Der schwedische Hersteller schwerer Nutzfahrzeuge bietet seine neuen Busse mit Diesel-, Biodiesel-, Gas-, Biogas- und Bioethanol-Motor an, bei Sattelzugmaschinen sind es CNG-Varianten.

Tabelle 1-16: Leistungsmerkmale der alternativ betriebenen Schwerfahrzeuge von Scania

	Scania P 270/310 CNG	Scania Citywide
zulässiges Gesamtgewicht [kg]		18.000
Nutzlast [kg]		6.880
Kraftstoff	Erdgas	Erdgas
Reichweite (km)	k.A.	600 km
Tankinhalt	112 kg CNG	205 kg CNG

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-39: Scania P 270/310 CNG und Scania Citywide



Quelle: Scania

□ Siemens (D) / Rampini (I)

Seit 2013 sind in Wien zwei Linien (2A und 3A) auf Elektrobusse umgestellt worden. Bei diesen 12 Bussen handelt es sich um den Fahrzeugtyp Alé EL des italienischen Herstellers für Spezialfahrzeuge Rampini. Die Antriebstechnik dieser Busse stammt von Siemens. Bei dem 7,7 m langen Bus, der Platz für 40 Fahrgäste bietet, handelt es sich um den ersten serienmäßig produzierten Elektrobus Europas. Der gesamte Energiebedarf wird über das mitgeführte Batteriesystem (Lithium-Ferrit) gespeist, wobei der Elektrobus über insgesamt neun Batterien verfügt. Drei davon befinden sich auf dem Dach, fünf im Heck und eine an der Unterseite anstelle des Dieseltanks. Stündlich erfolgen Schnellladungen (jeweils etwa 10 Minuten) an der Endstelle Schwarzenbergplatz und in der Zelinkagasse am Schottenring durch ein kurzes Stück zweipoliger Oberleitung (diese ist mit der Straßenbahnfahrleitung verbunden). Der Ladevorgang erfolgt dabei mit gehobenem Pantographen, welcher sich am Dach des Busses befindet. Über Nacht werden die Busse am Depotgelände aufgeladen.⁵²

Tabelle 1-17: Leistungsdaten des E-Citybus der Wiener Linien

	Elektrobus der Wiener Linien
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	12.000
Nutzlast [kg]	3.750
Kraftstoff	Elektrisch (Lithium-Ferrit)
Reichweite [km]	135 km

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-40: Citybus der Wr. Linien



Quelle: Wiener Linien

□ Smith Electric (USA)⁵³

Der amerikanische Hersteller bietet eine Reihe von E-Nutzfahrzeugen in der N1- und N2-Klasse bis zu 7,5 t Nutzlast an. Es handelt sich um typische Flottenfahrzeuge für „Multidrop-Einsätze“ auf berechenbaren regelmäßigen Routen mit fixem Rücklauf zum Stützpunkt, wo die Standzeit zum ca. 8 Stunden dauernden Laden genutzt wird. Die Reichweite variiert je nach Batteriekapazität (beim N1 Edison zwischen 36 und 51

kW, beim N2 Newton zwischen 80 und 120 kW), Fahrzyklus und Einsatzgebiet zwischen 50 km und bis zu 240 km nach Angabe des Herstellers.

Anhand dieser sehr variantenreichen Fahrzeugfamilien zeigt sich deutlich, wie sehr die logistische Organisation der Gütersenke, die Standortwahl des Auslieferstützpunktes möglichst im Schwerpunkt der Gütersenke und die regelmäßige Netzkonfiguration der Fahrwege (amerikanisches Rasternetz Downtown und Schleifenringssysteme in vielen Suburbs) für den optimalen Einsatz ausschlaggebend sind. Eine Planbarkeit, die in Mitteleuropa aufgrund der gewachsenen Verkehrsnetze nur in bestimmten Siedlungsräumen (wie in den historischen Stadtquartieren der Gründerzeit) teilweise vorzufinden ist.

Abbildung 1-41: Die Leitmodelle der Smith-Electric-Fahrzeugfamilien und ihre Nutzlastkapazitäten



Bilder: arp (Messe Hamburg 06/2012)

Tabelle 1-18: Leistungsmerkmale der Smith-Electric-Fahrzeugfamilien Edison und Newton

Specifications	Newton™	Edison™
Gross Vehicle Weight	14,000 - 26,400 lbs 6,400 - 12,000 kg	7,700 - 10,100 lbs 3500-4,600 kg
Payload Capacity	6,100 - 16,200 lbs 2,800 - 7,400 kg	1,600 - 5,100 lbs 725 - 2,300 kg
Wheelbase Options	154, 177, 201, 220 in 3900, 4500, 5100, 5600 mm	Chassis Cab: Medium 3504, Long 3954, Long EF 3954 mm Panel Van: Medium 3300, Long 3750, Long EL 3750 mm Mini Bus: Long 3750, Long EL 3750 mm
Range	40 - 100 mi 65 - 160 km	55 - 100 mi 90 - 160 km
Availability	Globally	Globally Non-US
Chassis Configurations	Chassis Cab Step Van School Bus	Chassis Cab Panel Van Mini Bus

**Payload calculated for cab and chassis*

Quelle: Smith Electric

❑ Solarbus⁵⁴

Im Rahmen eines Forschungsprojektes (gefördert vom BMVIT, Land NÖ und Land Bgld) wurde ein Elektrobus realisiert. Das Austrian Institute of Technology, der Fahrzeughersteller Kutschenits Busconstruction, die Technische Universität Graz (Institut für Fahrzeugsicherheit), Solarmobil Austria und der Energieerzeuger Ökostrom bildeten dabei das Konsortium. Im Zuge des Projektes entstand unter anderem der Solarbus, welcher mit seinen 8,4 m Länge 35 Fahrgäste aufnehmen kann und bereits seit 2011 in Perchtoldsdorf (NÖ) zum Einsatz kommt. In der Teststrecke bedient der Solarbus nacheinander drei Ortslinien, wodurch sich eine Gesamttagesleistung von 250 km ergibt. Zentral unter dem Fahrzeugboden befindet sich die Lithium-Ionen-Batterie, welche eine Reichweite von 80-100 km hat. Aufgrund des Wechselsystems der Batterie (Batteriewechsel nimmt nur wenige Minuten in Anspruch) ist jedoch die Reichweite pro Tag nicht begrenzt. Zusätzlich erzeugt das Solardach eine Spitzenleistung von 1,2 kWp.

Tabelle 1-19: Leistungsdaten des Prototypen Solarbus

	Solarbus
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	7.500
Nutzlast [kg]	2.800
Kraftstoff	Elektrisch (Lithium-Ionen)
Reichweite [km]	80-100 km

Abbildung 1-42: Solarbus



Quelle: Projekt Solarbus

❑ Solaris⁵⁵

Der Solaris Urbino CNG, dessen Einsatzbereich der urbane Raum ist, kann mit CNG oder mit Biogas betrieben werden und ist als 12-, 15- oder 18-m-Fahrzeug erhältlich. Zudem ist er wahlweise mit Standard- oder Schnell-Betankung verfügbar. Beim Urbino 12 CNG können 6 und beim Urbino 18 CNG sogar bis zu 9 Gasflaschen mit je 214 l mitgeführt werden. Zusätzlich zu den herkömmlichen Kraftstoffen sowie den Erd- und Biogas-Kraftstoffen werden auch Hybrid- und Elektro-Antriebe getestet.

Im Februar 2014 wurde in München (auf der Linie 153 zwischen Odeonsplatz, Universität und Hochschule München) der Solaris Urbino electric von den Stadtwerken München (SWM) und der Münchner Verkehrsgesellschaft (MVG) getestet. Dabei handelt es sich um einen 8,9 m langen Bus, ausgestattet mit Lithium-Ionen-Batterien, der eine Reichweite von etwa 100 km erreichen kann. Aufgeladen wird der Elektrobus im Bus-Betriebshof West und benötigt dafür etwa sechs Stunden.⁵⁶

Tabelle 1-20: Leistungsmerkmale des Solaris.Urbino Bus

	Solaris Urbino 18 Hybrid
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	28.000
Nutzlast [kg]	10.200
Kraftstoff	Hybrid
Reichweite [km]	150 km

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-43: Solaris Urbino



Quelle: Solaris

□ Volkswagen (VW) (D)⁵⁷

Der deutsche Hersteller VW bietet die EcoFuel-Familie unter dem Modellnamen Caddy an, wobei je nach Einsatzradius für die Zustellverkehre leichter Sendungen der Erdgas-Tank oder der Benzintank die größere Kapazität aufweist. Die Post AG betreibt übrigens eine elektrische Caddy-Flotte in Wien.

Tabelle 1-21: Leistungsmerkmale der VW-Caddy-Familie Eco Fuel

	VW Caddy EcoFuel		VW Caddy Maxi EcoFuel		VW Transporter EcoFuel	
Ladevolumen [m ³]	3,7 m ³		4,2 m ³			
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	2.234		685			
Nutzlast [kg]	2.350		666			
Kraftstoff	CNG	Benzin	CNG	Benzin	CNG	Benzin
Reichweite [km]	450 km	130 km	630 km	130 km	400 km	760 km
Tankinhalt	26 kg	13 l	37 kg	13 l	bis 28 kg	80 l

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-44: Die VW-EcoFuel-Nutzfahrzeuge: Caddy EcoFuel, Caddy Maxi EcoFuel, VW Transporte EcoFuel



Quelle: VW

□ Volvo (S)^{58 59}

Der Motor des Volvo FM Methan-Diesel arbeitet nach dem Dieselpinzip und nutzt dabei das verflüssigte Gas, wodurch schwerere Transporte und längere Strecken möglich werden. Volvo hat das N₃-Fahrzeug FM Methan-Diesel grundsätzlich für den skandinavischen Verteilerverkehr konzipiert. Das entspricht den Seehäfen-Hinterland-Verkehren dort und anderswo im Nord- und Ostseeraum. Der Tankinhalt für LNG beträgt 280 l und wird durch einen Dieseltank mit wahlweise 150, 240 oder 330 l ergänzt. Das Fahrzeug kann daher sehr flexibel eingesetzt werden, da es auch ausschließlich mit Dieselmotor fahren kann, wenn die Gasversorgung vorübergehend nicht gewährleistet ist, was in dünner besiedelten Landstrichen Skandinaviens vorkommen kann.

Volvo ist außerdem im Segment ÖPNV Anbieter des Volvo Stadtbus 7900, der in drei verschiedenen Antriebsarten verfügbar ist. Neben dem herkömmlichen Dieselmotor (welcher auch mit 100 % Biodiesel betrieben werden kann), werden sowohl ein Motor für Erdgas (CNG) oder Biogas als auch ein Parallel-Hybridantrieb angeboten. Der Volvo 7900 Hybrid ist das zweite Hybridbus-Modell, das von Volvo serienmäßig produziert wird.

Tabelle 1-22: Leistungsmerkmale der Volvo Erdgas-Schwerfahrzeuge

	Volvo FM Methan-Diesel	Volvo 7900 Hybrid
zulässiges Gesamtgewicht [kg]	40.000	19.000
Nutzlast [kg]	25.000	8.200
Kraftstoff	LNG	Hybrid
Reichweite [km]	600 - 1.000 km	
Tankinhalt	126 kg LNG (+ 330 l Diesel)	205 kg CNG

Quelle: eigene Bearbeitung (arp) nach Herstellerinformation

Abbildung 1-45: Volvo Methan-Diesel und Stadtbus Volvo 7900



Quelle: Volvo

Die bildliche Gegenüberstellung oben lässt die Überlegung aufkeimen, ob nicht für die urbane Warenversorgung raum-, verkehrsflächen- und zeitsparende Fahrzeugkonzepte für die rasche Be- und Entladung auf Bordsteinhöhe sowie möglicherweise die Einsparung von in der Transportkette zwischengeschalteten Cross-Docking-Lägern am Stadtrand zu entwickeln wären.

- Als Anregungen können die Niederflurbusse ähnlicher Gewichtskategorien dienen. Eine kombinierte Stirn- und Seitenbeladung, wie sie durch Schiebepanzen bei einzelnen Lkw-Aufbauten anzutreffen ist oder eine Schiebewand, wie sie von den Eisenbahnwagen (H-Wagen) gang und gäbe sind, könnten bei der Beladung am Auslieferungslager wie herkömmlich andocken, um die Waren zu verstauen. An den Anlieferstationen im Verteilverkehr könnte entweder an der Bordsteinkante bei der Belieferung von Geschäften über die öffentliche Verkehrsfläche oder auch über Durchfahrstreifen ein- oder beidseitig auf privaten Anlieferstationen entladen werden.

1.1.2.5 Resümee zum Marktangebot und zur verkehrslogistischen Einsatzfähigkeit

- **Technologie-Entwicklungspfad und Marktstrategie**

Die Dichte der Fahrzeugvarianten erlaubt den Schluss, dass die Nutzfahrzeughersteller in ihrer Modellpolitik und Entwicklungsstrategie bei allen Unwägbarkeiten für künftige Veränderungen der Marktbedingungen aufgestellt sein wollen. Aber der Straßengüterverkehr ist, aufgrund der niedrigen

Margen im hochkompetitiven Transportmarkt, eine konservative Kundschaft, die bewährte Fahrzeugtechnik bevorzugt, um die Einsatzbereitschaft hoch und die Wartungsaufwendungen nieder zu halten.

Die Entwicklung und Implementierung neuer technologischer Komponenten wird nicht unwesentlich von den verkehrsregulierenden Körperschaften von der EU herunter bis zu den großen Kommunen angeschoben, wie die der EU-Luftreinhalte-Richtlinie nachfolgenden nationalen Regelungen von Umweltzonen in Ballungsräumen (außer bislang in Österreich, dafür ist aber das Immissionschutzgesetz Luft wirksam) gezeigt haben. Sie ergänzen sich synergetisch mit den EURO-Abgasnormen für die Nutzfahrzeuge.

Es lässt sich vorläufig eine gewisse Lücke in Hinblick auf die Fahrzeugangebote mit alternativen Antrieben zwischen den kleineren Güterfahrzeugen der N₁- und N₂-Klasse bis 12 t Gesamtgewicht, die zahlreiche Variationen der Hybridisierung und der Elektrifizierung des Antriebes aufweisen, und den schweren Nutzfahrzeugen feststellen, bei denen das obere Gewichtssegment der Fahrzeugklasse vor allem für Gasantriebe in Frage kommt. Diese Lücke tut sich bei Fahrzeugmodellen über 12 t und ca. 30 t Gesamtgewicht auf, wo die Wirtschaftlichkeit für eine Systemumstellung am Fahrzeug offenbar noch nicht gegeben ist.

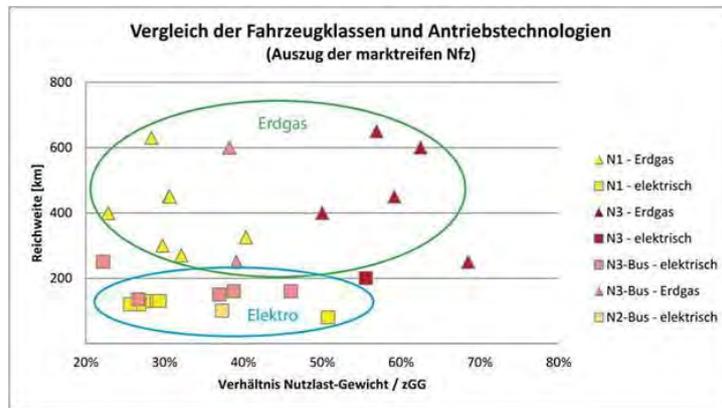
Der reine Elektroantrieb fällt bei der derzeit verfügbaren Batterietechnologie nicht nur wegen des hohen Gewichts des Energiespeichers bei größeren Nutzfahrzeugen aus und damit macht auch die Hybridisierung wenig Sinn, wenn man von der Start/Stop-Funktion absieht, die noch Potenzial verspricht, aber noch nicht marktreif für diese Klasse ausentwickelt ist.

➤ **Aspekte der verkehrslogistischen Einsatzfähigkeit**

Die verkehrslogistische Einsatzfähigkeit soll anhand verständlicher Schlüsselkriterien aus der Sicht des/der FuhrparkbetreiberIn beschrieben werden. Die gegenwärtig am Markt bzw. im Einsatz befindlichen Nutzfahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen können aus diesem Blickwinkel anhand zweier Schlüsselkriterien grundsätzlich behandelt werden. Es sind die Nutzlastkapazitäten (Zuladungsgewicht und Ladungsvolumen) im Verhältnis zum zulässigen Fahrzeuggesamtgewicht und die aufgrund der Energiespeicherkapazität erzielbare Reichweite bzw. der tägliche Aktionsradius eines Nutzfahrzeuges.

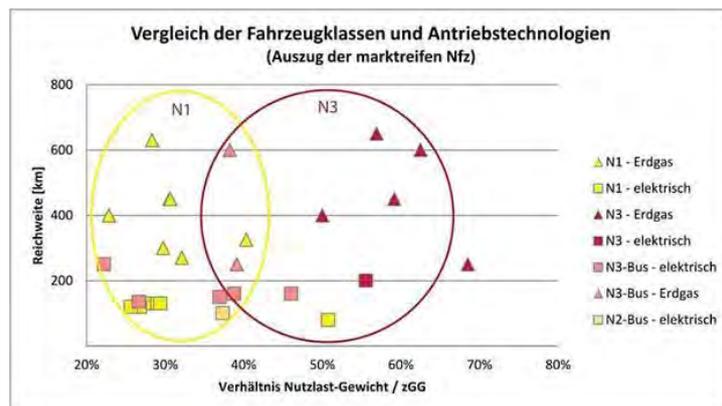
Die nachfolgenden Grafiken differenzieren diese Leistungsangebote nach den verfügbaren Antriebsarten (s. Darstellung 1-13 bis Darstellung 1-15). Wie sich daraus ablesen lässt, weist das Nutzlast-/Gesamtgewichtsverhältnis über alle Nutzfahrzeugtypen eine große Spannweite auf, die von ca. 23 % bei elektrischem Antrieb (N₃-ähnlicher Bus) bis zu ca. 68 % bei N₃-CNG-Antrieb reicht. Tendenziell gilt, je "kleiner und leichter" das Nutzfahrzeug ist desto schlechter ist das Nutzlast-/Gesamtgewichtsverhältnis, wie der Vergleich von N₁-Elektro (28 %) gegenüber N₁-CNG (38 %) oder N₂-Elektro (58 %) gegenüber N₂-CNG (61 %) aufzeigt.

Darstellung 1-13: Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge nach Reichweite



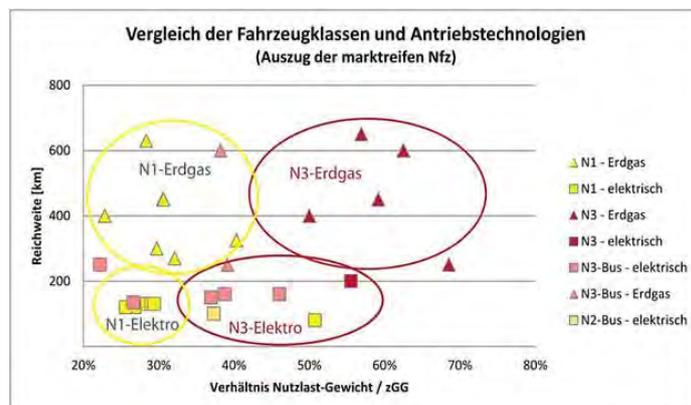
Quelle: eigene Bearbeitung arp (Toifl) nach Herstellerangaben

Darstellung 1-14: Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge nach N-Klassen



Quelle: eigene Bearbeitung arp (Toifl) nach Herstellerangaben

Darstellung 1-15: Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge nach Energiequelle



Quelle: eigene Bearbeitung arp (Toifl) nach Herstellerangaben

1.1.2.6 Resümee zu den Umstellungsbedingungen (Status quo)

- CNG-betriebene Fahrzeuge weisen annähernd vergleichbare Leistungsmerkmale wie herkömmliche Dieselfahrzeuge auf, die je nach Ausstattung mit Drucktanks 500 km oder sogar mehr Reichweite erzielen. Dabei sind schwerere Fahrzeuge im Vorteil, weil die Tanks besser und mit höherem Tankinhalt eingebaut werden können.
- In diesem Fall müssen die Anschaffungskosten (Mehrkosten) aber leistbar bleiben und die Kraftstoffkosten merklich niedriger als bei Diesel sein, um eine Umstellung zu vollziehen.
- Die rein elektrisch fahrenden Plug-In-Fahrzeuge haben im günstigen Fall ihren Plafonds bei 200 km Reichweite. Bei einer Umstellung auf Elektrofahrzeuge scheint auf absehbare Zeit eine Nutzlast von ca. 8 t Zuladung oder ca. 12-15 Palettenplätzen im Laderaum die Grenze des Leistungsangebotes zu sein. Erst ein Sprung in der Batterie-Speichertechnologie könnte diese Plafonds hinaufsetzen. Die Ausstattung mit einem Range Extender zur Nachladung der Batterie während der Tour ist vor allem ein „Sicherheitsnetz“, z.B. wenn unvorhergesehene Umwege gefahren werden müssen.
- Batteriegestützte Elektrofahrzeuge im Güterverkehrseinsatz bedürfen einer fixierten Routenplanung, sind für an Nutzlastgewicht orientierte Logistiktouren aufgrund des hohen Gewichts der Batterie wenig geeignet und benötigen einen tendenziell größeren Fuhrpark wegen der aufladungsbedingten langen Standzeiten, die die Verfügbarkeit einschränken. Für eine breite Umstellung müssten künftig die Anschaffungskosten „halbiert“ und die Batteriekapazität deutlich angehoben werden.

Quellenhinweise zu Kapitel 1.1.2:

AUSTRIAN AGENCY FOR ALTERNATIVE PROPULSION SYSTEMS (A3PS) (2011): Eco-Mobility aus Österreich 2015plus. Eine Technologie-Road Map der A3PS zur Entwicklung und Markteinführung alternativer Antriebe und Treibstoffe. Wien

AUSTRIATECH (2014): Electric Fleets in Urban Logistics. Improving urban Freight Efficiency in small and medium-sized historic towns. Published as part of the Enclose-Project cofounded by the Intelligent Energy Europe Programme of the EU. Vienna

AVL List (2012): Electrification Overview, Powerpoint Präsentation provided by P. EBNER, St. JONES and A. HUSS.

BERTRAM, M.; BONGARD, St. (2014): Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr. Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Springer-Vieweg. Wiesbaden

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2012): Klimafreundlich elektrisch unterwegs. Leitfaden für Fuhrparkbetreiber. 4. Auflage. Wien

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2014): Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Forschungsprojekt ENUBA im Rahmen des Leuchtturms Elektromobilität der Bundesregierung erstellt von Siemens, Scania und TU Dresden.

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR; INNOVATION UND TECHNOLOGIE (BMVIT) (2010): Strategien und Instrumente sowie prioritäre Anwender- und Einsatzbereiche für den Nationalen Einführungsplan Elektromobilität. Wien

DÖRR, H. (2013): Perspektiven der Infrastruktur für den Gütertausch zwischen Sachsen-Anhalt und Österreich. In: Der Markt in Mitteldeutschland 4/2013. S. 12-15. Magdeburg

-
- EUROPEAN ROAD TRANSPORT RESEARCH ADVISORY COUNCIL (ERTRAC) (2009):** Road Transport Scenario 2030+ "Road to Implementation". o.O.
- EUROPEAN ROAD TRANSPORT RESEARCH ADVISORY COUNCIL (ERTRAC) (2011):** ERTRAC Research and Innovation Roadmaps. Implementation of the ERTRAC Strategic Research Agenda 2010. o.O.
- EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM ON SMART SYSTEMS INTEGRATION (EPoSS) (2012):** European Roadmap Electrification of Road Transport. 2nd Edition. o.O.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG (ISI) (2010):** Induktives Laden von Elektromobilen. Eine techno-ökonomische Bewertung. Karlsruhe
- FUHRPARK-PKW-SPECIAL (03/2013):** E-Mobilität. Österreichischer Wirtschaftsverlag
- HILLGÄRTNER, M.; KÜMMELL, S.; RITZ, T. (2012):** Induktives Laden als komfortable Alternative im eCar-Sharing. In: AMUS + ACMOTE 2012. Future Mobility. Tagungsband Reihe Stadt.Region.Land 1/2012. RWTH Aachen.
- IFEU – INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG (2009):** Homepage Elektromobilität, <http://www.ifeu.org>, 10.03.2009
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2012):** IEA-Advanced Motor Fuels. Annual Report 2012. o.O.
- KÖHLER, U. (2007):** Li-Ion battery systems for the next generation of hybrid electric vehicles, in 19th International AVL Conference "Engine & Environment", September 6th - 7th, Graz, Austria, 2007
- KURCZWEIL, T.; SCHNIEDER, L.; SCHEIER, B.; SCHNIEDER, E. (2014):** Optimierung induktiv geladener Busse unter Berücksichtigung betrieblicher und verkehrlicher Rahmenbedingungen. Beitrag HEUREKA-Tagung 2014 (Stuttgert) veranstaltet von der Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Köln
- LEOPOLD, J. (2008):** Vortragsunterlagen: Elektrisch unter 40 Gramm?, Veranstaltungsreihe "Mobil im Dialog", Berlin, 22. April. 2008 (aus SCHWINGSHACKL, 2009) .
- LINDE GROUP (o.J.):** Merchant LNG - Erdgas statt Diesel. München
- MENNEKES (2011):** Medieninformation - IEC hat weltweiten Ladestecker-Standard mit drei Systemen definiert. Kirchhundem.
- MENNEKES (o.J.):** Steckvorrichtungen nach IEC - Status Quo, Anforderungen und neue Entwicklungen!. Kirchhundem.
- NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT (2013):** Technischer Leitfaden Ladeinfrastruktur. Berlin
- ÖSTERREICHISCHER VERBAND FÜR ELEKTROTECHNIK (OVE) (2013):** Kompass Elektromobilität in Österreich. Wien
- ÖSTERREICHISCHER VEREIN FÜR KRAFTFAHRZEUGTECHNIK (ÖVK) (2012):** Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis. Kosten, Reichweite, Umwelt, Komfort. Studie im Auftrag von ÖVK und ÖAMTC durchgeführt vom Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien. Wien
- SCHWINGSHACKL, M. (2009):** Simulation von elektrischen Fahrzeugkonzepten für Pkw. Verbesserungspotential der Elektromobilität bei Verbrauch und Emissionen im Lebenszyklus. Diplomarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz.
- SHELL DEUTSCHLAND OIL GMBH (2010):** Shell Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Hamburg/Berlin
- SHELL (2013):** Erdgas - Eine Brückentechnologie für die Mobilität der Zukunft?, Den Haag.
- WALLENTOWITZ, H. et al. (1999):** Strukturvarianten von Hybridantrieben, In VDI-Bericht 1459: Hybridantriebe, 1999.
- WALLENTOWITZ, H.; FREIALDENHOVEN, A. (2011):** Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien, Märkte und Implikationen. 2. Auflage. Vieweg-Teubner. Wiesbaden

1.1.3 Eisenbahnfahrzeuge für den Schienengüterverkehr

Im Schienengüterverkehr stellt die Nahbedienung von Verladestellen und Anschlussbahnen in der Fläche eine mehrfach heikle Angelegenheit dar, weil auf diesen Ersten und Letzten Meilen oftmals unverhältnismäßig hohe Kosten für Verloader und Operateur, unangenehme Zeitverluste gegenüber dem konkurrierenden Straßengüterverkehr und bei Dieselbetrieb Lärm- und Rußpartikelbelastungen im lokalen Umfeld entstehen können (HÖRL et al., 2012). Eine Auflassung von dezentralisierten Ladestellen an der Schiene wiederum führt unweigerlich zu mehr Fahrleistungen im Straßenschwerverkehr, wobei die Gefahr gegeben ist, dass nicht nur die Erste/Letzte Meile, sondern der Transportlauf in voller Länge auf die Straße verlagert wird. Unter solchen Umständen gilt es, mit dem Blick auf das Gesamtverkehrssystem das Fahrzeugkonzept für den Einsatzzweck mit der Ausstattung des bedienenden Netzes und dem Betriebskonzept der Nahbedienung umweltverträglich in Einklang zu bringen.

1.1.3.1 Triebfahrzeuge mit alternativen Antrieben

□ Elektrolokomotiven mit Hilfsdiesel für die Letzte Meile

Dazu wurde für die Schienennahbedienung vom Schweizer Schienenfahrzeughersteller Stadler eine Zweikraft-Lokomotive im Auftrag von SBB Cargo entwickelt, die unter Fahrdraht in drei Wechselstromsystemen (11, 15, 25 kV) einsetzbar ist und für fahrdrahtlose Gleisabschnitte einen Hilfsdieselantrieb besitzt. Bemerkenswert an diesem Fahrzeugkonzept ist, dass das Triebfahrzeug in beiden Antriebsformen eine Anzugfahrkraft von ca. 150 kN aufbringt, für die Wagenstellung mit 290 kW genügend und für den Streckenbetrieb mit 1500 kW eine beachtliche Motorleistung ans Rad liefert, sowie mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h hauptstreckentauglich ist (CORTESI et al., 2012).

Abbildung 1-46: Elektro-Diesel-Hybrid-Lokomotive für die Nahbedienung SBB Eem 923



Quelle: arp 2012, Innotrans Berlin

Für den Punkt-zu-Punkt-Verkehr von Ganzzügen oder den Feeder-Verkehr zu nationalen Vershubknoten hat der Schienenfahrzeughersteller Bombardier seine Lok-Plattform der Traxx-Lokomotiven um eine Hybrid-Bauart mit Elektroantrieb für den Langlauf ergänzt und um eine „Letzte-Meile-Funktion“ mittels eines 230 kW starken Dieselmotors erweitert (ETR 6/2011, 284). Damit können, wenn die Gleisgeometrie und die Anhängelast es zulassen, die letzten Meter von Anschlussbahnen bedient werden, ohne eine Rangier-Kaskade fahren zu müssen. Das kann eine Lösung für Großverlader mit homogenem Transportsubstrat (Papier, Mineralöl, Gefahrgüter, Getreide u.ä.) oder für Leerwagenzustellungen darstellen.

Der Umweltnutzen bei der Kombination zweier herkömmlicher Antriebsformen resultiert aus dem Einsatzkonzept für den Nebenlauf der Güterwagen, wenn die E-Traktion bis zum jeweiligen Fahrdratende ausgenutzt werden kann und nur für die letzten Meter des individuellen Anschlussgleises Dieselkraft eingesetzt werden muss. Zu diesem Zweck könnten die Bediengleise eines Wirtschaftsparks oder einer Hafenbahn bis zu den privaten Anschlussgleisen z.B. mit einer Einfachfahrleitungen überspannt werden.

□ Diesel-Hybrid-Lokomotiven für Bedienfahrten

Da Vershubvorgänge mit Leerläufen bzw. Standzeiten des Antriebes verbunden sind und diese Fahrleistungen besonders teuer kommen, eröffnen fahrzeugtechnische und betriebsorganisatorische Innovationen spürbare Einsparungspotenziale. Als Antriebsprinzip kommt entweder die dieselhydraulische Kraftübertragung (Dieselmotor und Strömungsgetriebe) oder die dieselektrische Antriebsform zur Anwendung. Dabei treibt der Dieselmotor den Generator an und dieser liefert den Traktionsstrom für den/die Elektromotor/en. Dieser elektrische Antrieb ermöglicht den Einbau einer Batterie für die Rekuperation und die Nutzung für kurzwegige emissionsfreie Fahrten (z.B. in Verladehallen oder bei Siedlungsdurchfahrten) oder für das „Boosten“ (Zuschalten) bei Anfahrvorgängen. Zudem ist eine kraftstoffsparende Start/Stopp-Funktion realisierbar. Allerdings wird durch die Vielzahl der Aggregate das Fahrzeug verlängert (und kommt in der Anschaffung um einiges teurer) als ein herkömmliches Triebfahrzeug, zumal auch ein mittiges Führerhaus mit beidseitigen Sichtfeldern angeordnet sein soll.

Abbildung 1-47: Vierachsige dieselektrische Lokomotiven DE 12/18 für die Güterbedienung von Vossloh



Quelle: Eurailpress / Vossloh

Die jüngste Generation der Diesellokomotiven für den Frachtverkehr in der Fläche, wie sie z.B. der darauf spezialisierte deutsche Hersteller Vossloh anbietet, zeichnet sich durch Modularisierung aus, die es erlauben wird, nach KundInnenwunsch bzw. Einsatzanforderungen maßgeschneiderte Triebfahrzeuge auszuliefern, die den Anforderungen des Streckenbetriebes mit Parametern, wie v_{\max} 120 km/h und Motorleistungen bis 1.800 kW, ebenso gerecht werden, wie den Anforderungen in der Anschlussbahn, wo eine gute Anfahrzugkraft (zwischen 259 bis 325 kN) und eine Befahrbarkeit von minimalen Gleisbögen bis 55 m herunter gefragt ist. Eine entsprechende Ausstattung mit Hybridisierung und Speichertechnik ist neben Triebfahrzeugführer-Assistenzsystemen und der heute obligaten Funkfernsteuerung sowie der Mehrfachtraktionsfähigkeit möglich. Die Einhaltung der UIC-Abgasnorm III B ist natürlich vorgesehen.⁶⁰

□ Sonstige alternative Antriebskonzepte für sensible Laufwege

Regionalnetze und etliche transversale Bahnstrecken in ländlichen Regionen sind in Mitteleuropa noch nicht elektrifiziert, wie das Rieder Kreuz im Innviertel oder das anschließende Netz der Südostbayernbahn, obwohl dort teilweise bedeutende Güterverkehre abgewickelt werden (DÖRR, FRANK, 2007). Das Güterverkehrsaufkommen wird von großen Industrieanlagen der Chemie- und der metallverarbeitenden Industrie, wie in Burghausen und in Braunau am Inn, generiert, deren Zugläufe durch dichtere Siedlungsgebiete führen. Zweifellos wäre eine emissionsarme oder gar -freie Traktion wünschenswert. Da solche Strecken aber keine Personenfernverkehre aufweisen, werden sie wohl ohne Fahrdracht bleiben.

Triebfahrzeuge mit reinem Akkumulatoren-Antrieb, wie aus früheren Jahrzehnten in Erinnerung (Triebwagen 515 der DB für den Personenverkehr), sind wegen der relativ geringen Leistung und dem schwierigen Handling im Betriebshof aus der Mode gekommen. Die Situation mit Überschussstrom aus Windkraft wäre vielleicht ein Anlass, über solche regional autarken Speisemöglichkeiten für den Schienenverkehr für Strecken mit Regional- und Feederverkehren nachzudenken. Dabei wäre auch eine Rekuperation ohne Fahrleitung möglich.

Für die Befahrung von siedlungsexponierten Rangieranlagen und Siedlungsdurchfahrten kommen dieselektrische Triebfahrzeuge mit Energiespeicher für kurze Laufwege durchaus in Frage. Dazu können Batterien (Akkumulatoren), Doppelschichtkondensatoren, Schwungmassenspeicher oder Kombinationen aus diesen Elementen der Energiespeicherung angewendet werden. Auch gibt es die Idee, solche in einem eigenen Energietender mitzuführen, der zur Wiederaufladung abgestellt werden kann, ohne das Triebfahrzeug unproduktiv stehen zu lassen. Solche alternativen Antriebstechnologien an einer eigens dafür umgerüsteten Lok zu erproben, hat sich die Arbeitsgruppe „Oberleitungsfreie E-Traktion mit mobilem Energiespeicher“ zur Aufgabe gemacht. Darüber hinaus will man einen Standard für die Schnittstelle zwischen Speicher und Elektronik entwickeln sowie einen Zulassungsprozess für solche Speichertechnologien erarbeiten. Vertreten sind die Deutsche Bahn, der Fahrzeughersteller Bombardier, der Energieanlagenbauer General Electric, das Softwarehaus ESG und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR (ECO RAIL INNOVATION, 2010).

Moderne elektrische Triebfahrzeuge sind aufgrund der Leistungselektronik überwiegend mit Drehstrom-Asynchronmotoren ausgestattet (STEIMEL, 2006). Die im mitteleuropäischen Wechselstromsystem (mit 15 oder 25 kV) der Fahrleitungen eingesetzten Fahrzeuge brauchen daher einen Transformator, der Raum und Gewicht in Anspruch nimmt, sodass der Einbau weiterer Elemente für einen hybriden Antrieb wohlüberlegt sein will. Durch die Rückspeisung der Bremsenergie in die Fahrleitung erübrigen sich aufwändige Batterien. Daher sind die Einsatzchancen zusätzlicher Antriebe oder der Brennstoffzellen-Technologie, wie es solche Versuche in Amerika gibt, wo das transkontinentale Netz nie elektrifiziert worden ist, in Europa kaum ein Thema. Der Elektrifizierung stark befahrener Strecken ohne Fahrleitungen ist deswegen wohl eher der Vorzug zu geben als aufwändigen Fahrzeugentwicklungen. Für die Überwindung von „Diesellücken“ im Netz kann auch das E-Triebfahrzeug an seinem Zug bleiben und diese durch einen Vorspann einer Diesellokomotive überbrücken.

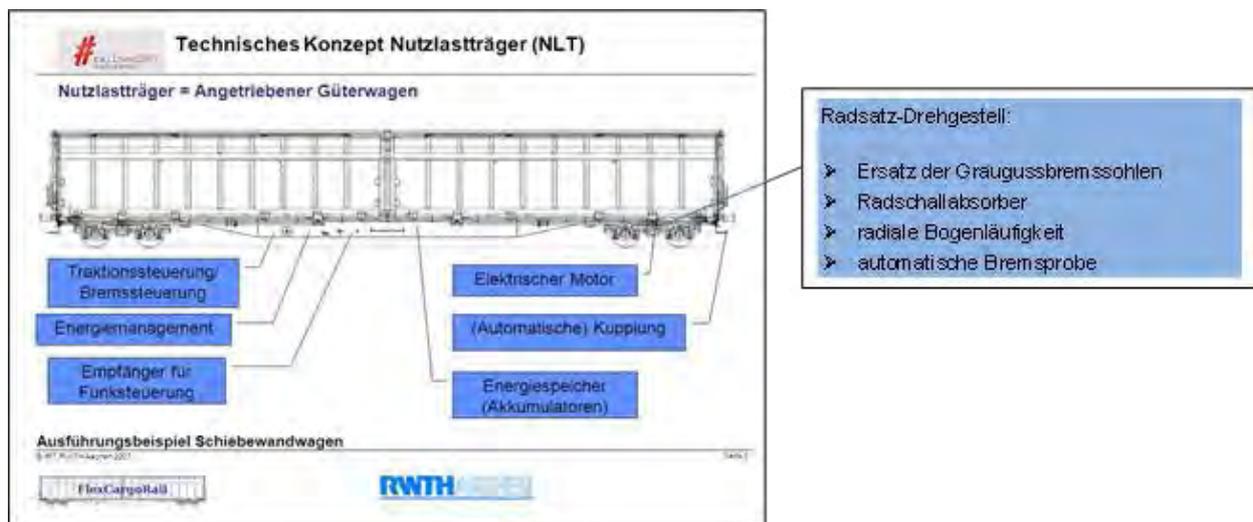
1.1.3.2 Intelligente Güterwagenkonzepte

□ Innovativer Güterwagen mit Fokus auf Fahrwerk

Eine Schlüsselaufgabe für einen rationellen Wagenladungsverkehr haben die europäischen Bahnen fokussiert auf den prestigeträchtigen Personenhochgeschwindigkeitsverkehr bis heute unerledigt gelassen, nämlich die automatische Mittelpufferkupplung, wie immer sie auch ausgeführt werden sollte.

Die Erwartung, dass der Bedarf an Einzelwagenladungsverkehren durch Rückbau von Anschlussgleisen und Güterladestationen im Netz, durch den Ausbau des Kombinierten Verkehrs und die Konzentration auf Ganzzugkonzepte für Großverlader verschwindet, ist unerfüllt geblieben. Denn die Verlagerung von bahnaffinen Gütern auch geringerer Transportmengen, allen voran von Gefahrgütern (wie Gas und Industriechemikalien), Recyclinggütern oder Baustoffen, auf parallele Straßenrouten hat sich als verkehrspolitisch unerwünscht herausgestellt. Innovationen werden aber als Voraussetzung gesehen, um den Schienengüterverkehr attraktiv den KundInnen darzustellen. Innovationsfelder sind die Gemischtkupplung (als längerfristige Brückentechnologie), die herkömmliches und automatisches Kuppeln von Waggons erlaubt, um bei Bedarf gemischte Güterzüge zusammenstellen zu können, des Weiteren Güterwagen mit Rangierhilfsantrieb und außerdem Last-Mile-fähige Triebfahrzeuge (SIEGMANN, 2014).

Abbildung 1-48: Innovatorische Ansatzpunkte am Güterwagen (FlexCargoRail-Konzept ergänzt)



Quelle: RWTH Aachen, Institut für Schienenfahrzeugtechnik (ergänzt nach HECHT und SIEGMANN, 2014)

Während sich beim Wagenaufbau die vereinheitlichte Spezialisierung längst durchgesetzt hat, die Wechselbehälter eine große Anwendungsvielfalt gewonnen haben, nicht zuletzt durch einheimische Innovationen, bleibt das Güterwagenfahrwerk ein weiterhin offenes Innovationsfeld, wenn man die Problemkreise Bahnlärm (an der Quelle der Bremsen), Zug- und Stoßvorrichtung („Kupplung und Verschub“), Waggonortung und -überwachung etc. anspricht. Zwar ist die Bahnindustrie in Österreich nicht primär darauf ausgerichtet, aber andererseits besteht im Sektor der Gleisbaumaschinen Know-How auf Weltniveau, sodass die Komponenten-Entwicklung ein Innovationsthema sein kann.

In Deutschland haben sich Eisenbahninstitute von Technischen Universitäten, die Waggonbauindustrie und WagenvermieterInnen zu einem Interessensverbund zusammengetan, der sich der Entwicklung eines „innovativen Eisenbahngüterwagens 2030“ annimmt. In einem Weißbuch wurden die Ziele plakativ mit 5L (Leise-Leicht-Lautstark-Logistikfähig-LifeCycleCost-orientiert) zusammengefasst. Betont wird, dass die Komponenten-Entwicklung in ein technisch-betriebliches Gesamtkonzept eingebunden sein muss, um wettbewerbsfähig überzeugend für VerladerInnen und Operateure zu sein (TU DRESDEN 2012).

Schon früher wurden z.B. Drehgestell-Entwicklungen mit Hilfsantrieben (für das Rangieren auf den letzten Metern oder als Booster im Zuglauf), also in beschränktem Maße selbstfahrende Güterwagen, vorgeschlagen (s. Abbildung 1-49).

□ Logistikkonzept-fundierte Innovationen im Fahrzeugbereich

Das Konzept des „Cargo Sprinters“, eines festverbundenen Zugverbandes bestehend aus zwei angetriebenen Endwagen mit Führerstand mit dazwischen eingereihten Tragwagen für den Containerverkehr im Expressdienst zu Flughäfen (konkret auf der Strecke Hamburg/Osnabrück - Flughafen Frankfurt im zweijährigen Testbetrieb), wurde von der DB Cargo zur Jahrtausendwende initiiert und wieder fallengelassen. Trotz sicherheitstechnischer Bedenken zur Crash-Sicherheit der Führerkabinen enthielt das Konzept durchaus bemerkenswerte Aspekte, etwa straßenaffine Logistikdienste auf die Schiene zu verlagern und schneller zuzustellen als der Lkw oder die dezentralisierte Aufnahme von Containern bei den VersenderInnen im 1+0-Rangierbetrieb (Triebfahrzeugführer ohne Verschubpersonal).

In der Schweiz wurden darauffolgend, allerdings lokomotiv-bespannt mit Steuerwagen, vergleichbare Garnituren für den Postverkehr eingesetzt. Auch der schon lange praktizierte TGV-Verkehr für die französische Post oder die Posttriebwagen in den Niederlanden können ins Treffen geführt werden. In weiterer Folge wurde der nicht nur selbstfahrende, sondern mithilfe von Radarsensoren sich selbststeuernde Güterwagen Cargo Mover von der RWTH Aachen als Prototyp gebaut, der ähnliche Entwicklungen der Automotiv-Branche möglicherweise sogar vorweggenommen hatte. Zwar ist die eisenbahnbehördliche Zulassung für führerlose selbstfahrende Fahrzeuge im öffentlichen Bahnnetz auszuschließen, in abgeschotteten Gleisnetzen von Werkbahnen (ohne öffentliche Straßenkreuzungen) aber vorstellbar („0+0-Betrieb“).

Abbildung 1-49: Versuchsträger für autonomes Eisenbahngüterfahrzeug „Cargo Mover“



Quelle: RWTH Aachen, Institut für Eisenbahnfahrzeuge

1.1.3.3 Resümee zu den Umstellungsbedingungen (Status quo)

- Der Bahnsektor hat schon vieles von dem verwirklicht, was in den anderen Verkehrsträgersystemen technisch noch bevorsteht, etwa die Rekuperation von Bremsenergie und der Einsatz von Strom aus bahneigenen Wasserkraftwerken.
- Die Verbreiterung der erneuerbaren Energieversorgung, z.B. über Windkraft oder Biokraftstoffe, bleibt eine Aufgabe, auch wenn der volatile Stromhandel kurzfristig verlockender erscheint.
- Innerhalb des Bahnsystems sind die Anforderungen des schnellen und des regionalen Personenverkehrs auf der einen Seite und des transitierenden und des flächenbedienenden Güterverkehrs auf der anderen Seite sehr unterschiedlich ausgeprägt.
- Die hohen Lastanforderungen der Güterzüge an die Traktion der Triebfahrzeuge lassen vergleichsweise schwache Motorleistungen nur für sehr kurze Strecken zu, sodass alternative Antriebsformen, wie sie sich für andere Verkehrsträger in Probe befinden, betriebspraktisch zurzeit kaum in Frage kommen.
- Eine weitere Rahmenbedingung ist die lange Lebensdauer der Fahrbetriebsmittel im Schienenverkehr, die in Jahrzehnten zu bemessen ist, sodass technische Aufrüstungen und Nachrüstungen in den Fokus genommen werden sollten.
- Im Schienengüterverkehr ist dem Wirkungskreis Fahrzeug–Fahrweg–Netzbetrieb–Güterladestellenbedienung als leistendes System besonderes Augenmerk zu schenken. Die Maßnahmen zur technischen Interoperabilität (TSI) sollten um Maßnahmen der prozessualen Interoperabilität ergänzt und mit diesen abgestimmt werden. Darin besteht eine nationale wie transnationale Aufgabe.

Quellenhinweise zu Kapitel 1.1.3:

- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND (BUND) et.al. (2012):** Hintergrundpapier (Ruß-) Emissionen bei Diesellokomotiven. Berlin
- CORTESI, A.; MARK, R.; HENZI, M. (2012):** Die neue Hybridlokomotive Eem 923, das kompakte Arbeitsgerät für den Wagenladungsverkehr. In: Eisenbahn-Revue 10/2012, S. 494-496
- DÖRR, H. (2014):** Perspektiven für Schienengüterbedienung in Ballungsräumen. Versorgungsstrategien für die Gütersenke Großstadt. In: IFV Bahntechnik aktuell 48/2014. S. 49-74. Berlin
- DÖRR, H.; FRANK, S. (2007):** Regionale Bahnaffinität: Komponenten und Bedingungen. Charakteristika des Schienengüterverkehrs in der Fläche am Beispiel der Inn-Region. In: Güterbahnen 4/2007. S. 29-39
- ECO RAIL INNOVATION (2010):** Herausforderungen für das System Bahn 2020, Berlin.
- GOLDENBERG, Ph.; GOLDENBERG, V.; REPPICH, M. (2012):** Anwendungsmöglichkeiten erneuerbarer Energiequellen im Bahnsektor. In: El Eisenbahningenieur Februar 2012. S. 22-29
- HECHT, M. (2014):** Umgesetzte und umsetzungsnahe Innovationen im Schienengüterverkehr. Vortrag bei RAIL-FREIGHT 2014 in Berlin. In: IFV Bahntechnik aktuell 48/2014. Anhang C. Berlin
- HILDEBRANDT, T.; HACKENTHAL, H. (2013):** Wirtschaftlichkeit im Blickpunkt. Maßgeschneiderte Lokomotiven dank Modularität. In: Güterbahnen 4/2013. S. 20-23
- HÖRL, B. et. al. (2012):** Metro.Freight.2020. Transportmittelauswahl für die mittelbetriebliche Wirtschaft. Strategie zur Stärkung und effizienten Nutzung der Schieneninfrastruktur in Ballungsräumen. Studie finanziert im Forschungs- und Technologieprogramm iv2s plus herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien

SIEGMANN, J. (2014): Die Zukunft des Schienengüterverkehrs aus der Perspektive der Forschung. In: IFV Bahntechnik aktuell 48/2014. Anhang A. Berlin

STEIMEL, A. (2006): Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung. Grundlagen und Praxis. München

TU DRESDEN - Professur für Bahnverkehr und TU BERLIN - Fachgebiet Schienenfahrzeuge (2012): Weißbuch Innovativer Eisenbahngüterwagen 2030. Die Zukunftsinitiative „5L“ als Grundlage für Wachstum im Schienengüterverkehr. Dresden/Berlin

1.1.4 Barges in der Binnenschifffahrt

Die Vorteile der Binnenschifffahrt liegen in der unübertroffenen Massenleistungsfähigkeit im Landverkehr und den damit verbundenen Kostenvorteilen je Tonne Fracht. Die Binnenschifffahrt ist nicht von Fahrverboten und Ruhezeitunterbrechungen betroffen. Die Reisegeschwindigkeit ist allerdings niedrig (ca. 15 km/h) und häufige Schleusungen kosten zusätzlich Zeit (ca. 40 Minuten). Saisonbedingt können Niedrigwasserstände, die die Abladetiefe (Nutzlastkapazität) der Barges reduzieren, Hochwasser oder Eisstoß auftreten, die die Transportläufe unterbrechen können. Jedenfalls kann das Binnenschiff, gleich welcher Gattung, die niedrigsten Energieverbräuche je Transportleistung für sich verbuchen. Verbesserungswürdig ist der Emissionsausstoß, da die Schiffsantriebe sehr langlebig sind und daher der technische Fortschritt im Gegensatz zu den anderen Verkehrsträgern wenig greift.

Abbildung 1-50: Transportweiten bei gleichem Energieverbrauch Straße, Bahn und Binnenschiff



Quelle: VIA DONAU, Handbuch der Donauschifffahrt 2013

1.1.4.1 Binnenschifffahrtstypen nach Güterart und Kombinationen von Barges

Je nach Güterart können unterschiedliche Binnenschifffahrtstypen auf der Donau zum Einsatz kommen: Trockengüterschiffe, Tankschiffe, Containerschiffe und RoRo (Roll-on-Roll-off)-Schiffe. Die Tabelle 1-23 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Einsatzbereiche der unterschiedlichen Binnenschifffahrtstypen (VIA DONAU, 2013, 105 ff). Auf der Donau sind aber vor allem Transporte von Massenschüttgütern in Zweier- oder Vierer-Schubverbänden üblich. Dabei kommen ein Schubschiff (ohne Laderaum) und ein bis vier Leichter zum Einsatz, wobei manchmal je nach Bergfahrt (gegen die Strömung schlanker) oder Talfahrt (mit der Strömung breiter) der Schubverband zusammengestellt wird. Generell ist eine Verlängerung der Verbreiterung bei der Anordnung der Leichter vorzuziehen. Seltener ist der Einsatz eines Motorgüterschiffes mit seitlich mitgeführtem Leichter als Koppelverband. Der Vierer-Schubverband entspricht der Größe der Schleusenkammern entlang der Donau in Österreich (230 m x 24 m oder der

UNECE-Wasserstraßenklasse VI b), nicht aber entlang der Donau-Main-Rhein-Wasserstraße, die geringer dimensioniert sind. Ein Vierer-Schubverband kann etwa 7000 t (bis 12.000 t) Fracht befördern, was rd. 175 (300) Eisenbahnwaggons oder 280 (480 theoretisch) Lkw-Fuhren entspricht (VIA DONAU, 2013, 19).

Abbildung 1-51: Typische Barges in der Donauschifffahrt Motorgüterschiff und Zweier-Schubverbände



Bilder: arp (2010)

Tabelle 1-23: Binnenschifffahrtstypen (ohne Schubverbände) auf der Donau im Einsatz

Binnenschiff-fahrtstyp	Transportgüter und -kapazität	Illustration	Anzahl von äquivalenten Lkw-Fuhren
Trockengüter-schiffe:	z.B. Rundholz, Stahlprodukte, Getreide, Erze	-	-
Gustav Koenigs-Klasse	900 Nettotonnen		
Europaschiff	1.350 Nettotonnen		
Großmotor-schiff	bis 3.000 Nettotonnen		
Tankschiffe	Mineralölprodukte, Flüssiggas, Chemiegüter bis 2.300 t		
Container-schiffe	Container bis 470 TEU		
RoRo-Schiffe	z.B. Pkw, Sattelzüge, überdimensionale Güter		270 x

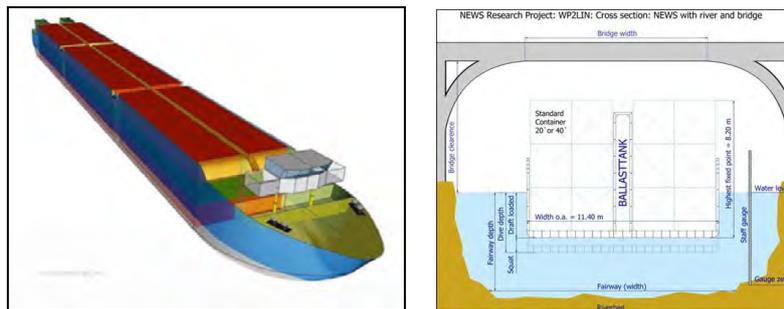
Quelle: VIA DONAU, Handbuch der Donauschifffahrt, 2013, 105 ff

1.1.4.2 Bedingungen der Wasserstraße als Optimierungsfaktoren im Schiffsdesign

Bevor an antriebsseitige Verbesserungen der Transporteffizienz (Propellerleistung in kWh durch Tonnenkilometer) gedacht wird, sind eine optimierte Leistungsregelung des Schiffsantriebes je nach örtlichen Fahrwasserbedingungen (Absenk des beladenen Schiffes abhängig von Fahrgeschwindigkeit und

Fahrwassertiefe, Strömungsgeschwindigkeit) und eine optimierte Barges-Kombination (wie schlanker Schubverband mit geringerem Tiefgang als ein selbstfahrendes Schiff) erfolgversprechende Faktoren zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Schadstoffreduktion. Der Gewichtsreduktion der Barges wird nur ein kleiner Effekt zugesprochen (STRASSER, 2013, 45). Schließlich ist aber eine durchgehende, für die jeweiligen Transporterfordernisse der Verkehrsrelation ausreichende Fahrwassertiefe eine infrastrukturelle Voraussetzung, die allerdings auf bioökologische Einwände stoßen kann.

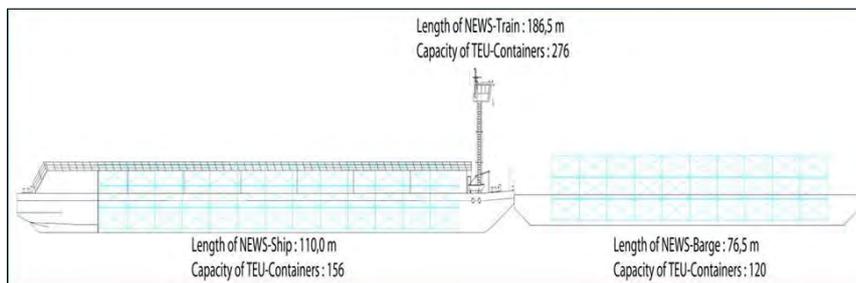
Abbildung 1-52: Schiffsdesign für eine optimierte Beladungs-, Energieverbrauchs- und Emissionscharakteristik



Quelle: www.news-fp7.eu

Anmerkung: Der mittige Ballasttank des dreilagig beladenen Container-Schiffes wird als Ausgleich für Leercontainer-Rücktransporte gebraucht (LINDENAU, 2014, 12).

Abbildung 1-53: NEWS Convoy 1: Container-Motorschiff mit Container-Schubbarge für die Donau-Main-Route



Quelle: LINDENAU 2014, 17

Forschungsinitiativen gibt es in Hinblick auf das Schiffsdesign, das die Effektivierung der Ladungskapazität (vor allem in Bezug auf Containertransporte), den Einsatz energieeffizienter Antriebsaggregate (wie LNG) und die Absenkung der Schadstoffemissionen zum Ziel hat (s. Abbildung 1-52 u. Abbildung 1-53). Für solche Neuentwicklungen von Binnenschiffen ist aber auch die Entwicklung einer Marktstrategie in Hinblick auf die Akquirierung von z.B. Container-Transporten im Hinterland und die Promotion entsprechender Transportrelationen mit einzubeziehen, wenn eine Flottenerneuerung damit angestoßen werden soll.

Dieser Aufgabe widmet sich das entlang der Donau aktive EU-Projekt NEWS (Development of a Next Generation European Inland Waterway Ship and Logistic System.)⁶¹

1.1.4.3 Möglichkeiten zur Kraftstoffeinsparungen und alternativer Antriebssysteme

Die strengen und wirksamen Abgasnormen EURO V bzw. VI für die Nutzfahrzeuge im Straßenverkehr machen aufmerksam, dass die Binnenschifffahrt bezogen auf die Transportleistung (in tkm) beginnt ihren Umweltvorsprung zu verspielen und gegenüber der Bahn ins Hintertreffen gerät. Nicht zuletzt, weil der Druck vergleichbarer Umweltvorschriften fehlt.

Im Gegensatz zur Straße und Schiene verursacht aber die Binnenschifffahrt praktisch keine Lärmbelästigung bei der Durchfahrt des Siedlungsraumes. Aus der Schadstoffemission von Stickoxiden und Partikeln resultiert jedoch ein gewisser Handlungsbedarf, wenn für eine Verkehrsverlagerung auf die Wasserstraße argumentiert werden soll.

Durch die Optimierung von hydrodynamischen Parametern wie Form, Propulsion und Manövrierfähigkeit im Schiffsbau können weitere Kraftstoffeinsparungspotenziale realisiert werden. Technische Verbesserungen müssen im Einklang mit der Wirtschaftlichkeit betrachtet werden, wenn die Binnengüterschifffahrt im Preis-Leistungs-Verhältnis im Verkehrsträgerwettbewerb ihren Vorteil behaupten will.

Daher ist mittelfristig in der Schifffahrt nicht zu erwarten, dass Treibstoffalternativen zum Diesel zum Einsatz kommen werden. In längerer Perspektive ist es jedoch vorstellbar, dass gasbetriebene Motoren und Brennstoffzellen die Dieselmotoren ablösen könnten. Die emissionsoptimierten Dieselmotoren haben einen ungefähren Kraftstoffverbrauch von 0,2 kg/kWh, der in den letzten Jahren konstant geblieben ist. Weitere Einsparungspotenziale gehen aber auf Kosten der Verringerung von Stickoxid-Emissionen. Die Lebensdauer von Schiffsmotoren ist im Vergleich zu Straßennutzfahrzeugen im Verhältnis von 15:5 Jahre höher, womit strengere Emissionsstandards nicht so schnell erfüllt werden können. Als Maßnahmen zur Verbesserung des Emissionsverhaltens von Schiffsmotoren werden genannt (VIA DONAU, 2013, 118 f.):

- Reduzierung der Schwefeloxid-Emissionen durch schwefelärmeren Kraftstoff,
- Reduzierung von Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxid-Emissionen durch den Einsatz eines Diesel-Oxidationskatalysator, der den schwefelärmeren Treibstoff benötigt,
- Reduzierung der Stickoxidemissionen durch Abgasrückführung (schwefelarmer Treibstoff notwendig), Anfeuchtung der vom Motor angesaugten Luft, Wassereinspritzung in den Zylinder, Nutzung einer Wasser-Kraftstoff-Emulsion, selektive katalytische Reduktion (= Einspritzung eines Reduktionsmittels in das Abgas zur effizienten Beseitigung von Stickoxid-Emissionen),
- Reduzierung von Feinstaubemissionen durch Feinstaubfilter, welche wiederum schwefelarmen Treibstoff benötigen.

Darüber hinaus sind folgende antriebsseitige Innovationen in Forschungsprojekten aufgegriffen worden:

- Motoren für verflüssigtes Erdgas (LNG),
- Advising Tempomaat (ATM – Computergestütztes System zur Ermittlung der optimalen Reisegeschwindigkeit in Relation zu einem geringstmöglichen Treibstoffverbrauch von Schiffsmotoren durch zeitgerechte Einberechnung der Beschränkungen auf der Wasserstraße)

□ Einsatz von LNG-Motoren in der Binnenschifffahrt

LNG als Kraftstoff kann in zwei verschiedenen Antriebskonzepten implementiert werden:

- Mono-Fuel-Motoren werden rein mit LNG betrieben. Vom Prinzip her sind sie mit einem Ottomotor vergleichbar. Die Vorteile bestehen im Vergleich zum üblichen Schiffsdieselmotor, dass sie im hochlastigen Betrieb eine hohe Energieeffizienz erzielen und geringere Schadstoffmengen (weniger Stickoxide) wegen der niedrigeren Verbrennungstemperaturen abgeben. Die Effizienz könnte durch Kopplung mit einem Generator, also durch den Einsatz von gaselektrischen Schiffsantrieben, noch gesteigert werden. Nachteilig beim Einsatz von Mono-Fuel-Motoren ist, dass solche Schiffe auf Wasserstraßen mit LNG-Tankinfrastruktur angewiesen sind, die auszubauen wäre. Häufig verfügen Binnenschiffe über kleinere Hilfsmotoren, die den Bordstrom erzeugen. Dazu könnten Gasmotoren eingesetzt werden.
- Dual-Fuel-Motoren: Der Betrieb erfolgt hier über eine Kompressionszündung, wie sie bei reinen Dieselmotoren stattfindet, wobei die Zündung mit dem Diesekraftstoff erfolgt. Dual-Fuel-Motoren lassen sich in Hochdruck- und Niederdruckmotoren unterscheiden. Während Hochdruckmotoren die Eigenschaften eines Dieselmotors beibehalten, wobei der LNG-Anteil bei bis zu 80 % liegen kann, wird bei der Niederdruckvariante das LNG ebenfalls mit Diesel gezündet. Im anschließenden Gasbetrieb wird, wie bei einem Ottomotor, ein Gas-Luftgemisch verbrannt. Dual-Fuel-Motoren haben den Vorteil der Kraftstoffflexibilität, womit sie auch auf Routen ohne LNG-Tankinfrastruktur einsetzbar sind. Ihre Effizienz ist mit der eines Dieselmotors etwa gleichzusetzen (WURSTER et al., 2014).

Das zukünftige Schiffsdesign repräsentieren zwei Prototypen von LNG-angetriebenen Binnentankschiffen namens Greenstream, die jüngst gebaut von den niederländischen Peters Shipyards für den Tankverkehr von Shell auf dem Rhein durch Steuerhaus und Wohnung am Bug äußerlich auffallen. Selbstverständlich ist das Tankschiff vom Typ C (3.130 m³ Fassungsvermögen bzw. 2.900 t) doppelwandig ausgeführt und kann unter einer Schiffslänge notstoppen. Die vier Gasmotoren sind in Containern untergebracht, die zur Wartung im (Heimat)Hafen getauscht werden können. Eine besondere Prüfung zur Zulassung war wegen des kritischen Flammpunktes von LNG bei 55° C bei der Zentralen Kommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) erforderlich. Der LNG-elektrische Antrieb soll um ein Viertel weniger CO₂, um 80 % weniger Stickoxide und kaum Partikelemissionen verursachen. Für die obere Donaustrecke ist dieser Prototyp aber wegen seiner Abladetiefe von 3,45 m nicht tauglich (NUTSCH, 2013).

Nach dem heutigen Stand kommt LNG als alternativer Treibstoff in der Binnenschifffahrt nur für einen Bruchteil der Schiffsflotte in Frage. Denn erstens ergeben sich hohe Investitionskosten für die Anschaffung eines LNG-Motors und des speziell isolierten Tanks. Außerdem müssen dann Teile der Schiffskonstruktion teurer mit Edelstahl ausgeführt werden. Somit würden sich diese Anschaffungen hauptsächlich bei Binnenschiffen mit hohen Verkehrsleistungen, wie bei Tank- oder Containerschiffen, amortisieren. Zweitens benötigt der LNG-Antrieb für die gleiche Energiemenge wie bei Diesel das 1,8-fache Tankvolumen, was sich bei Schubschiffen oder kleineren Motorschiffsklassen nicht auszahlen würde (WURSTER et. al., 2014). Dafür ist LNG im Betrieb deutlich kostengünstiger (ca. 30 % derzeit) und umweltfreundlicher (unterschreitet die Abgasnormen von EURO VI) als Diesel.

Die *Pro Danube International*, eine in Österreich gegründete, private Initiative zur Förderung der Donauschifffahrt, hat von der Europäischen Kommission den Auftrag erhalten, gemeinsam mit zwölf weiteren Ländern einen Masterplan für die Aufrüstung und Anwendung von LNG als Antriebsmittel von Binnenschiffen, für den LNG-Transport auf den Wasserstraßen von Rhein und Donau sowie für den Bau von Terminals und Tankstellen entlang von Donau und Rhein zu erstellen (MÜLLER, 2013).

1.1.4.4 Resümee zu den Umstellungsbedingungen (Status quo)

- Bei der Flottenerneuerung ist mit geringer Investitionsbereitschaft zu rechnen, weil die Schiffsdieselmotoren langlebig sind und ein Marktwachstum im Transportgeschäft nicht abschätzbar ist. Außerdem fehlt der Druck von Umweltvorschriften, der unter diesen Umständen nicht ausgeübt wird, zumal die Wettbewerbssituation unter den Anrainerstaaten angespannt ist.
- In der Binnenschifffahrt müssen daher technische Innovationen in ein erweitertes Zukunftskonzept eingebettet werden, das die Marktentwicklung der Verlagerung in den regionalen Wirtschaftsräumen und den grenzüberschreitenden Ausbau der Wasserstraße mit einbindet („Donaustrategie“).
- Der Anstoß für Innovationen muss aus der Entwicklung der Nachfrage der Transportsubstrate kommen, dabei sind die Bedarfe in den Segmenten Recycling-Wertstoffe, High and Heavy, Halbzeug (Coils) und auf längere Sicht Containertransporte neben den klassischen Massengütern zu beobachten.
- Antriebstechnisch wird der Einsatz von Flüssiggas LNG als aussichtsreich angesehen. Da LNG als Kraftstoff sowohl für den schweren Straßengüterverkehr als auch für das Motorgüterschiff in Frage kommt, ist der koordinierte Ausbau der Tankinfrastruktur an den Hafenstandorten naheliegend.

Quellenhinweise zu Kapitel 1.1.4:

LINDENAU, D. (2014): State-of-the-art comparison propulsion systems. Report D 2.1. NEWS Project. Development of a Next Generation European Inland Waterway Ship and Logistics System. Seventh Framework Programme. European Commission. Wien

LINDENAU, D. (2014): Description of Energy System. Report D 2.2. NEWS Project. Development of a Next Generation European Inland Waterway Ship and Logistics System. Seventh Framework Programme. European Commission. Wien

MÜLLER, J. (2013): Binnenschiffe auf LNG-Antrieb umrüsten. In: Verkehr Nr. 48, S. 7-8

NUTSCH, M. (2013): Greenstream muss Mainstream werden. In: Schifffahrt und Technik 4/2013. S. 40-43

STEINDL, Ch. (2012): Wir brauchen einen Masterplan. Interview in: Business & Logistics Nr. 9A/2012. S.14-15

STRASSER, G. (2013): Innovative Donauschiffe. Vortrag bei der Kombiverkehrstagung der ÖVG am 28.2.2013 im Staatsarchiv in Wien. Tagungsband S. 13-45. Wien

VIA DONAU (2013): Handbuch der Donauschifffahrt, Wien

WURSTER et al. (2014): LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen. Deutsches Zentrum für Raum- und Luftfahrt (DLR). Institut für Verkehrsforschung. Kurzstudie im Auftrag des BMVI. Berlin

1.1.5 Flugzeugmuster im Luftfrachtverkehr

1.1.5.1 Besonderheiten der Luftfracht

Als Luftfracht gelten Güter im weiteren Sinne, die auf Linien- oder Charterflügen als Fracht, Expressgut oder Post mit Flugzeugen transportiert werden. Im engeren Sinne wird laut IATA-Beförderungsbestimmungen nur Fracht verstanden, welche als Frachtgut deklariert und transportiert wird. Davon ist jene Post abzugrenzen, welche nach den Bestimmungen der internationalen Postregulativen abgewickelt wird. Güter von Express- und Paketdiensten, sofern diese unternehmensintern auf dem Luftweg transportiert werden, sind auch getrennt zu betrachten (MENSEN, 2013, 17).

Aufgrund der hohen Transportkosten und der geringen Masseleistungsfähigkeit von Luftfahrzeugen im Vergleich zu bodengebundenen Verkehrsträgern, werden in der Luftfracht vorwiegend Massengüter mit geringem Gewicht pro Stück bzw. Sendung oder hochwertige Güter befördert (MENSEN, 2013, 18). Die Vorteile der Luftfrachtbeförderung sind unter anderem der schnelle Transport des Guts weltweit innerhalb weniger Tage, Einsparungspotenziale bei Verpackungen, wie beim Land- oder Seetransport üblich, oder die Flexibilität in der Warendisposition und die schnelle Verfügbarkeit auf den Weltmärkten. Als möglicher Nachteil ist die relative geringe Netzdichte der Flughafenstandorte verbunden mit Nebenläufen zumeist auf der Straße zu erwähnen.

Die Qualität der Luftfracht liegt im Zeitvorsprung gegenüber anderen Transportmodi und in der mühelosen Überwindung von Engpässen in den terrestrischen Verkehrsnetzen auf Fernläufen. Frachtpreisabhängig lässt sich die Luftfracht in drei Bereiche einteilen:

- Standard-Luftfracht (mittlere Laufzeit 2-4 Tage, max. 7 Tage)
- Express-Luftfracht (mittlere Laufzeit 1,5-3 Tage)
- Premium- bzw. Kurierluftfracht (Massebegrenzung max. 100 kg, max. Laufzeit 1-2 Tage in Abhängigkeit von zeitnahen und verfügbaren Flugverbindungen)

Bestimmte, als Sonderfracht bezeichnete, Güter erfordern bestimmte Einrichtungen und Handhabungen. Dazu zählen gefährliche (z.B. radioaktive und giftige Stoffe) und verderbliche (z.B. Blumen, Obst, Fleisch) Güter, Wertfracht (diebstahlgefährdete und sicherheitsrelevante Güter) wie auch lebendige Tiere. Diese Inhomogenität der Ladungen stellt hohe Anforderungen an die physische Abfertigung am Boden.

Physische Eigenschaften der Güter, insbesondere Massen und Abmessungen der Frachtstücke oder der Umschlageinheiten, üben einen großen Einfluss auf den Abfertigungsaufwand aus. So unterschreiten etwas mehr als 80 % der Frachtstücke welche einen Anteil von nur etwa 15 % der Masse des gesamten Frachtaufkommens haben. Laut Statistiken fallen pro Kubikmeter Ladevolumen circa 150-200 kg Ladungsmasse an. Wesentlicher Faktor für einen wirtschaftlichen Transport per Luftfahrzeug stellt die Optimierung der Nutzlast, also die Abstimmung der Volumina und Masse der Güter auf den verfügbaren Laderaum, dar. Luftfracht kann lose auf Paletten oder in jeweils flugzeugmusterabhängigen geeigneten Containern (Unit Load Device – ULD) befördert werden. Schließlich müssen noch die Beladungsvorschriften erfüllt werden, damit das Flugzeug weder front- noch hecklastig beansprucht wird, was die Steuerbarkeit des Luftfahrzeugs erheblich beeinflussen kann.

Abbildung 1-54: Beladung eines Frachtflugzeuges mit flugzeugmusterspezifischen Unit Load Devices und lose Fracht auf Palette



Bild: Wikipedia 2010⁶² (li.), Lufthansa o.J.⁶³ (re.)

Abbildung 1-55: Beladung eines Kühl- und Heizcontainers und Querschnitt eines Passagierflugzeugs mit Beiladefracht



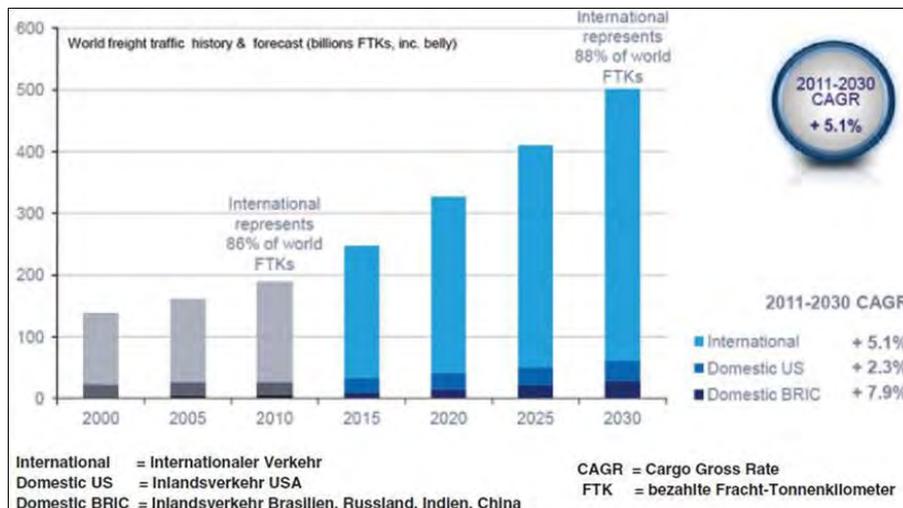
Bild: Austrianwings 2011⁶⁴ (li), Wikipedia 2002⁶⁵ (re.)

Die Luftfracht kann sowohl in reinen Frachtflugzeugen als auch als Beiladefracht in Passagierflugzeugen befördert werden, was jeweils 50 % des weltweiten Luftfrachtaufkommens ausmacht. Als Beiladefracht bei Passagierflügen im regulären Linienverkehr werden die Laderaumkapazitäten sowohl von Fracht als auch von Passagiergepäck genutzt. Frachtflugzeuge werden auf Flugstrecken eingesetzt, wo ein hohes Luftfrachtaufkommen existiert oder die Beiladekapazität bei Passagierflugzeugen zu gering ist. Insbesondere kommen Frachtflugzeuge dann zum Einsatz, wenn es die Abmessungen der Frachtstücke erfordern oder es sich gar um gefährliche Güter handelt. Frachtflugzeuge haben einen Anteil von etwa 5 % der Gesamtflugbewegungen weltweit. Zwar werden nur rund 2-3 % des weltweiten Gütertransportaufkommens als Luftfracht befördert, welche jedoch ungefähr ein Drittel des Warenwertes im Welthandel ausmacht (MENSEN, 2013, 18 ff.).

Einen immer größeren Anteil am Gesamtluftfrachtaufkommen nimmt die Expressfracht ein, die im Vergleich zur üblichen Luftfracht ein rund dreimal größeres Wachstum aufweist. Daraus resultieren steigende zeitliche Anforderungen an den Luftfrachtverkehr (MENSEN, 2013, 45 ff.). Ein Faktor der mittlerweile auch schon bei Kurzstrecken eine immer größere Rolle spielt. So verkehren am Flughafen Wien-Schwechat regelmäßige Fracht-Linienflüge u.a. von/nach Ljubljana, Budapest, Köln, Liège und Paris (VIENNAAIRPORT, 2014). Diese zum Straßengüterfernverkehr und teilweise zum Bahntransport affinen

Relationen zeigen auf, dass solche intermodalen Vergleiche nicht abwegig erscheinen, weil es offenbar eine zunehmende Konkurrenz zwischen diesen Verkehrsträgern schon ab wenigen hundert Kilometer Laufweg geben kann.

Abbildung 1-56: Entwicklung des Weltluftfrachtverkehrs bis 2030



Quelle: MENSEN 2013, 54

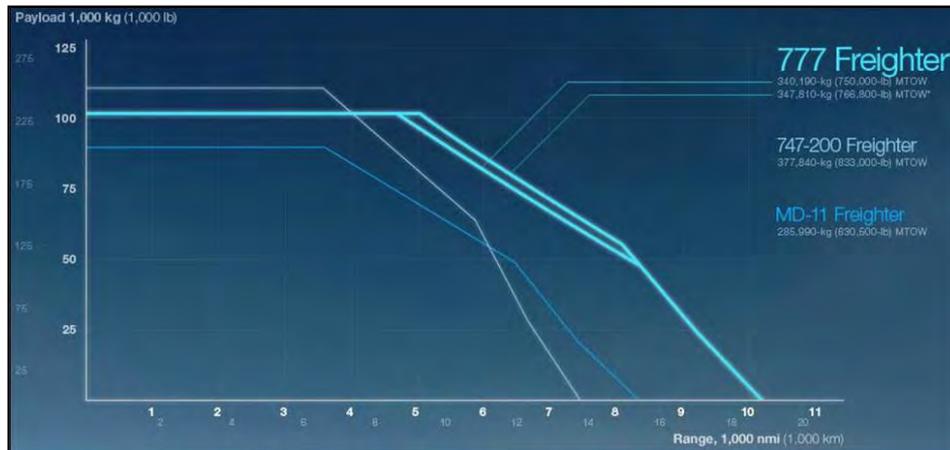
1.1.5.2 Flugzeugmuster für den reinen Frachtverkehr

Reine Frachtflugzeuge können verschiedenartige Flugzeugmuster mit unterschiedlichen Ladekapazitäten sein. Maßgeblich ist das höchste zulässige Abfluggewicht MTOW (Maximum-Take-Off-Weight), welches beim Abheben des Flugzeuges nicht überschritten werden darf. Es setzt sich aus einem Zusammenspiel von Flugzeugeigengewicht, Gewicht des mitgeführten Brennstoffs beim Start aufgrund der für die Relation erforderlichen Reichweite und der damit möglichen Nutzlast zusammen.

Die folgende Abbildung 1-57 zeigt wie sich die Nutzlastmenge zur Reichweite von ausgewählten Frachtflugzeugen verhält, die eine maximale Zuladung zwischen 90 und 110 t bis zu einer kritischen Reichweite von rd. 6.500 km befördern können, wobei ein maximales Abfluggewicht zwischen 286 t und 378 t zum Tragen kommt. Anders ausgedrückt, die Abfluggewichts-Nutzlast-Verhältnisse kommen bestenfalls bei 29 bis 31 % zu liegen, womit angesichts der erheblichen Reichweiten der Transportläufe hohe Transportpreise zu tragen sind, die dem Mengenwert des Frachtgutes entsprechen müssen.

Für schwere oder voluminöse Güterlasten geeignete Frachtflugzeuge sind beispielsweise der Airbus Beluga oder die Boeing 747 LCF (Dreamlifter) (s. Abbildung 1-58). Selbst, wenn solche Flugzeuge nur eine relativ geringe Nutzlast von ca. 5 Sattelzügen oder zwei bis drei Eisenbahnwaggons transportieren können, sind sie hauptsächlich für den Transport von einzelnen Gütern mit „Lademaß-Überschreitungen“ in Hinblick auf den Straßen- oder Schienen-Fahrweg, v. a. in der Länge und Höhe, über tausende Kilometer geschaffen. Insbesondere dann, wenn auch kein Schifffahrtsweg in der Relation offensteht oder ein mehrmaliges Umladen oder gar Zerlegen vermieden werden kann.

Abbildung 1-57: Nutzlast-Reichweiten-Leistungsfähigkeiten bei Frachtflugzeugen der Boeing Company



Quelle: Boeing⁶⁶

Abbildung 1-58: Airbus Beluga - A300-600ST und Boeing Dreamlifter - 747 LCF



Bilder: WIKIPEDIA (2007)⁶⁷ (li.) und (2009)⁶⁸ (re.)

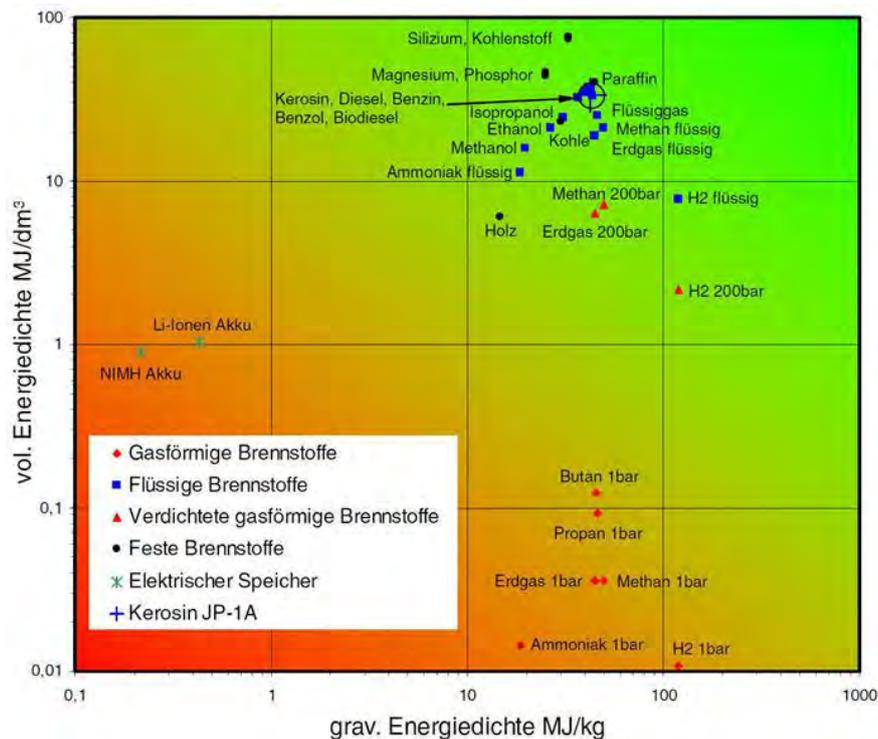
1.1.5.3 Alternative Brennstoffe und Triebwerke

Wie in der Automotivbranche wird auch in der Luftfahrt nach alternativen Antriebstechnologien und neuen Kraftstoffen geforscht, um die CO₂-Emissionen pro geflogenem Passagier- oder Tonnenkilometer reduzieren zu können. Nicht zuletzt, weil die Luftfahrt mit ihrem Beitrag zur Emission von Treibhausgasen immer wieder in die Kritik kommt.

Die heutigen mit Gasturbinentriebwerken ausgestatteten Turbofan- und Turbopropflugzeuge werden fast ausschließlich mit erdölbasiertem Kerosin betrieben. Aufgrund seiner hohen Energiedichte (gravimetrische Energiedichte 43,1 MJ/kg), seiner großen Speicherfähigkeit (volumetrische Energiedichte 34,2 MJ/l), dem niedrigen Gefrierpunkt (-47 °C), der beachtlichen Temperaturstabilität (Siedebereich 180 – 230 °C), der sicheren Handhabbarkeit (Zündgrenzen, Verdunstungsverhalten) und schließlich wegen der weltweiten Verfügbarkeit und der existierenden Infrastruktur ist Kerosin der geeignete Brennstoff für Flugzeuge. Im Gegensatz zu anderen Einsatzbereichen ist in der Luftfahrt die Energiedichte des Brennstoffs ein ausschlaggebender Faktor. Die aufgezählten Eigenschaften sind Anforderungen, welche an mögliche alternative Treibstoffe gestellt werden müssen. Weitere Punkte sind eine geringere Klimawirkung als Kerosin und eine längerfristig gesicherte Verfügbarkeit. Erstrebenswert ist außerdem,

wenn überhaupt, nur eine marginale Modifikation von Flugzeug und Triebwerk, eine einfach zu bedienende Bodeninfrastruktur sowie ein reibungsloser Übergang (Drop-In-Lösung) von fossilem Kerosin auf den neuen Brennstoff. Die folgende Darstellung zeigt Energiedichten von möglichen anderen Energieträgern.

Abbildung 1-59: Volumetrische und gravimetrische Energiedichten von Brennstoffen



Quelle: SIEBER o.J.

Wie aus der Darstellung ersichtlich, haben flüssige Kohlenwasserstoffe wie Diesel, Benzin und Benzol eine vergleichbar hohe Energiedichte, sind jedoch aufgrund ihrer fossilen Herkunft und den daraus resultierenden hohen CO₂-Emissionen als Alternativtreibstoff eher skeptisch zu betrachten. Relativ hohe Energiedichten liefern ebenfalls regenerative Brennstoffe wie Alkohole, Flüssiggas, flüssiges Methan und flüssiger Wasserstoff. Akkumulatoren jedoch, wie sie in der automotiven Elektromobilität eingesetzt werden, oder gasförmige Brennstoffe sind für die Luftfahrt ungeeignet. Festbrennstoffe, wie beispielsweise Silizium, erreichen auch geeignete Energiedichten, dazu wären aber noch erhebliche technologische Vorarbeiten notwendig.

Zwei fossile Brennstoffe, welche auch in der Automotivbranche eingesetzt werden, sind Liquefied Petroleum Gas (LPG) und Liquefied Natural Gas (LNG). LPG lässt sich zwar bei Raumtemperatur und niederem Druck (5-10 bar) verflüssigen, es weist jedoch eine um 27 % geringere volumetrische Energiedichte als Kerosin auf. Bei LNG ist eine Speicherung bei mindestens -162°C notwendig. Auch hier ist die volumetrische Energiedichte um 45 % geringer als bei Kerosin. LNG und LPG weisen zwar eine günstigere CO₂-Bilanz als Kerosin aus Erdöl auf, eine höhere Versorgungssicherheit bieten sie aktuell jedoch nicht.

Biokraftstoffe der ersten Generation, wie Biodiesel und Palmöl, sind für die Luftfahrt ungeeignet, da sie mit -10 °C bzw. -27 °C angesichts der Außentemperatur in Flughöhe einen zu hohen Gefrierpunkt haben. Die Biokraftstoffe der zweiten Generation (BtL – Biomass to Liquid) bieten allerdings deutliche Verbesserungen (SIEBER, o.J.). Weitere regenerative Brennstoffe können über pflanzliche und tierische Fette (HEFA – Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) oder Biomethan (GtL – Gas to Liquid) gewonnen werden (AIREG, 2012). In der Zwischenzeit konnten Brennstoffe aus HEFA- und BtL-Prozessen für die Luftfahrt zugelassen werden (SIEBER, 2014).

□ Arten von Triebwerken

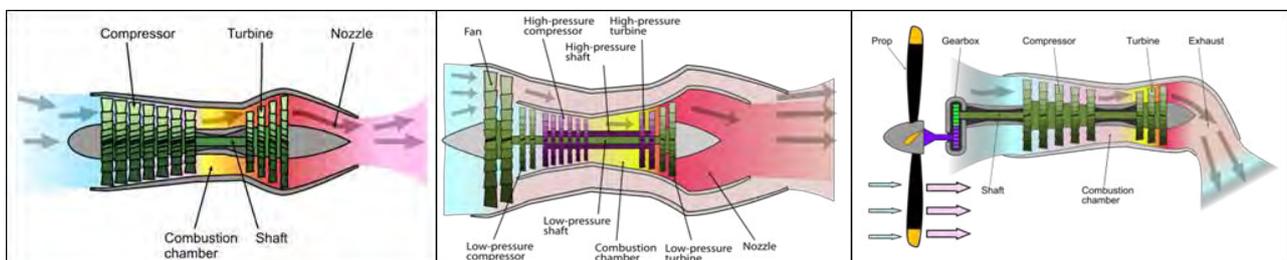
In der kommerziellen Luftfahrt werden heutzutage drei verschiedene Arten von Turbostrahltriebwerken verwendet: der Turbojet (Einstrom-Strahltriebwerk), der Turbofan (Zweistrom-Strahltriebwerk) und der Turboprop (Propellertriebwerk).

Der Turbojet ist die einfachste Art. Er besteht aus einem Gastriebwerk, bei der nur das Abgas als Antrieb genutzt wird. Durch den geringen Wirkungsgrad und den sehr hohen Lärmemissionen wird er nur mehr bei militärisch genutzten Flugzeugen eingesetzt.

Die am häufigsten eingesetzte Triebwerksart ist der Turbofan. Hier befindet sich vor der Gasturbine der Fan (engl. Gebläse), der den eingesaugten Luftstrom in einen inneren Luftstrom, welcher anschließend durch die Gasturbine geführt wird, und einen äußeren Luftstrom, der an der Gasturbine vorbeigeleitet wird, aufteilt. Durch diese Separierung des Luftstroms ergibt sich ein Nebenstromverhältnis, wodurch der Wirkungsgrad des Antriebs verbessert wird und die Lärmemissionen sinken.

Beim Turboprop wird der Schub hauptsächlich über einen Propeller erzeugt, welcher über ein Getriebe mit der Gasturbine verbunden wird. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Triebwerken wird hier vice versa viel Luft eingesaugt und schwach beschleunigt. Der Turboprop verbraucht im Vergleich zum Turbojet und dem Turbofan weniger Treibstoff, jedoch ist die Reisegeschwindigkeit geringer. Eine Sonderform ist der Propfan. Hier wird der Luftstrom ebenfalls in einen inneren und äußeren Luftstrom geteilt und außerdem ist die Anzahl der Propellerblätter höher als bei Turboprops. Dadurch kann der gleiche Luftdurchsatz durch kürzere Propellerblätter und/oder eine geringere Drehzahl erreicht werden, womit sich auch die Lärmemissionen verringern (BRÄUNLING, 2004).

Abbildung 1-60: Schematischer Aufbau eines Turbojet-, Turbofan- und Turboprop-Triebwerkes



Quelle: WIKIPEDIA aus ROMSTORFER 2010

□ Alternative Triebwerksentwicklungen

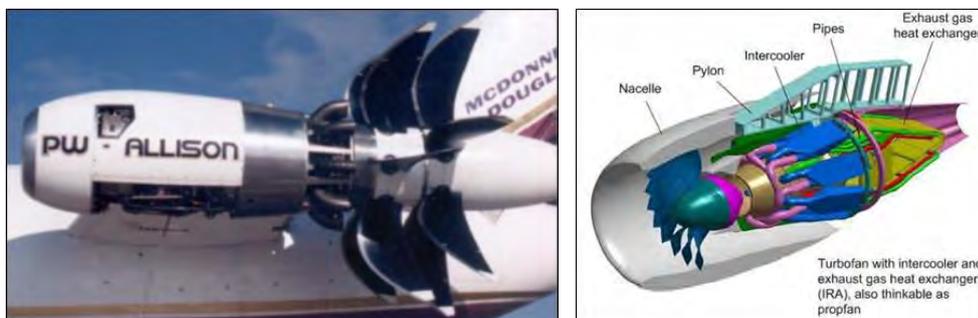
Die Luftfahrtforschung arbeitet an der Triebwerksentwicklung, um den Wirkungsgrad zu steigern und somit den Brennstoffverbrauch zu senken. Das soll beruhend auf den Grundtechnologien der konventionellen Triebwerke durch bestimmte leistungssteigernde Aufrüstungen erreicht werden. Eine dieser Aufrüstungen ist der Geared Turbofan, bei der mittels Untersetzungsgetriebe der Fan von der Niederdruckturbine entkoppelt wird. Somit können für beide Komponenten optimale Drehzahlen erreicht werden. In einer weiteren Entwicklungsstufe soll der Fan durch einen gegenläufigen Fan ersetzt werden (SIEBER, o.J.). Diese Art von Triebwerk steht kurz vor der Serieneinführung. Flugzeughersteller haben bereits 5.000 Stück geordert (SIEBER, 2014).

Eine weitere Entwicklung ist das Counter-Rotating-Open-Rotor-Triebwerk, bei dem durch Wegfall der Gondel (Ummantelung des Triebwerks, engl. "nacelle", s. Abbildung 1-60 Mitte und rechts) das Nebenstromverhältnis weiter gesteigert werden kann. Hier ist das Triebwerk mit zwei sich gegenläufig bewegenden Rotoren ausgestattet, um eine drallfreie und verlustarme Strömung zu erzielen. Diese Art von Triebwerk war nach der Ölkrise in den 1980er-Jahren entwickelt worden. Wegen des Öl-Preis-Verfalles danach und aufgrund sehr hoher Lärmemissionen hat sich diese Innovation nicht durchgesetzt. In der Zwischenzeit ist man allerdings wieder dabei, diese Technologie weiter voranzutreiben (SIEBER, o.J.).

Die Lärmemissionen konnten mittlerweile gesenkt werden und diese Triebwerkstechnologie verspricht womöglich die höchste Brennstoffeinsparung. Jedoch könnte damit eine etwas längere Flugzeit als beim Einsatz herkömmlicher Fluggeräte verbunden sein. Im Luftfrachtverkehr wäre dieser Umstand angesichts des Zeitaufwandes für das Ground Handling und die Vor- und Nachlaufzeiten zum/vom Flughafen Cargo Center allerdings verschmerzbar.

Andere Triebwerksentwicklungen beruhen auf dem Einsatz neuer Kreisprozesse im Triebwerk mittels Einbau eines Zwischenkühlers, der bei ausgleichendem Temperaturniveau höhere Druckverhältnisse mit sich bringt und/oder eines Abgaswärmetauschers, welcher die Wärmeenergie aus dem Abgas wieder dem Triebwerk zuführt. Beide Implementierungen wirken sich positiv auf den thermischen Wirkungsgrad aus. Weitere Ansätze basieren auf der Zwischenüberhitzung durch Einsatz einer zusätzlichen Brennkammer zwischen Hoch- und Niederdruckturbine, wodurch die mittlere Temperatur der Wärmezufuhr erhöht und der Brennstoffverbrauch abgesenkt werden können (SIEBER, o.J.).

Abbildung 1-61: Counter-Rotating-Open-Rotor-Triebwerk (li.) und Turbofan mit Zwischenkühler und Wärmetauscher (re.)



Quelle: SIEBER o.J. aus ROMSTORFER 2010

1.1.5.4 Resümee zu den Umstellungsbedingungen

- Technische Entwicklungen in der Luftfahrt haben besonders lange Vorlaufzeiten bis sie einsatzbereit sind. Die Sicherheitsanforderungen überbieten alle anderen Optimierungsziele. Entwicklungen, die keine Wirtschaftlichkeit im Betrieb erwarten lassen, werden unterbleiben.
- Laufende und künftige Entwicklungen im Flugzeugdesign konzentrieren sich auf eine noch weiter verbesserte Aerodynamik und eine Gewichtsreduktion der Bauteile, dazu gehören Maßnahmen, wie:
 - Laminarisierung der Strömung an Flügel, Leitwerken, Gondel und Rumpf zur Verringerung der Reibungswiderstände
 - aktive Anpassung des Flügels an die optimale Form während der Phasen des Fluges
 - Nutzung von kohlefaserverstärkten Bauteilen und anderen Leichtbau-Werkstoffen
 - Ersetzung der hydraulisch und pneumatisch betriebenen Systeme (z.B. Enteisung, Kabinenbelüftung) durch verteilte elektrisch betriebene Komponenten (eventuell mittels Brennstoffzelle versorgt)

Abbildung 1-62: Mögliche neue Flugzeugkonzepte nach SIEBER



Quelle: SIEBER o.J.

Quellenhinweise zu Kapitel 1.1.5:

AIREG (2012): Klimafreundlicher fliegen: Zehn Prozent alternative Flugkraftstoffe bis 2025), Präsentation, Berlin, aireg – Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany

BRÄUNLING, W. (2004): Flugzeugtriebwerke, 1. Aufl., Berlin-Heidelberg-New York: Springer

MENSEN, H. (2003): Handbuch der Luftfahrt, Berlin-Heidelberg: Springer

MENSEN, H. (2013): Handbuch der Luftfahrt, 2.Aufl., Berlin-Heidelberg: Springer

ROMSTORFER, A. (2010): Developments in Aviation as a Result of Implementing Counter Rotating Open Rotor propulsion, Diplomarbeit, Wien, FH Joanneum

SIEBER, J. (o.J.): Langfristige Sicherung des Luftverkehrs durch neue Antriebstechnologien und alternative Brennstoffe, Präsentation, München, MTU Aero Engines

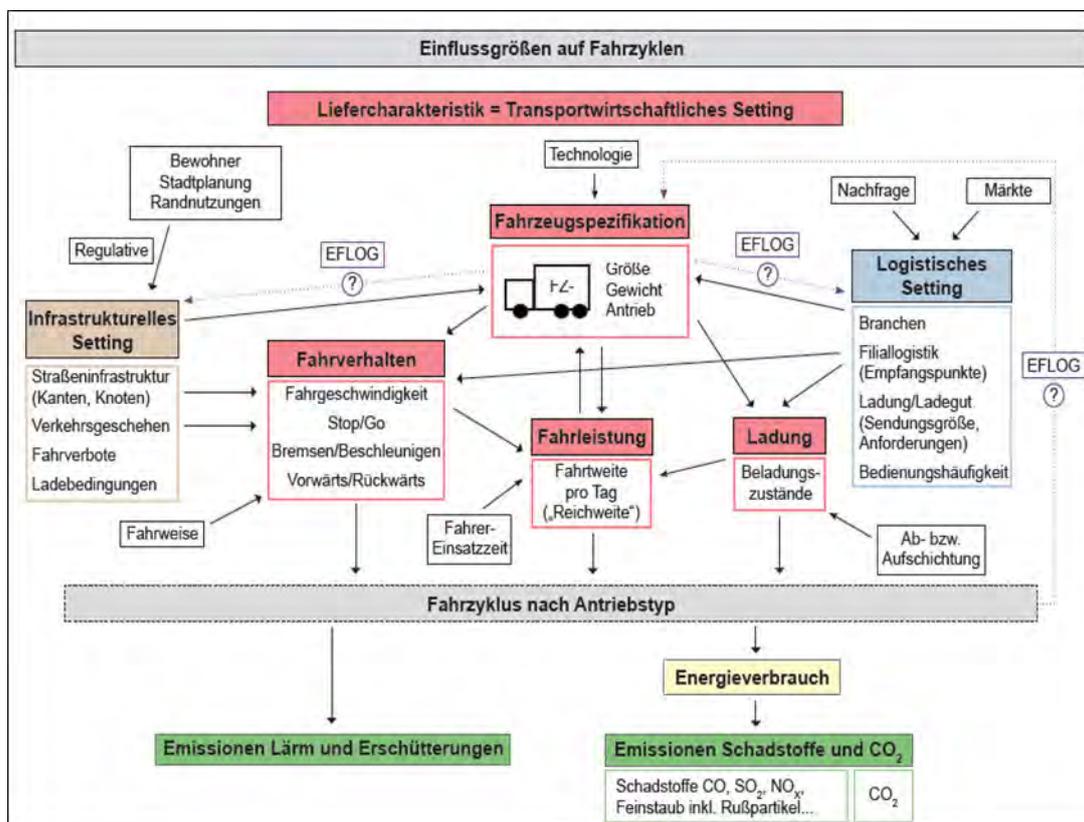
SIEBER, J. (2014): E-Mail-Korrespondenz zum Thema alternative Treibstoffe und Technologien, Senior Consultant Innovationsmanagement bei MTU Aero Engines AG in München, 06.06.2014

1.2 Verkehrslogistische Einflussfaktoren auf den Fahrzyklus von Nutzfahrzeugen

1.2.1 Gruppierung der Einflussfaktoren nach Settings

Für die Modellierung der Randbedingungen für den Dateninput zur Fahrzyklus-Simulation werden drei Settings (d.s. Bedingungsstrukturen, die Entscheidungen bis zur Realisierung von Gütertransporten beeinflussen) herangezogen, wie sie in der Vorgängerstudie „Friendly Supply Chains“ als Konzept ausführlich dargestellt worden sind (DÖRR, HÖRL, PÖCHTRAGER et al. 2010, 21 ff). Denn die Veränderungen, wie ein Trendwechsel im Verhalten der verladenden Wirtschaft oder neue Verkehrsregulierungen entlang der Transportwege oder die Inbetriebnahme neuer Verkehrsinfrastruktur, schlagen sich in der Wahl des Transportmittels und in der Charakteristik des Transportlaufes in den Verkehrsnetzen nieder. Bestimmend dabei ist das **Logistische Setting** der verladenden Wirtschaft und ihrer Kundschaft als Summe der Vorbedingungen, wie welche Gütermärkte bedient werden. Das **Infrastrukturelle Setting** beschreibt die Rahmenbedingungen, die die Verkehrsträgersysteme mit ihren Kapazitäten und Laufwegen (Netze, Knoten, Relationen) den transportierenden Operateuren anbieten. Schließlich konkretisieren sich im **Transportwirtschaftlichen Setting der Operateure** die Geschäftsbedingungen, zu denen, vor allem zu welchen Preiskonditionen und mit welchen Transportmitteln, Transportläufe durchgeführt werden (DÖRR, FRANK, 2007).

Darstellung 1-16: Verkehrslogistische Einflussgrößen auf den Fahrzyklus von Nutzfahrzeugen



Quelle: eigener Entwurf (IVS)

1.2.2 Einfluss exogener Faktoren des Infrastrukturellen Settings

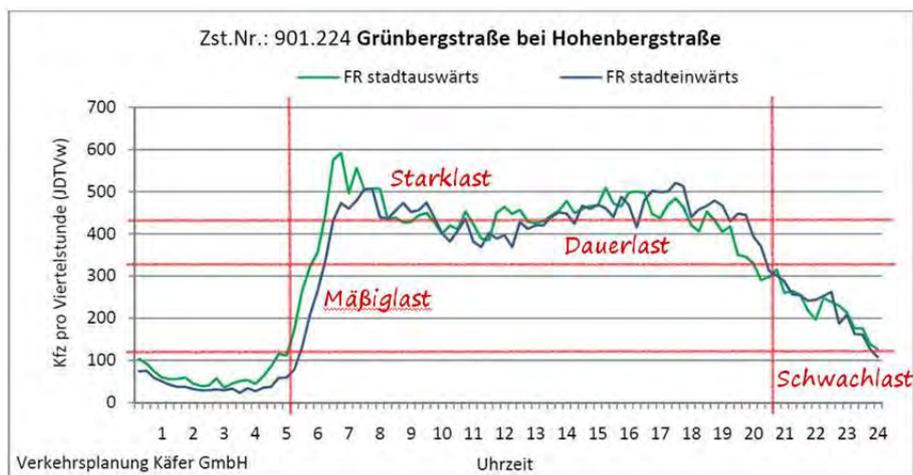
1.2.2.1 Methodischer Einstieg: Der Fahrweg als Schnittstelle

Als exogene Faktoren können alle Randbedingungen gelten, die weder von der Kundschaft noch von der Anbieterseite am Logistik- und Transportmarkt kurzfristig beeinflusst oder verändert werden können. Dazu zählen neben den vielen rechtlichen Vorschriften (Straßenverkehrsordnung, Wegegelder, Arbeitsrecht, Kfz-Recht u.a.m.) vor allem die konkreten **Befahrungs- und Benutzungsbedingungen der Verkehrswegeinfrastruktur**, die über den Ausbauzustand der Fahrwege, die Verkehrsorganisation der Fahrzeugströme und die Netzkonfiguration die Leistungsfähigkeit determinieren.

Durch die zeitliche Verteilung der Inanspruchnahme durch die verschiedenen Verkehrsteilnehmenden (z.B. Überlagerung von Berufspendel- und Wirtschaftsverkehren in den Morgenstunden, Paarigkeit oder Unpaarigkeit der Fahrtrichtungen) entstehen Belastungsbilder für Straßenabschnitte (Verkehrsstärken in Kfz/Zeiteinheit), die eine interpretative Ableitung der Verkehrsqualität, üblicherweise ausgedrückt in einer sechsstufigen Ordinalskala als **Level of Service (LoS) A bis F**, erlaubt. Der LoS stellt ein Maß für den Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit des Verkehrsstromes und der Verkehrsstärke (Kfz/Zeiteinheit) dar, mit dem Ergebnis, den „Freiheitsgrad“ im Fahrverhalten als Randbedingung (als ein exogener Faktor) zu beschreiben.

Aus den Tagesganglinien der automatischen Verkehrszählstellen (im 15-min-Intervall, also mit 96 Stichzeitpunkten in 24 h) lassen sich unter Bewertung des grundsätzlichen Kapazitätspotenzials aufgrund der Fahrwegcharakteristik (Straßenklassifizierung) annäherungsweise die Schwellenwerte für den Sprung zwischen den LoS-Klassen A bis F und die Zeiträume, für die sie zutreffen, ermitteln.

Darstellung 1-17: Zählquerschnitt mit Tagesgang der Verkehrsstärken an einer vierstreifigen Hauptstraße im Stadtgebiet



Quelle: Magistrat der Stadt Wien, Auswertung der Verkehrserhebung 2010

Aus dem Blickwinkel der Ansprüche des Straßengüterverkehrs bzw. der spezifischen Fahrweise der Nutzfahrzeuge im Straßenverkehr wurde das (aus den 1950er Jahren aus der Highway-Planung der USA übernommene) Level-of-Service-Konzept noch nicht thematisiert. Nicht zuletzt, weil das Datendargebot

(z.B. aus Verkehrszählungen) bislang in dieser Hinsicht zu undifferenziert ausgewertet wird oder die Datenlage zur Fahrdynamik der Nutzfahrzeuge unter realistischen Verkehrsbedingungen unzureichend geblieben ist. Der Zugang muss also über die Analyse und Interpretation der vorliegenden ziemlich dünnen Datenlage erfolgen, um in einer ersten Annäherung die Voraussetzungen für eine Verbesserung der künftigen Datenlage zu schaffen, indem die oben angeführten Aspekte in einer Inputdatenstruktur implementiert und quasi modelliert werden.

Diese Thematik steht daher in der ersten von den drei Phasen (Status-quo-Analyse, Feasibility-Analyse, Antizipationsanalyse) in der EFLOG-F&E-Dienstleistung im Mittelpunkt, weil zwischen den beteiligten Fachbereichen der Fahrweg sozusagen **als interdisziplinäre Schnittstelle** fungiert, an der die methodische Annäherung erfolgen muss.

1.2.2.2 Fahrwegspezifische Inputfaktoren für die Fahrdynamik

Ziel ist die Aufstellung einer Modellstruktur für die streckenspezifischen Inputfaktoren der Fahrdynamik seitens der Verkehrstopographie (Befahrbarkeit von Straßenabschnitten aufgrund der Trassierungscharakteristik), der Verkehrsregulierungen (Benutzungsbedingungen wie Schwerverkehrsbeschränkungen) und der regelmäßigen Verkehrszustände (zeitliche Schwankungen im Level of Service).

Tabelle 1-24: Inputfaktoren für die Fahrdynamik

INPUTFAKTOREN FÜR DIE FAHRDYNAMIK	EINGANG IN DIE MODELLSTRUKTUR ÜBER	QUELLE
Die maximale Fahrgeschwindigkeit, die an den einzelnen Abschnitten der zur Untersuchung herangezogenen Route gefahren wird.	die höchst zulässige Fahrgeschwindigkeit nach Straßenkategorien	Dörr, Hörl et al. (2012); S. 37
Die mittlere Fahrgeschwindigkeit, die an den einzelnen Abschnitten und über die gesamte Route hinweg gefahren wird.	die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit zum LoS (Level of Service) nach Straßenkategorien die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit nach Streckenabschnittslängen bzw. Segmentlängen	HCM (2000), S. 15-3 HCM (2000), S. 15-4
Das Höhenprofil, also die Abfolge und Ausprägung der Längsneigung, an der zur Untersuchung herangezogenen Route.	den Prozentwert der Längsneigung	
Die Anzahl von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen, die auf den Einfluss der zur Untersuchung herangezogenen Route zurückzuführen sind.	Keine mathematische Eingangsgröße definiert → Abschätzung muss näherungsweise erfolgen	
Die Dauer von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen, die auf den Einfluss der zur Untersuchung herangezogenen Route zurückzuführen sind.	Keine mathematische Eingangsgröße definiert → Abschätzung muss näherungsweise erfolgen	

Damit wird der Zweck verfolgt, anhand der Verschneidung streckenspezifischer und fahrzeugspezifischer Inputfaktoren der Fahrdynamik unterschiedliche Fahrzyklen simulieren zu können. Auf Basis dieser Simulation kann in Folge der Zusammenhang von eingesetzter Fahrzeugtechnologie und Routenausprägung vor allem im Bereich des im Hinblick auf Energieverbrauch und Luftschadstoffemissionen besonders heiklen innerstädtischen Lieferverkehrs abgeschätzt werden.

Als Inputfaktoren für die Fahrdynamik, welche auf die Einflüsse der Qualität und Ausstattung der Straßeninfrastruktur zurückzuführen sind, können folgende definiert werden:

(1) Maximale Fahrgeschwindigkeit

Die maximale Fahrgeschwindigkeit wird sowohl durch baulich-planerische Determinanten (wie der Lage im Siedlungsraum, den Kurvenradien, Sichtweiten, Querneigungen u.v.m.) als auch durch verkehrsregulatorische Eingriffe, also der gesetzlich festgelegten maximal zulässigen Fahrgeschwindigkeit je nach Straßenkategorie, bestimmt.

Tabelle 1-25: Straßenkategorien und deren maximale Lkw-Fahrgeschwindigkeiten

Straßenkategorie	Straßenzüge am Beispiel Wien	Lage im Siedlungsgefüge	Erlaubte Fahrgeschwindigkeit für Lkw in km/h
Hochleistungsstraße (Autobahn, Schnellstraße) im Stadtzulauf	A 21 (Außenring), A 2 (Süd), A 4 (Ost)	außerhalb	80
Hochleistungsstraße (Autobahn, Schnellstraße) als Außenring	S 1 (Südrand)	außerhalb	80
Stadtautobahn als Transversale	A 22 (Donauufer), A 23 (Südosttangente)	innerhalb	80
Überregionale Straße im Stadtzulauf	B 7 (Brünner Straße)	außerhalb	70
Innenstadtring	Gürtel (B 229)	innerhalb	50
Straßenzug als Transversale	Handelskai (B 14), Lände (B 227)	innerhalb	50
Straßenzug mit direkter Anbindung an eine Hochleistungsstraße	Triester Straße (B 17), Erdberger Lände (B 227)	innerhalb	50-70
Spange zu wichtigen Industriegebieten	Siemensstr. (B 229), Ketzergasse, Draschestraße, Oberlaaer Straße, Haidestraße (B 228)	innerhalb	50
Zulaufstraße oder Spange zu einem Bahnterminal oder Hafen	Dresdner Straße, Taborstraße, Freudenaauer Hafenstr. (B 14), Alberner Hafenzufahrtsstraße	innerhalb	50
Innerstädtischer Straßenzug mit vorrangiger Erschließungsfunktion	Hütteldorferstraße, Wiedner Hauptstraße, Ring	innerhalb	50
Innerstädtischer Straßenzug mit vorrangiger Aufenthaltsfunktion	Neubaugasse, Rotenturmstraße, Schleifmühlgasse	innerhalb	30-50
Innerstädtischer Straßenzug mit eingeschränkter Befahrbarkeit	Innere Mariahilferstraße,...	innerhalb	10-30

Quelle: Dörr, Hörl et al. 2012, 37

Anmerkung: Im Zuge dieser F&E-Dienstleistung wird davon ausgegangen, dass sich LenkerInnen von Kraftfahrzeugen gesetzeskonform verhalten und die zulässigen Fahrgeschwindigkeiten nicht überschreiten.

Im Zuge des Projektes Metro.Freight.2020 wurden, wie die Tabelle 1-25 zeigt, 12 Straßenkategorien definiert. Diesen Straßenkategorien wurden in Folge Beispiele für Wiener Straßenzüge, ihre Lage im Siedlungsgefüge und die maximal erlaubten Lkw-Fahrgeschwindigkeiten zugeordnet.

Das Highway Capacity Manual (HCM) aus dem Jahr 2000 definiert vier urbane Straßenkategorien, welche in erster Linie durch ihre Bereiche frei wählbarer Fahrgeschwindigkeiten (Range of free-flow speeds) zugeordnet werden (s. Tabelle 1-26).

Tabelle 1-26: Urbane Straßenkategorien nach dem Highway Capacity Manual 2000 und deren Bereich frei wählbarer Fahrgeschwindigkeiten

Urban Street Class	I	II	III	IV
Range of free-flow speeds (FFS)	90 to 70 km/h	70 to 55 km/h	55 to 50 km/h	55 to 40 km/h
Typical FFS	80 km/h	65 km/h	55 km/h	45 km/h

Quelle: Highway Capacity Manual (2000), 15-3

Zu beachten ist, dass es im HCM keine Aussage über die in der Bildung der Straßenkategorien bereits berücksichtigten baulich-planerischen Determinanten, wie beispielsweise die Lage im Siedlungsgefüge, Straßenraumnutzung abseits der Fahrbahn, Knotenpunktdichten, Kurvenradien, Sichtweiten, Querneigungen u.v.m., gibt. Es ist daher nicht möglich abzuschätzen, welche abmindernden Faktoren für die maximale bzw. auch mittlere Fahrgeschwindigkeit bereits berücksichtigt wurden bzw. welche noch zu berücksichtigen wären.

(2) Mittlere Fahrgeschwindigkeit

Die mittlere Fahrgeschwindigkeit ist die wesentlichste Eingangsgröße für die Modellstruktur und ist besonders stark von dem tageszeitlich unterschiedlichen Level of Service, also der Qualität des Verkehrsablaufes, abhängig. Der Zusammenhang des Level of Service und der gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten im städtischen Straßennetz lässt sich aufgrund der Tabelle 1-27 ablesen.

(3) Höhenprofil des Fahrweges

Ein weiterer streckenspezifischer Inputfaktor für die Fahrdynamik ist das Höhenprofil der zur Untersuchung herangezogenen Transportroute. Dieses wird über die Länge, Abfolge und Ausprägung der Längsneigungen je Streckenabschnitt entlang der Transportroute definiert.

Es wird angenommen, dass die in Längsrichtung stark steigenden Streckenabschnitte zu einem deutlichen Anstieg des Energieaufwands führen und damit den Ausstoß von Luftschadstoffen erhöhen. Wie stark dabei der Einfluss auf den Anstieg des Energieaufwandes ist, hängt von den fahrzeugspezifischen Inputfaktoren ab, die ebenfalls in die Modellstruktur einfließen und an anderer Stelle erläutert werden.

Tabelle 1-27: Zusammenhang des Levels of Service und gefahrener mittlerer Geschwindigkeiten im urbanen Straßennetz

Urban Street Class	I	II	III	IV
Range of free-flow speeds (FFS)	90 to 70 km/h	70 to 55 km/h	55 to 50 km/h	55 to 40 km/h
Typical FFS	80 km/h	65 km/h	55 km/h	45 km/h
LoS	Average Travel Speed (km/h)			
A	> 72	> 59	> 50	> 41
B	> 56-72	> 46-59	> 39-50	> 32-41
C	> 40-56	> 33-46	> 28-39	> 23-32
D	> 32-40	> 26-33	> 22-28	> 18-23
E	> 26-32	> 21-26	> 17-22	> 14-18
F	≤ 26	≤ 21	≤ 17	≤ 14

Quelle: Highway Capacity Manual 2000, 15-3

Tabelle 1-28: Zusammenhang der Längen von Streckenabschnitten (Kanten) und gefahrener mittlerer Geschwindigkeiten im urbanen Straßennetz

Urban Street Class	I			II			III		IV		
	90 ^a	80 ^a	70 ^a	70 ^a	65 ^a	55 ^a	55 ^a	50 ^a	55 ^a	50 ^a	40 ^a
Average Segment Length (m)	Running Time per Kilometer (s/km)										
100	b	b	b	b	b	b	-	-	-	129	159
200	b	b	b	b	b	b	88	91	97	99	125
400	59	63	67	66	68	75	75	78	77	81	96
600	52	55	61	60	61	67	d	d	d	d	d
800	45	49	57	56	58	65	d	d	d	d	d
1000	44	48	56	55	57	65	d	d	d	d	d
1200	43	47	54	54	57	65	d	d	d	d	d
1400	41	46	53	53	56	65	d	d	d	d	d
1600	40 ^c	45 ^c	51 ^c	51 ^c	55 ^c	65 ^c	d	d	d	d	d

Notes:

a. It is best to have an estimate of FFS. If there is none, use the table above, assuming the following default values:

For Class	FFS (km/h)
I	80
II	65
III	55
IV	45

b. If a Class I or II urban street has a segment length less than 400 m, (a) reevaluate the class and (b) if it remains a distinct segment, use the values for 400 m.

c. For long segment lengths on Class I or II urban streets (1600 m or longer), FFS may be used to compute running time per kilometer. These times are shown in the entries for a 1600-m segment.

d. Likewise, Class III or IV urban streets with segment lengths greater than 400 m should first be reevaluated (i.e., the classification should be confirmed). If necessary, the values above 400 m can be extrapolated.

Although this table does not show it, segment running time depends on traffic flow rates; however, the dependence of intersection delay on traffic flow rate is greater and dominates in the computation of travel speed.

Quelle: Highway Capacity Manual 2000, 15-4

(4) Anzahl von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen

Für die Ermittlung der Anzahl der Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge entlang einer Transportroute spielen fahrzeugspezifische, fahrerspezifische und streckenspezifische Inputfaktoren eine Rolle. Die Berücksichtigung des streckenspezifischen Inputfaktors Anzahl von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen fand in der Literatur bisher noch nicht statt. Oftmals werden vor allem die Leistungsfähigkeiten der Knotenpunkte selbst als limitierende Faktoren angenommen, dies ist jedoch für die hier zugrunde liegende Frage nicht ausreichend.

Es wurde bisher noch keine mathematische Eingangsgröße für diesen streckenspezifischen Inputfaktor definiert. Näherungsweise könnte man jedoch versuchen, folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- Im Bereich Straßenraumbedingungen:
 - Straßenraumbedingungen abseits der Fahrbahn (Anzahl der Querungshilfen, Raumnutzung abseits der Fahrbahn, Dichte von Hauseinfahrten bzw. Parkplatzeinfahrten, Anzahl der Points of Interest u.v.m.)
 - Knotenpunktdichte
- Im Bereich Leistungsfähigkeit der Knotenpunkte:
 - Anzahl der Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge am Knotenpunkt und
 - Verkehrsstärke und Auslastung der Straßeninfrastruktur

(5) Dauer von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen

Für die Ermittlung der Dauer der Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge spielen vor allem fahrzeugspezifische, fahrerspezifische und streckenspezifische Inputfaktoren eine Rolle. Die Berücksichtigung dieses streckenspezifischen Inputfaktors fand, wie auch der Faktor Anzahl der Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge, in der Literatur bisher noch nicht statt.

Daher wurde bisher auch für diesen streckenspezifischen Inputfaktor noch keine mathematische Eingangsgröße definiert. Näherungsweise könnte man jedoch versuchen folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- Schwerverkehrsanteil und
- Längsneigung und Länge der Steigungsstrecken entlang der Transportroute

1.2.3 Einfluss externer Faktoren des Logistischen Settings

Das Logistische Setting beinhaltet Einflussfaktoren, die von der jeweiligen KundInnenseite der Supply Chain eingefordert werden und denen von den Logistik- und Transportunternehmen zur Gewährleistung der KundInnenzufriedenheit angebotsseitig nachgekommen wird. Das kann vor allem die **Lieferzeitfenster** betreffen, wie Just-in-time oder Just-in-sequence, aber auch den Einsatz bestimmter Fahrzeuge und Ladungsträger. Grundsätzlich sind diese „externen“ Faktoren zwar Verhandlungssache, aber der/die KundIn ist bekanntlich in diesem Wechselspiel auf einem hochkompetitiven Markt der/die „KönigIn“.

-
- Die Lieferzeitfenster ergeben sich aus den logistischen Anforderungen der Nahversorgung (Warensegmente nach Konsumnachfrage, Dringlichkeit und Lagerreichweite) in den Lieferbezirken und der Zugänglichkeit im lokalen Straßennetz (falls Lieferzeitfenster wie in Fußgängerzonen gegeben sind oder das Anfahren und Halten in den Hauptlastzeiten des Verkehrsaufkommens schwierig sind).
 - Logistikbedingte Stillstände dienen zur Abladung der Waren bzw. Mitnahme von Gütern der Retrologistik (wie Leergebinde), wie an den **Points of Sale**, sowie zur Sammlung von Wertstoffen an den **Points of Recycling**.
 - Frischware im Lebensmittelbereich erfordert meist eine Anlieferung vor der Frühverkehrsspitze und vor der Geschäftsöffnungszeit. Trockenware oder Getränke können flexibel und müssen auch nicht werktäglich angeliefert werden, wenn der Point of Sale eine gewisse Lagerkapazität frei hat.
 - Ähnliches gilt für die Warenversorgung für den häufigen Konsumbedarf, wie zum Papier- und Drogeriefachhandel. Man könnte also davon ausgehen, dass der Morgenverkehrsspitze vom Güterverkehrsverkehr möglichst aus dem Wege gegangen wird. Allerdings zeigen die Tagesganglinien bei städtischen Hauptverkehrsstraßen, dass heutzutage auch schon eine starke Dauerbelastung außerhalb der zwischen 5:30 h und 8:30 h auftretenden Morgenverkehrsspitze stattfindet, die bei ungefähr 80 % der Spitzenbelastung zu liegen kommt (vgl. Darstellung 1-17). Das lässt sich aus den Tagesganglinien der Verkehrsstärken (jahresdurchschnittlicher werktäglicher Verkehr in Kfz/24h = DTVw) für maßgebliche Radial- und Tangentialstraßen im Stadtgebiet von Wien herauslesen (KÄFER, 2011).
 - Nicht zu vernachlässigen sind aber auch Gütertransporte der Materialbeschaffungslogistik sowie der Auslieferung von Fertigwaren oder Vorprodukten zu den oder von den Standorten der gütererzeugenden Wirtschaft, die durchaus als **Points of Manufacturing** noch auf „Traditionsstandorten“ in den Kernstädten angesiedelt sein können (z.B. eine innerstädtisch gelegene Brauerei, wie es welche in Wien oder Salzburg gibt). Diese beliefern entweder einen Heimmarkt im regionalen Umkreis direkt im Werksverkehr oder über die Logistiklager des Großhandels (Points of Wholesalers), die wiederum die Feinverteilung vor allem im Konsumgütersegment (z.B. Lebensmitteleinzelhandel LEH) besorgen. Beliefern sie aber Exportmärkte werden häufig Umschlagterminals für ihre Warenexporte frequentiert, wobei sie sich meist der Speditionen bedienen.
 - Schließlich werden die kleinen Nutzfahrzeugtypen (N₁, kleinere N₂) vor allem von den Kurier-, Express- und Paketdiensten (KEP) eingesetzt, weil ihre Anlieferstationen sehr unterschiedliche Anfahrsituationen aufweisen und die Zustelladressen (**Points of Delivery**), meist KMUs oder private Haushalte, nicht nur dispers verteilt sind, sondern sich auch täglich die Route im Lieferbezirk variabel gestaltet. Das heißt, auf der Ebene z.B. eines größeren Stadtteiles oder -sektors (eine Verkehrszelle i für das Quellgebiet und eine Verkehrszelle j für das Zielgebiet einer Transportrelation) kann mit einer gewissen statistischen Wahrscheinlichkeit mit einem bestimmten Sendungsaufkommen gerechnet werden, aber auf der Ebene eines kleineren Stadtquartiers oder eines Baublockes können erhebliche tageweise Schwankungen auftreten.

1.2.4 Einfluss interner Faktoren des Transportwirtschaftlichen Settings

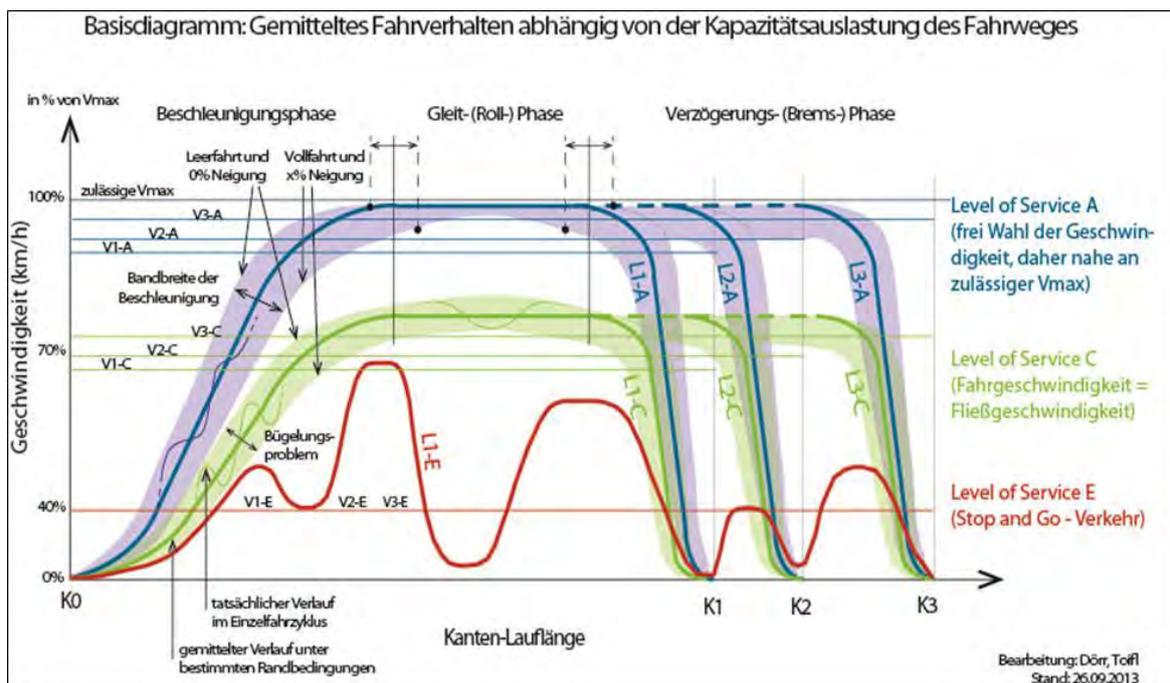
Darunter fallen die Routenwahl zur Bedienung des Transportlaufes, der Fahrzeugeinsatz und allenfalls die Bündelung von Warentransporten verschiedener EmpfängerInnen in der gleichen Relation, wie es vor allem Speditionen vornehmen. Vorgeschaltet dem Flottenmanagement ist die technologische Auswahl und der Modell-Mix bei der Anschaffung der Fahrzeuge und darauf abgestimmt das Einsatzangebot an die verladende Wirtschaft im fuhrgewerblichen Verkehr oder im innerbetrieblichen Werksverkehr. Diese Thematik zu ergründen, gehört zur Kernaufgabe der EFLOG-F&E-Dienstleistung.

1.2.5 Faktoren zu den Befahrungsbedingungen der Verkehrsinfrastruktur

1.2.5.1 Annahmen zur Fahrdynamik in einem Basisdiagramm

Die Entfaltung der Fahrdynamik eines Nutzfahrzeuges (Nfz) entlang einer Kante des Fahrweges in Abhängigkeit von den exogenen Faktoren der Befahrungsbedingungen gliedert sich in folgende drei Phasen, die in einem Basis-Diagramm, grob angelehnt an die ARTEMIS-Fahrzyklen für Pkw (INRETS, 2004), dargestellt werden (s. Darstellung 1-18).

Darstellung 1-18: Eingangs-Hypothese zum Fahrverhalten bei unterschiedlicher Kapazitätsauslastung des Fahrweges



Quelle: eigene Darstellung (arp)

- Die „**Beschleunigungsphase**“ beschreibt die Annäherung an die vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit (v_{max}) im Straßenabschnitt (= Kante) oder ist determiniert durch den akuten Verkehrsfluss. Der Gradient des Geschwindigkeitsanstieges hängt hauptsächlich von den Neigungsverhältnissen des Fahrweges und vom Level of Service (LoS = Verkehrszustand) ab.

- Die „**Gleitphase**“ beschreibt das annähernd gleichmäßige Fahren ohne straßenbedingte Änderungen der Befahrungsbedingungen und einem akuten Verkehrszustand, der bei günstigem Level of Service kein abruptes Fahrverhalten herausfordert. Dieses Fahrverhalten orientiert sich an der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) oder an der Abstandhaltung zu den voranfahrenden Fahrzeugen.
- Die „**Verzögerungsphase**“ beschreibt die Annäherung entweder an einen straßennetzbedingten Stillstand von mehr als 12 Sekunden Andauer (wird hier als Schwellenwert zu den verkehrsbedingten Stillständen angenommen, die der „Gleitphase“ zuzuordnen sind) im Verkehrsfluss, z.B. an kompliziert befahrbaren verkehrslichtsignal-geregelten Straßenkreuzungen (im Niveau), oder an logistikbedingte Stillstände zur Abladung der Waren bzw. Mitnahme von Gütern an Liefer-Stationen.

1.2.5.2 Annahmen zur Fahrgeschwindigkeit im Verkehrsfluss

Ohne noch den Einfluss von Leistungsdaten des Fahrzeugantriebes in seiner Wechselwirkung mit den Neigungsverhältnissen des Fahrweges und den Beladungssituationen am Nutzfahrzeug zu kennen, müssen in einem ersten Ansatz die Fahrgeschwindigkeiten postuliert werden. Das gelingt für Fahrten in Ballungsräumen vermutlich recht gut, da dort die Geschwindigkeitsbeschränkungen für den gesamten Verkehrsfluss übermächtig sind und die anderen Einflüsse auf die Fahrdynamik dadurch relativiert werden. Daher wurden als erste Testrouten auch Fahrwege innerhalb des Ballungsraumes Wien ausgewählt, um sich an die Aufgabenstellung heranzutasten und außerdem einfache Verifizierungsmöglichkeiten entlang der Route, wie Fahrzeugverfolgung oder stationäre Querschnittsbeobachtungen, vornehmen zu können.

- Die Höchstgeschwindigkeiten ergeben sich für Fernverkehrswege im Überlandverkehr mit 80 km/h, für Verkehrsstraßen im Freilandverkehr zwischen Siedlungsgebieten mit 70 km/h, für Verkehrs- und Sammelstraßen im Innerortsverkehr mit 50 km/h und für das Erschließungsnetz auf der Letzten Meile mit 30 km/h, sofern nicht eine hochrangige Anbindung der Lieferstandorte gegeben ist (45 km/h).
- Die Fahrgeschwindigkeiten werden je nach Tageszeitfenster der Tour und dem daher erwartbaren Level of Service entsprechend herabgesetzt festgelegt, wobei für die spezifische Fahrdynamik von Nutzfahrzeugen drei Stufen ($A+B=A^*$, $C+D=C^*$ und $E+F=E^*$) zunächst ausreichend erscheinen:
 - Bei LoS-A* kann die zulässige v_{\max} (mit geringem Abschlag, z.B. von 80 auf 75 km/h) angenommen werden. Die Fahrgeschwindigkeit bei LoS-A* wird durch die positive Längsneigung des Fahrweges (Steigung) und die Beladungssituation (Nutzlastauslastung) des Nfz abgesenkt. Bei negativer Längsneigung (Gefälle) sind die Verkehrsvorschriften einzuhalten, diese bleibt daher jedenfalls auf die zulässige v_{\max} begrenzt.
 - Bei LoS-C* wird eine um rund 30 % reduzierte mittlere Fahrgeschwindigkeit angenommen (von 80 auf 65 km/h bei Fernverkehrswegen, von 70 auf 49 km/h bei Verkehrsstraßen im Freilandverkehr, von 50 km/h auf 35 km/h im Innerortsverkehr bzw. von 30 km/h auf 21 km/h im innerstädtischen Erschließungsnetz). Die Fahrgeschwindigkeit bei LoS-C* wird zwar durch die positive Neigung des Fahrweges abgemindert, sodass der Nfz-Verkehr entweder die Fließgeschwindigkeit des gesamten Verkehrsstromes abmindert oder aber es gibt aufgrund eines zusätzlichen Fahrstreifens für langsamere Kfz („Kriechspur“) eine Entflechtung der

Verkehre auf zwei Fließgeschwindigkeiten bzw. eine Gabelung der Verkehrsströme in einem neuralgischen Straßenabschnitt.

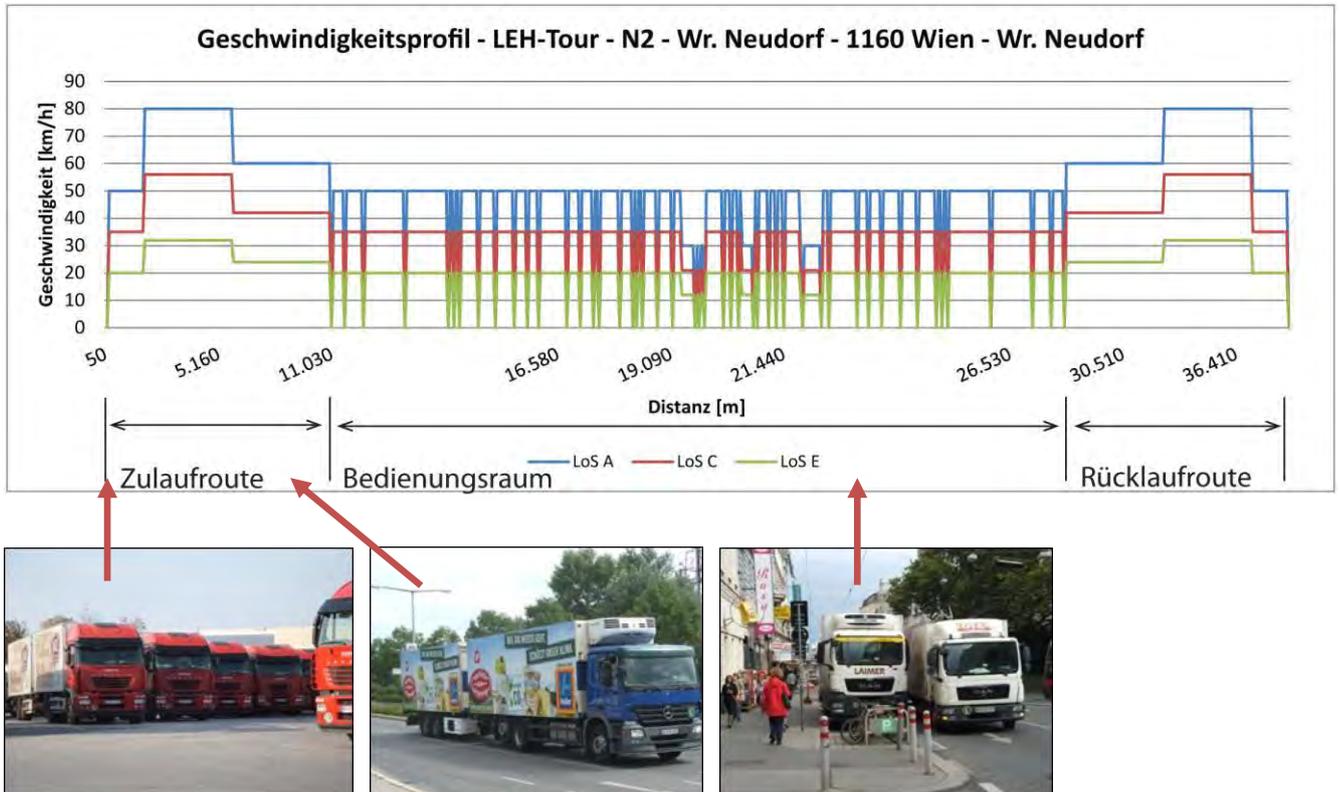
- Bei LoS-E* im Stop-and-Go-Verkehr wird von einer um 60 % herabgesetzten mittleren Fließgeschwindigkeit ausgegangen (von 80 auf 32 km/h am Fernverkehrsweg, von 70 auf 28 km/h bei Verkehrsstraßen im Freiland, von 50 auf 20 km/h bei Verkehrs- und Sammelstraßen innerorts sowie von 30 auf 12 km/h bei Erschließungsstraßen, wenn diese z.B. von anderen Liefer- und Sammelfahrzeugen oder vom Stellplatzsuchverkehr schon dicht belegt sind). Allenfalls können noch zu Fuß Gehende dem Fließverkehr in die Quere kommen, wie in der Umgebung von Fußgängerzonen. Müssen diese in einem Lieferzeitfenster befahren werden, gilt die Schrittgeschwindigkeit.
- Es sind im Wesentlichen zwei Komponenten, die auf das Fahrverhalten, ausgedrückt durch die Fahrgeschwindigkeit, einwirken. Es ist erstens die **Leistungsfähigkeit (Kapazität im Verkehrsnetz)** des Fahrweges zur Bewältigung des im Zeitgang unterschiedlichen Verkehrsaufkommens aufgrund seiner baulichen Gegebenheiten (insbesondere die Anzahl der Fahrstreifen und die Anlage der plangleichen Knoten). Sie bestimmt die maximal mögliche Verkehrsmenge je Zeiteinheit, die im kontinuierlichen Verkehrsfluss an einem Zählquerschnitt abgeführt werden kann. Diese maximale Verkehrsmenge ist bei deutlich reduzierter Fließgeschwindigkeit des Verkehrsstromes etwa bei LoS-C* bis -E* angesiedelt. Zweitens sind es die **Leistungsparameter des Nutzfahrzeuges**. Da der Güterverkehr, je schwerer die Nutzfahrzeuge sind, zu diesem Level of Service C* bis E* wesentlich affiner ist als der Pkw-Verkehr, heißt das, dass dort vermutlich der optimale Bereich der Fahrdynamik für Nutzfahrzeuge in Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch zu liegen kommen wird.

Um die Auswirkungen der Einflussfaktoren besser miteinander vergleichen zu können, wurde der erste Simulationsdurchgang einfach gehalten, indem mit jeweils gleichbleibendem Level of Service gerechnet wurde. Damit kann der Kraftstoffverbrauch bei unterschiedlichen Levels of Service oder der Einfluss der Längsneigung des Fahrweges miteinander verglichen werden. Daher werden im ersten Simulationsdurchgang die drei Mustertransportläufe separat mit drei Levels of Service (LoS-A*, LoS-C* und LoS-E*) simuliert.

1.2.5.3 Zur Interpretation des Basis-Diagramms

LoS-A* (x = ein Kantenzug im Fahrweg eines Transportlaufes) entspricht den Schwachbelastungszeiten im Tagesgang der Verkehrsstärken, wie sie sich in den Tagesganglinien der Dauerzählstellen anhand der 15-Min-Intervalle gut eingrenzen lassen. Die Einschätzung, in welchen Zeitabschnitten der Tagesganglinie ein LoS-A* mit freier Geschwindigkeitswahl (abgesehen von generellen oder lokalen Beschränkungen nach der Straßenverkehrsordnung, StVO) gegeben ist, hängt von der Bewertung der Leistungsfähigkeit des Fahrweges einer Kante bzw. eines Kantenzuges ab, die sich aus der Ausstattung (im Wesentlichen die Streifigkeit der Fahrbahn sowie die Dichte und Ausgestaltung der Knotenpunkte) und der Topographie der Trassenführung ableitet, wobei eine exakte Bestimmung der Kapazität jedoch nicht möglich ist, weil auch die erwünschte Qualität des Verkehrs (verkehrs- und umweltpolitische Ziele) ins Kalkül zu ziehen ist.

Darstellung 1-19: Angenommene Abminderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach Level of Service



Quelle: eigene Darstellung (arp)
Bilder: eigene Aufnahmen (arp)

Bei LoS-A*(x) wird die Amplitude um die v-Regressionskurve vor allem von den Neigungsverhältnissen und im Überlandverkehr von der Kurvigkeit des Fahrweges (und allenfalls vom Straßenerhaltungszustand) beeinflusst. Die Amplituden sind im Falle des LoS-A* vergleichsweise in der Gleit-(Roll-)Phase nur mäßig ausschlagend und in der Beschleunigungs- sowie in der Verzögerungs-(Brems-)Phase vor dem nächsten Fahrzeugstillstand eher gering ausgeprägt.

Bei LoS-C*(x) kumulieren sich die Einflussfaktoren der Verkehrstopographie (wenn maßgebliche Längsneigungen gegeben sind) und die des Verkehrszustandes im Verkehrsfluss. Das wirkt sich im Überlandverkehr aber stärker aus als in den Straßennetzen der Ballungsräume, wo der Verkehrszustand der Dauerbelastung hauptsächlich wirksam ist. Außerdem begrenzt die Ortsgeschwindigkeit von 50 km/h für alle Fahrzeuge ohnehin das freie Fahrverhalten, sodass sich schon deswegen ein annähernd vereinheitlichter Verkehrsfluss über alle Kfz einstellt.

Verteilt sich ein Transportlauf über einen gewissen Zeitraum, innerhalb dessen üblicherweise ein Sprung im LoS(x+y) nach oben (bis A) oder unten (bis F) zu erwarten ist, wie es vor und nach der Frühverkehrsspitze der Fall ist, dann kann sich der diesbezügliche Kantenzug (x+y) aufspalten, um Synchronität mit den zeitabhängigen Verkehrszuständen im Verlauf des Fahrweges des Transportlaufes

herzustellen. So kann es etwa sein, dass die Anfahrt mit voller Beladung in den Bedienraum (Lieferbezirk) unter den Bedingungen von LoS-C*(x) z.B. in der Mittagsdelle des Verkehrsaufkommens stattfindet, nach Abschluss der Verteiltour (z.B. am Nachmittag) die Rückfahrt als Leerfahrt (z.B. in der Frühabendspitze) aber unter den Bedingungen von LoS-E*(y) absolviert wird.

Dementsprechend würde in einem Basisdiagramm eines solchen Kantenzuges der Tour an einem Knoten, wo z.B. die Abschichtung der Ladung beendet ist, ein Wechsel von der grünen zur roten Kurve stattfinden, wenn die transportwirtschaftliche Tourenplanung dahingehend kalkuliert worden ist („besser im Stau stehen, wenn das Nutzfahrzeug leer ist, als wenn es voll ist und die Kundschaft auf die Lieferung warten muss“).

Quellenhinweise zu Kapitel 1.2:

DÖRR, H.; FRANK, S. (2007): Gewandelte Bedingungen für die Allokation von Transportläufen im Verkehrssystem. In: H. WOLF-KLUTHAUSEN (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2007. S. 42-48. Korschbroich

DÖRR, H.; HÖRL, B.; PÖCHTRAGER, S. (2010): Friendly Supply Chains. Indikatorenkonzept für die verkehrsträgerübergreifende Bewertung von Transportketten am Beispiel der Supply Chains zu den NST/R-Gütergruppen Wein, Bier, Fruchtsaft und Milchprodukte. Endbericht zur Studie im Rahmen des izv-Forschungsprogrammes des BMVIT. IVS-Schriften Band 35. Wien

HÖRL, B.; DÖRR, H. et al. (2012): Metro.Freight.2020. Transportmittelauswahl für die mittelbetriebliche Wirtschaft. Strategie zur Stärkung und effizienten Nutzung der Schieneninfrastruktur in Ballungsräumen. Studie im Rahmen des Forschungs- und Technologieprogrammes izvs-plus herausgegeben vom BMVIT. Wien

HIGHWAY CAPACITY MANUAL (2000 resp. 2010): 4th resp. 5th Edition by the TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES. Washington

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS ET LEUR SECURITE (INRETS) (2004): Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles. ARTEMIS - Assessment and reliability of transport emission models and inventory systems. Report INRETS. Paris

KÄFER (2011): Straßenverkehrszählung Wien 2010 – Auswertung Gemeindestraßen A + B. Wien: MA 18.

KLEMMER, J. (2011): Datengrundlagen im Güterverkehr – Neue Chancen durch die Nutzung von Floating-Car-Data. In: U. CLAUSEN (Hrsg.): Wirtschaftsverkehr 2011. Modelle – Strategien – Nachhaltigkeit. Reihe Logistik, Verkehr und Umwelt. S. 25-38

KLOESS, M.; PRENNINGER, P.; HUSS, A.; KÖNIGHOFER, K.; CANELLA, L.; HAAS, R. (2012): NANUPOT-Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050. Studie im Rahmen des Forschungs- und Technologieprogrammes izvs-plus des BMVIT. Wien

MOLITOR, K.; BOLTZE, M. (2014): Grundlagen für die Beurteilung zeitlicher Verlagerungspotenziale im Güterverkehr. In HEUREKA 2014. Optimierung in Verkehr und Transport. Tagungsdokumentation herausgegeben von der FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR DAS STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN e.V (FGSV) 002/106. S. 256-274. Köln

NATIONAL COOPERATIVE FREIGHT RESEARCH PROGRAM (NCFRP) (2014): Making Trucks Count. Innovative Strategies for Obtaining Comprehensive Truck Activity Data. Edited by TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES. Washington

1.3 Annahmen zu den Mustertransportläufen für die erste Fahrzyklen-Simulation

1.3.1 Das Instrument der Fahrzyklus-Simulation

1.3.1.1 Zweck und Ergebnisse einer Fahrzyklus-Simulation

Die Simulation von Fahrzyklen verfolgt den Zweck, Erkenntnisse über den Energie- bzw. Kraftstoff-Verbrauch (unmittelbar) und den Emissionsausstoß (mittelbar) für - in diesem Fall verkehrslogistische - Einsatz-Szenarien von Fahrzeugbewegungen unter bestimmten vielfältigen Lastanforderungen an den Antriebsstrang zu gewinnen. Die Abfolge von Lastanforderungen an den Antrieb eines Fahrzyklus wird entweder auf einen Motorprüfstand oder auf einen Fahrzeug-Rollenprüfstand übertragen. Denn die Fahrzeugindustrie ist auf die Prüfung von Komponenten und deren Zusammenwirken als Aggregate fokussiert.

Je näher die Fahrzyklus-Simulation an die realen Bedingungen des Straßenverkehrs herankommt, desto komplexer in der Interpretation und im Wirkungsmechanismus schwerer nachvollziehbar werden die errechneten Ergebnisse in Hinblick auf die Zielgrößen Energieverbrauch und Emissionen. Das liegt daran, dass in den grundlegenden Algorithmen der thermischen Vorgänge im Motor und der mechanischen (Schalt-)Vorgänge im Getriebe Optimierungen hinterlegt sind, die auf die externen Änderungen der Fahrcharakteristik aufgrund der Beschaffenheit der Verkehrswege und der Abläufe im Verkehrsgeschehen ausgleichend wirken, womit die Einflussmächtigkeit dieser äußeren Faktoren auf die Fahrzeugbewegung in gewissem Maße geglättet wird. Dadurch wird in der Simulation auch das menschliche Fahrverhalten relativiert, d.h. tendenziell idealisiert.

Dem können Messfahrten unter realen Bedingungen entgegengehalten werden, die aber nicht nur die Zielgrößen erfassen, sondern auch die Fülle der exogenen (z.B. Fahrbahnbeschaffenheit) und externen (z.B. Verkehrsfluss) sowie der internen (wie Eigenheiten des Nutzfahrzeuges) Einflussgrößen in ihrer noch dazu kontinuierlichen oder phasenweisen Veränderung aufzeichnen müssten. Die internen Einflussgrößen umfassen in einer Faktorengruppe die variierten verkehrslogistischen Bedingungen des Fahrzeug-einsatzes, wie Beladungsfaktor und Tourenplanung, und darin die „innerste“ Faktorengruppe der dem jeweiligen Nutzfahrzeugmuster innewohnenden technologischen Eigenschaften, die eine typische Fahrzeugkinematik (wie Beschleunigungs- und Bremswerte, Kraftstoffverbrauch, Schaltprogramm) nach sich ziehen.

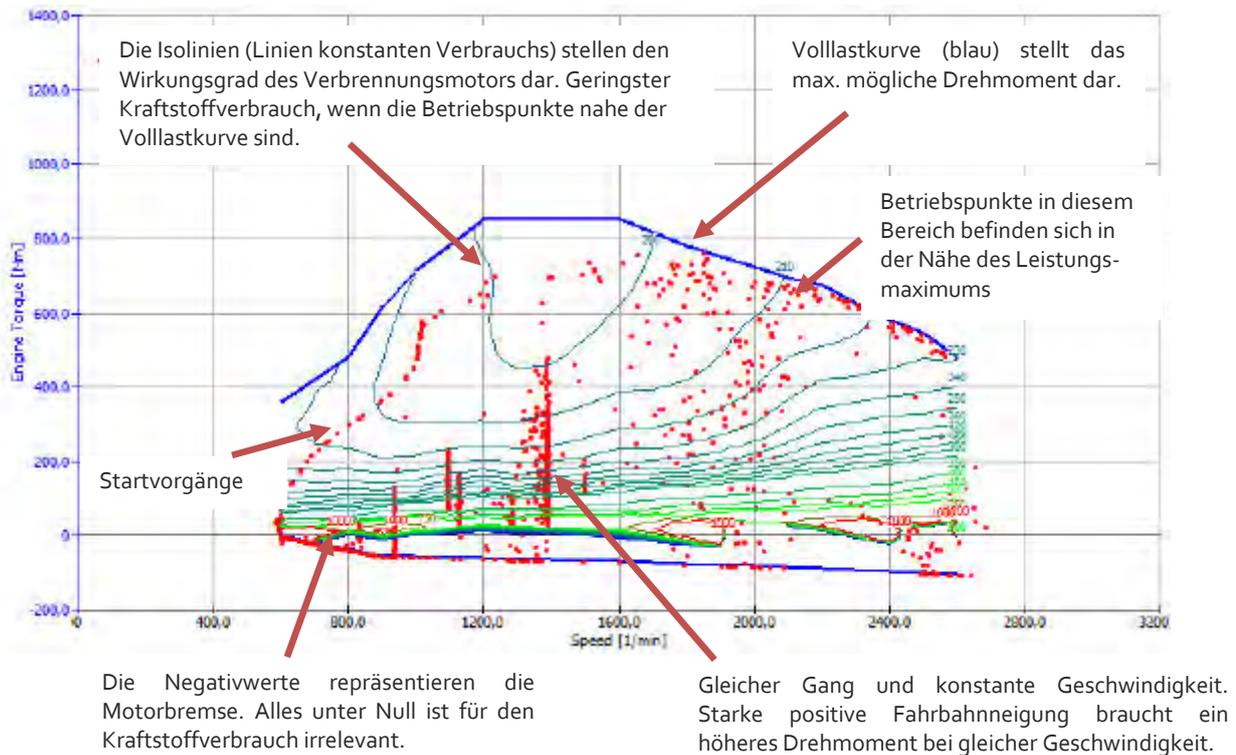
1.3.1.2 Visualisierung im Motorkennfeld

Ein Ergebnis einer Fahrzyklen-Simulation kann graphisch in einem Motorkennfeld dargestellt werden (VAN BASSHUYSEN, SCHÄFER, 2010, 27). In einem solchen Diagramm sind Betriebspunkte eingetragen, wie in Darstellung 1-20, wobei auf der X-Achse die Drehzahl des Motors (Umdrehungen pro Min.) skaliert ist, die die momentane Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Getriebeübersetzung wiedergibt, und auf der Y-Achse das Drehmoment in Newtonmeter (Nm), die der Motor aufgrund der momentanen Lastanforderung abgibt.

Begrenzt wird das jeweilige Motorkennfeld durch den Drehzahlbereich (Minimum links, Maximum rechts) auf der X-Achse und die (blaue) einhüllende Volllastkurve, die das maximal mögliche Drehmoment bei

einer bestimmten Drehzahl angibt. Innerhalb dieses Leistungsbereiches sind im dargestellten Motorkennfeld die (grünen) Isolinien gleichen Kraftstoffverbrauches (auch als Muschelkurven bezeichnet) eingetragen, wobei der Kraftstoffverbrauch am besten ist, wenn sich die (roten) Betriebspunkte nahe an der (blauen) Grenze des maximalen Drehmoments befinden.

Darstellung 1-20: Motorenverhalten (dargestellt im spezifischen Motorkennfeld) im Fahrzyklus



Quelle: AVL (dargestelltes Beispiel N₂-Tour gerechnet für EFLOG mit AVL-CRUISE, s. Kapitel 1.4.2.3)

Diese Betriebspunkte werden im Simulationstool auf der Basis der Triebstrang- und Fahrzeugspezifikation sowie der zugrundegelegten Fahrgeschwindigkeit berechnet. In der zweidimensionalen Grafik liegt eine Vielzahl von Punkten aus verschiedenen Phasen des Fahrzyklus übereinander, da sich gleiche Fahrzustände im betrachteten Fahrzyklus regelmäßig wiederholen.

1.3.1.3 Möglichkeiten der Interpretation und Instrumentalisierung

Aus der Anordnung der Betriebspunkte im Kennfeld als „Punkt-Wolken oder -Kurven“ sollten sich gewisse Rückschlüsse ziehen lassen, die es erlauben sollen, die errechneten Effekte ursächlich zu erklären. Deren Interpretation erlangen vor allem im Vergleich von Simulationsthroughgängen unter Dokumentation der Veränderungen der Randbedingungen *ceteris paribus* (z.B. gleiches Fahrzeug, gleiche Route, anderes Zeitfenster oder gleiches Fahrzeug mit anderer Antriebsvariante, gleiche Route, gleiches Zeitfenster usw.) Aussagekraft, damit die Hebel für Verbesserungen erkennbar werden. Die Hauptergebnisse sind jedoch die errechneten Energieverbrauchs- und Emissionswerte, die zeigen, ob sich Maßnahmen am Fahrzeug,

an der Logistikorganisation oder im Verkehrsmanagement nennenswert auswirken und sich dadurch rechtfertigen lassen. Zum Beispiel derart:

Ob die Systemauslegung des Antriebes für den simulierten Einsatzzweck angemessen ist („Narrow Band Engine, Bestpunkt-Prinzip“ als Eingrenzung des Drehzahl- und Drehmomentbereiches auf jenen Leistungsbereich, der für einen bestimmten Einsatzzweck weitgehend ausreicht) oder, ob eine ungünstige Clusterung von Betriebspunkten im Bereich hohen Kraftstoffverbrauches nahe der X-Achse in Richtung blauer Linie durch nachfolgende Maßnahmen verschoben werden kann, wie durch:

- Maßnahmen der **logistischen Routenplanung** (z.B. durch Änderung der Abfolge der Anlieferstationen, Anpassung des Lieferzeitfensters zugunsten verkehrsschwacher Zeiten)
- Einsatz des zum Einsatzzweck kompatibelsten Fahrzeugmusters in der Fuhrparkdisposition (z.B. Ersatz eines Nutzfahrzeugmodells durch Hybrid-Varianten, Fahrpersonalschulung u.a.)
- steuernde Eingriffe des **exogenen Verkehrsmanagements** (Verkehrsflussoptimierung bei Verkehrslichtsignalanlagen, Vermeidung von Linksabbiegerelationen im Laufweg etc.)
- Auflfassung von umständlich zu bedienenden **Anliefer- bzw. Warenladestationen** (z.B. in Innenstädten mit hoher Dichte von Lieferstationen und hoher Lieferfrequenz) durch Warenhandelsketten. Darunter kann aber, wie eingangs (Kap. 1.1.1) ausgeführt wurde, die Nahversorgungsqualität für die Bevölkerung leiden oder es werden produzierende Betriebe so ins Umland abgedrängt.

Die Interpretation bedarf der Hinterlegung mit Erkenntniszielen, an denen Optimierungen antriebsseitig (im Regelfall der Anwendung), fahrzeugeinsatzseitig (also z.B. für bestimmte logistische Szenarien, was noch kaum erprobt ist) oder verkehrsseitig (z.B. durch Maßnahmen in der Verkehrsinfrastruktur und in der Verkehrsflusssteuerung) ansetzen sollen.

Auf diese Weise könnte das Tool Fahrzyklus-Simulation neben seiner Kernfunktion in der Kfz-Technologieforschung für folgende Zwecke ein Bewertungsinstrument sein:

Zum **Controlling** eines transportwirtschaftlichen Produktionskonzeptes (z.B. für Fahrzeugflotten, um das passende Fahrzeugmuster für eine gegebene Logistikaufgabe und -organisation zu eruieren)

Zum **Monitoring** für das öffentliche Verkehrsmanagement zur Bewältigung von Verkehrsproblemen (z.B. Lkw-Führungskonzept für eine gegebene Verkehrsinfrastruktur und übliche Relationen)

Zur **Systemabstimmung** von Verkehrszonen-Konzepten mit Güterversorgungsstrategien (gestufte emissionsabhängige Verkehrsregulierung bei knappem Verkehrsflächenangebot)

1.3.1.4 Generelle Randbedingungen der Fahrzeugsimulation

In der Fahrzeugsimulation werden repräsentative Fahrzeuge bezüglich ihrer längsdynamischen Eigenschaften mathematisch abgebildet und entlang virtueller Teststrecken gefahren / simuliert. Zu den Teststrecken gehören Geschwindigkeits- und Höhenprofile, die in der Simulation als Randbedingung (oder Zielwerte) fungieren, und so unter Berücksichtigung der Spezifikation des Fahrzeugs und seines Antriebsstrangs (Masse, Fahrwiderstand, Übersetzungen, usw.) bzw. der Betriebsstrategie (gewählter

Gang usw.) die verbrauchsrelevanten Parameter Motordrehzahl sowie Motordrehmoment zu bestimmen erlauben. Unter Verwendung dieser beider Parameter wird automatisch der momentane Kraftstoffverbrauch ausgewertet, aus welchem per Integration der Zyklusgesamtverbrauch bzw. die CO₂ Emissionen in der 2. Simulation (s. Kap. 2.4) ermittelt werden.

Die Genauigkeit der Simulationen hängt in entscheidender Weise von der Genauigkeit der Eingangsdaten ab, die auf Basis AVL-interner Datenstände unter Einbindung zahlreicher Experten für die betrachteten Systeme nach bestem heutigem Wissen abgeschätzt wurden. Eine prozentuelle Unsicherheit in den Ergebnissen ist also zu erwarten, diese wird jedoch den Trend der Simulationsergebnisse und die daraus abgeleiteten Aussagen nicht signifikant beeinflussen.

Für die Simulation wurden die drei europäischen Klassen von Nutzfahrzeugen ausgewählt: N₁, N₂ und N₃. Zu jeder dieser Klassen wurde ein repräsentatives Nutzfahrzeug ausgewählt, das den derzeitigen Stand der Technik darstellt. Für jede dieser Fahrzeugkategorien wurden charakteristische Beispiele von Realfahrzyklen aus dem Wiener Stadtbereich definiert, welche verschiedene Verkehrssituationen repräsentieren (Level of Service). Diese wurden nach einer Analysephase in einem weiteren Schritt unter Beibehaltung statistisch relevanter Informationen zu den letztlich in der Fahrzeugsimulation implementierten Simulationszyklen vereinfacht.

Die Realfahrzyklen beinhalten nur geringe Fahrbahnsteigungen, weshalb diese für die 2. Simulation vernachlässigt werden konnten. Die Zielgeschwindigkeitskurven enthalten während der Phasen der Fahrzeugbeschleunigung keine exakte Vorgabe über die Fahrzeugbeschleunigung, sondern geben sprunghaft die Endgeschwindigkeit vor, sodass der Fahrerregler in der Simulation die Zielgeschwindigkeit (beispielsweise 50 km/h in der Stadt, oder 130 km/h auf der Autobahn) unter Vollastbetrieb zu erreichen versucht, was dem typischen Betrieb solcher Nutzfahrzeuge nahekommt.

Ferner wurde für jede Fahrzeug/Zyklus-Kombination eine repräsentative zeitliche Abfolge des Fahrzeugbeladungszustands als Simulationsrandbedingung berücksichtigt.

Es wurde durchgehend eine verbrauchsarme Schaltstrategie angenommen.

Fahrzeuge, die über keine Start/Stopp-Einrichtung verfügen, wurden durchgängig mit laufendem Verbrennungsmotor simuliert. Dies wurde auch während der typischen Lade- und Entladephasen aufrechterhalten.

Zur Ermittlung realistischer Verbrauchsszenarien wurden außerdem mechanische Zusatzverbraucher wie Klimaanlage, elektrische Servolenkung oder elektrischer Generator in allen simulierten Fahrzeugmodellen berücksichtigt.

1.3.2 Modellierung der Input-Daten

1.3.2.1 Methoden zur Generierung der Input-Daten für die Randbedingungen

Grundsätzlich bieten sich folgende Zugangsweisen für die Modellierung bzw. Strukturierung des Dateninputs der Randbedingungen für einen Fahrzyklen-Simulationsdurchlauf an. Die Definition der

Randbedingungen hängt dabei vom Erkenntnis- bzw. vom Handlungsbedarf der jeweiligen privaten oder öffentlichen AkteurlInnen ab.

(1) Daten aus Messfahrten auf ausgewählten Routen

Erkenntnisziel: Controlling eines transportwirtschaftlichen Produktionskonzeptes und seiner internen und externen Effekte.

Das kann das Einsparpotenzial in Straßenfernläufen bei verschiedenen Kraftstoff-Varianten (wie Dual-Fuel-Strategie am Fahrzeug oder im Fuhrpark), aber auch im Vergleich der Transportmodi, wenn sie substitutiv einsetzbar sind (wie straßenreiner versus schienenreiner Transport), betreffen.

Die nötigen Daten müssten sich aus einer Auswertung von Fahrtenbüchern, von Digitalen Tachographen oder aus einem GPS-Tracking ergeben, die mit den verkehrstopographischen Daten (wie Netzgraphen) abzugleichen wären. Da es sich um individualisierte Daten handelt, die transportierende, absendende und empfangende Unternehmen betreffen, ist der Datenschutz eine heikle Angelegenheit. Solche Fahrzeugverfolgungen auf der Basis der Fernerkundung beginnen und enden deswegen im ausreichenden Abstand zu den Quell- und Zielstandorten, sind also z.B. nur auf die Hauptlauftrouten bezogen, was die Aussagekraft der Ergebnisse aber stark einschränken kann.

(2) Daten aus Quell-Ziel-Relations-Matrizen mit Routenumlegung

Erkenntnisziel: Öffentliches Verkehrsmanagement (z.B. Lkw-Führungskonzepte) zur Bewältigung von Verkehrsproblemen.

Erfasst bzw. hochgerechnet werden dabei bestimmte Fahrzeugbewegungen im Verkehrsnetz zwischen definierten Verkehrszellen (wie Stadtteile oder Wirtschaftsregionen), die als versendende oder empfangende Gütersenken fungieren, anhand von Stichprobenerhebungen bei verladenden Unternehmensstandorten und/oder bei Transportunternehmen. Der Datenschutz ist dann gewährleistet, wenn die Verkehrszellen so konfiguriert sind, dass ein Rückschluss auf weniger als vier Marktteilnehmende in einer Branche und die konkrete Lokalisierung ihrer Ladestandorte nicht mehr möglich ist.

(3) Verkehrslogistische Einsatzszenarien

Erkenntnisziel: Über die herkömmliche Routenplanung hinausgehende Systemoptimierung der Güterversorgung von typischen Bedienräumen mit bestimmter Standortcharakteristik.

Dabei unterscheiden sich vor allem Innenstädte, unterschiedlich räumlich strukturierte Zonen in Ballungsräumen, ländliche Regionen und Korridorräume entlang der Achsen von Fernverkehrswegen.

Für die Aufgabenstellung der EFLOG-F&E-Dienstleistung hat sich dieser Ansatz als am geeignetsten herausgestellt, weil keine Datenschutzprobleme auftauchen, die Bedingungen der Verkehrsinfrastruktur und der Raumstruktur der Gütersenke ausreichend berücksichtigt sind und die Einflussfaktoren plausibel erklärt werden können (s. Darstellung 1-21). In diesem Sinne wurden nachfolgend die Mustertransportläufe definiert.

1.3.2.2 Herleitung der Mustertransportläufe

Als Einstieg für die Fahrzyklusberechnung wurden drei Mustertransportläufe angenommen, die einem multivariaten Anforderungsprofil an den verkehrslogistischen Schnittstellen zwischen Güterversorgung, Gütertransport und Güterverkehr nachkommen. Diese konstituieren sich aus folgenden Komponenten:

1. **Drei Nutzfahrzeugmuster** der Klassen N₁, N₂ und N₃, die typisch in
2. **drei werktäglichen Logistikprozessen** (KEP-Dienst, Lebensmittelhandel, industrieller Lieferant) eingesetzt werden, und auf einem
3. **repräsentativen Laufweg** verkehren, der in der Streckenabfolge für einen Ballungsraum **drei charakteristische Straßenkategorien** (Autobahn, Hauptstraße, Erschließungsnetz) frequentiert, um einen Bedienraum zu versorgen, der den Schwerpunkt der Gütersenke repräsentiert.

Die **drei Mustertransportläufe** treffen auf ihrem Fahrweg auf drei **tageszeitabhängige Verkehrszustände** (Level of Service A, C, E) im Straßennetz.

Die Aufbereitung der Input-Daten folgte nach dem methodischen Konzept der Graphentheorie (Grundlegendes dazu bei DIESTEL, 2006), die in der Touren- und Verkehrsnetzplanung heute breite Verwendung findet. Für die Güterverkehrsforschung sind die Nutzenanwendungen zwar rar, aber in der BMVIT-Studie Friendly Supply Chains wurden Beispiele für die Attributierung von Kanten und die Typisierung von Knoten in einem auf Produktionsstandorte zentrierten Verkehrsgraphen von Branchenverkehren dargelegt (DÖRR, HÖRL, PÖCHTRAGER, 2010, 58).

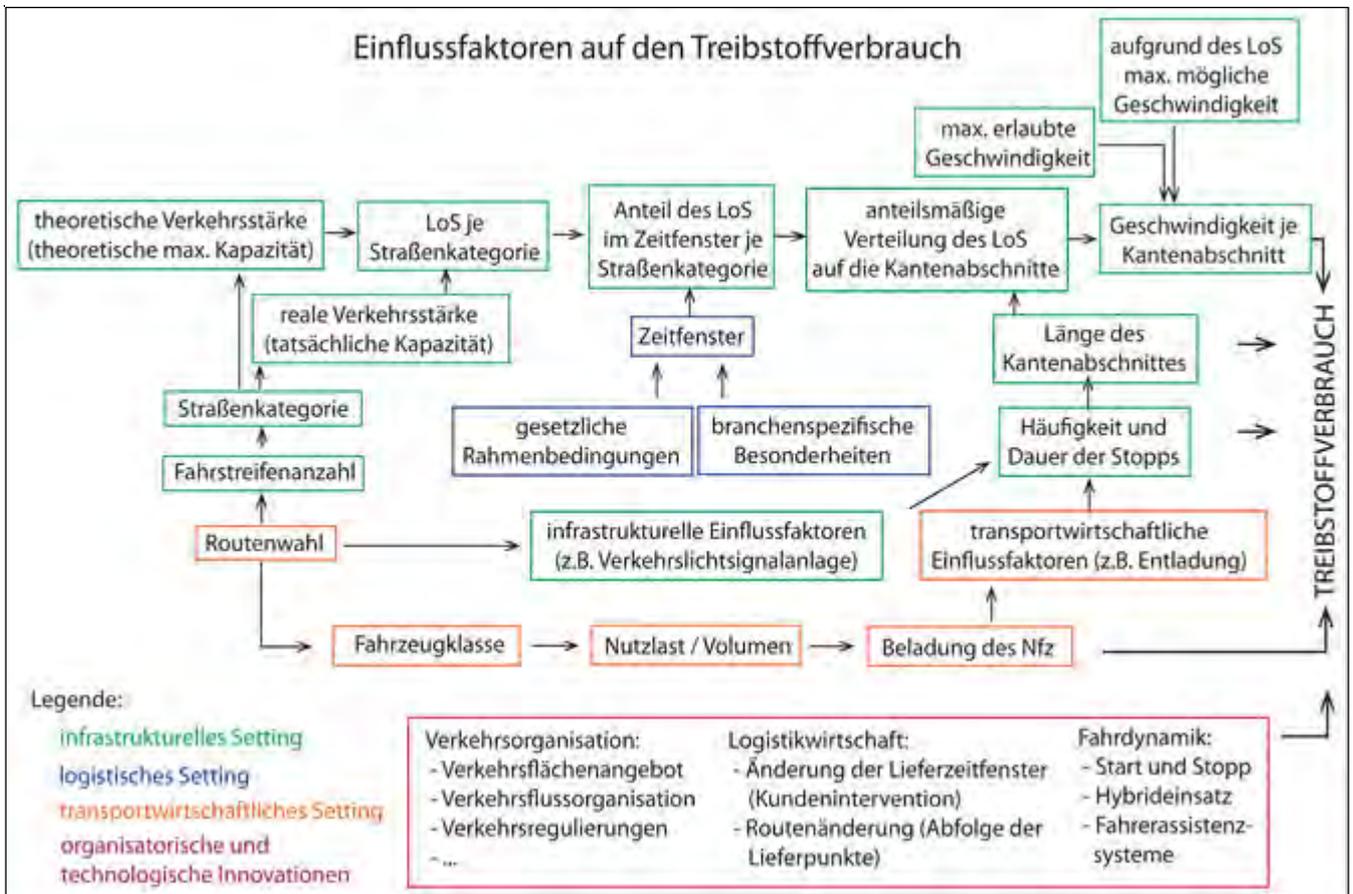
Jeder Mustertransportlauf wird in der Aufbereitung als Verkehrsgraph in sogenannte Knoten und Kanten gegliedert. Jede Kante besteht wiederum aus Kantenabschnitten und wird von zwei Knoten begrenzt. Die Knoten symbolisieren den Stillstand des Fahrzeuges, welcher durch infrastrukturelle (Verkehrslichtsignalanlage, Einbiegen in Vorrangstraße), verkehrsbedingte (Stop-and-Go-Verkehr) oder durch logistische Umstände (wie Abschichtung der Ladung) ausgelöst wird. Beim Stillstand vor einer Kreuzung wird der Knoten an der Haltelinie (Beginn des Anfahrvorganges) verortet. Die an den Knoten anschließende Kante beginnt daher mit dem Räumweg des Fahrzeuges noch in der Kreuzung.

Alle maßgeblichen Faktoren für den Dateninput beziehen sich auf die zulässige bzw. aufgrund des tageszeitabhängigen Verkehrszustandes mögliche Fahrgeschwindigkeit, das Längsprofil des Laufweges, den Beladungszustand des Fahrzeuges und die Auswahl des Fahrzeugmusters, dessen fahrkinetischen Eigenschaften im CRUISE-Programm hinterlegt sind.

1.3.2.3 Zuordnung der Einflussfaktoren im Dateninput-Modell

Für die Simulation wurden die Informationen Kantenlänge, Fahrgeschwindigkeit, Beladungszustand und topographische Höhe des Fahrweges generiert. Für die Annahmen der Mustertransportläufe wurden somit die exogenen (weil nicht veränderbare) Faktoren des Infrastrukturellen Settings, die externen (weil durch die Kundschaft bestimmte) Faktoren des Logistischen Settings und sodann die internen Faktoren (wie Fahrzeugeinsatz) des Transportwirtschaftlichen Settings berücksichtigt, welche im Folgenden genauer erläutert werden.

Darstellung 1-21: Zuordnung der Einflussfaktoren zu den Settings der Verkehrslogistik im Input-Datenmodell



Quelle: eigene Bearbeitung (arp)

1.3.3 Auswahl der exogenen Faktoren des Infrastrukturellen Settings

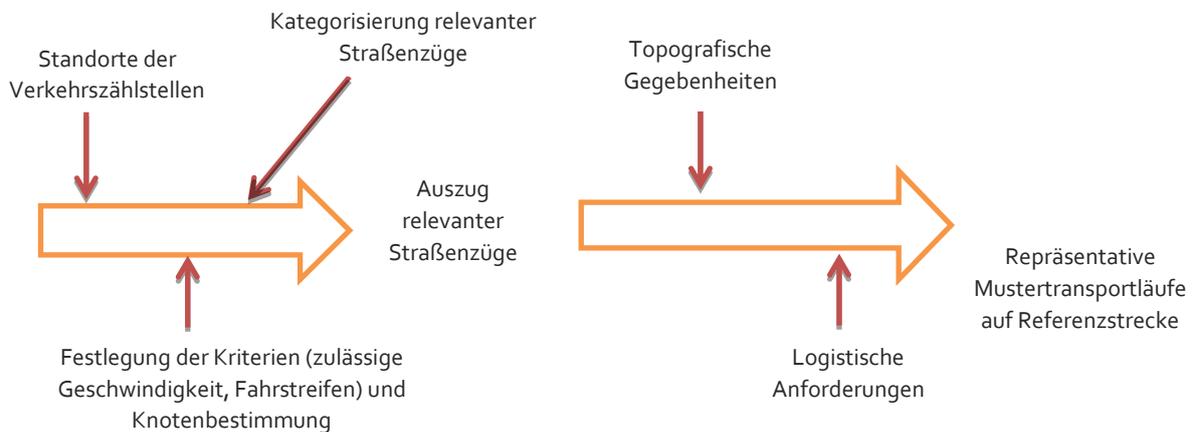
Unter dem Infrastrukturellem Setting werden hier das Angebot und die Auswahl an öffentliche benutzbaren Verkehrsanlagen, also die Verkehrswegenetze und -knoten mit ihrer Ausstattung und ihren Regulierungen, verstanden, über die Transportläufe von den Güterquellen zu den Gütersenken geführt werden können.

Als wesentliche Befahrungs- und Benutzungsbedingungen der Verkehrsinfrastruktur wurden für die Mustertransportläufe sowohl die maximal erlaubte Fahrgeschwindigkeit für Lkw als auch die Anzahl der Fahrstreifen auf dem jeweiligen Straßenabschnitt erhoben, um die Kapazität des Fahrweges einschätzen zu können.

1.3.3.1 Kriterien der Kantenstückelung bzw. Verortung der Knoten

Um eine repräsentative Referenzstrecke für die in Aussicht genommenen Logistikaufgaben herauszufiltern, wurden für den Raum Wien Straßenzüge, für die ausreichend Daten vorlagen und die einen erheblichen Güterverkehr in Relationen zur Gütersenke aufwiesen, einem Screening unterzogen. Auf Grundlage der Dauerzählstellenauswertung der Straßenverkehrserhebung 2010 für Wien und der Daten der Dauerzählstellen der ASFINAG⁶⁹ für die Autobahnen und Schnellstraßen wurden relevante Straßenzüge ermittelt und nach Kriterien der Straßenausstattung und Leistungsfähigkeit in Kantenzüge gegliedert. Die Auswahl dieser Kantenzüge erfolgte in erster Linie nach dem Vorhandensein und der dichten Abfolge automatischer Zählstellen und nach ihrer Netzeinbettung in relevanten Relationen des regional bedienenden Wirtschaftsverkehrs, insbesondere was Zulaufwegen von Logistiklagern am Rand des Ballungsraumes in die innerstädtischen Gütersenken anbelangt (s. Darstellung 1-23).

Darstellung 1-22: Modellierung und Ablauf des Screenings der relevanten Straßenzüge



Quelle: eigene Bearbeitung (arp)

Jeder Kantenzug besteht aus mehreren Kanten, die sich jeweils zwischen zwei Knoten befinden und gleiche Befahrungsbedingungen für den Nutzfahrzeugverkehr als Kantenattribute aufweisen. Die Knoten sind entweder durch einen Stillstand des Nutzfahrzeugs im Straßennetz oder durch sonstige gravierende Änderungen der Befahrungsbedingungen, die den Verkehrsfluss abändern bzw. das Fahrverhalten beeinflussen, definiert. Die Knoten unterscheiden sich im Wesentlichen nach vier Knotentypen:

Knoten aufgrund der verkehrsorganisatorischen Gegebenheiten des Fahrweges kommen als Typ am häufigsten vor. Es handelt sich dabei um jene Verkehrssituationen, bei denen das Fahrzeug beispielsweise bei Verkehrslichtsignalanlagen oder aufgrund des Einbiegens in eine Vorrangstraße zum Stillstand kommt. Bei diesem Typ handelt es sich um Knoten mit einer hohen Haltewahrscheinlichkeit.

Änderung des Kriteriums **Fahrstreifenanzahl**: die Einführung dieses Knotentyps ist relevant, da die Anzahl der Fahrstreifen einen wesentlichen Einfluss auf die Kapazität des Fahrweges und somit auf den Verkehrszustand hat. Die Reduzierung der Fahrstreifenanzahl führt zu einer Verdichtung des Verkehrs und kann zu einem schlechteren Level of Service führen. Trotz der Bedeutung des Knotentyps ist eine Haltewahrscheinlichkeit (Reißverschlussystem) eher gering. Es wurde zwischen einem, zwei, drei und vier

Fahrstreifen pro Fahrtrichtung unterschieden. Die Analyse hat ergeben, dass die meisten Straßen mit bedeutendem Schwerververkehrsanteil über mindestens zwei Fahrstreifen je Richtung verfügen.

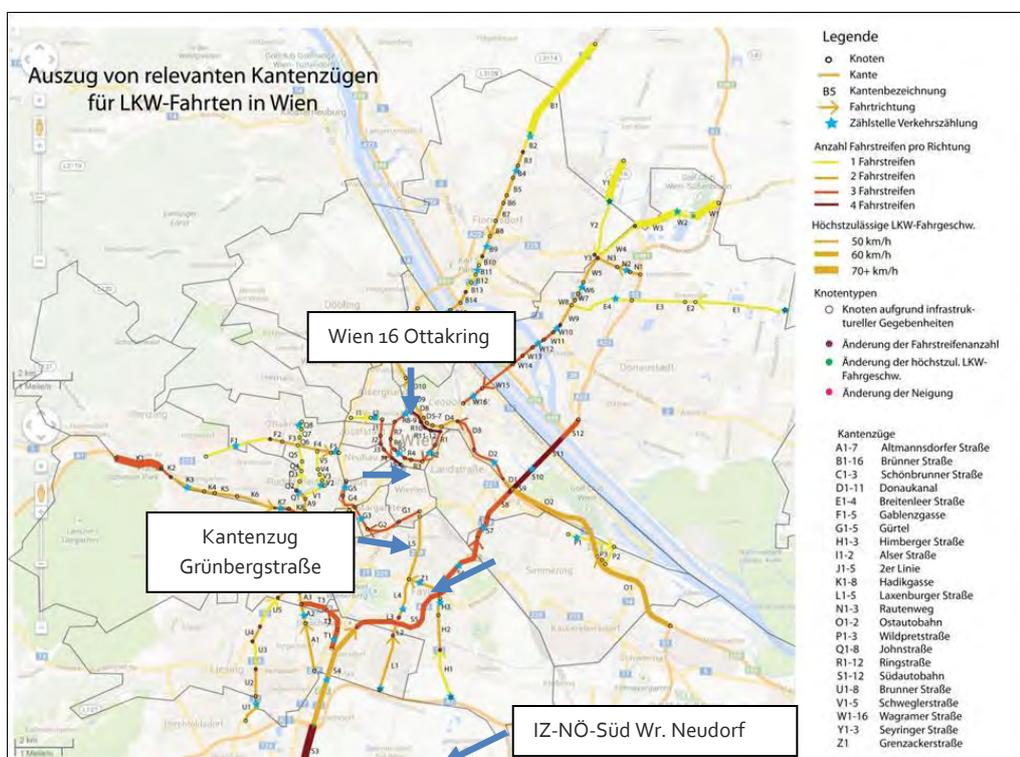
Die Änderung der **höchstzulässigen Lkw-Geschwindigkeit** hat einen Einfluss auf den Verkehrszustand. Dieses Kriterium steht im Zusammenhang mit der Straßenkategorie. Es ist jedoch anzumerken, dass sich die meisten Straßen im Stadtgebiet befinden und dadurch (unter Berücksichtigung einzelner Ausnahmen) mit 50 km/h beschränkt sind.

Änderung der **Längsneigung des Fahrweges**, wie Steigungs- und Gefälleabschnitte im Kantenzug, ziehen allenfalls ein geändertes Fahrverhalten nach sich, auf jeden Fall passt sich das Motorenverhalten den Bedingungen an. Besonders bei schweren Nutzfahrzeugen ist ein Absinken der Fahrgeschwindigkeit gegenüber den Pkw beobachtbar, was, vor allem wenn es keine Kriechspur gibt, Auswirkungen auf die nachkommenden leichteren Fahrzeuge hat. Dieser Knotentyp kommt im Raum Wien jedoch nur selektiv entlang des Vorfeldes des Wienwaldbogens vor und weist eine geringe Haltewahrscheinlichkeit auf.

1.3.3.2 Auszug relevanter Straßenzüge im Raum Wien für die Auswahl einer Referenzstrecke

Insgesamt wurden 17 Kantenzüge identifiziert, die für die Auswahl von Mustertransportläufen zur Fahrzyklus-Simulation in Frage kommen. Die folgende Darstellung veranschaulicht den Auszug der relevanten Kantenzüge und ihre Stückelung anhand der erwähnten Knotentypen bzw. Kriterien. Zudem sind die ständigen Zählstellen im Straßenverlauf eingezeichnet.

Darstellung 1-23: Auszug güterverkehrsrelevanter Kantenzüge im übergeordneten Straßennetz im Raum Wien



Quelle: eigene Darstellung (arp: Marsch, Toifl)

1.3.3.3 Auswahl der Referenzstrecke Wiener Neudorf nach Wien 16 (Ottakring)

Da nicht das gesamte relevante Straßennetz simuliert werden kann, muss der Mustertransportlauf nicht nur verkehrslogistisch realistisch, sondern vor allem auch repräsentativ in der Route und als Tour sein. Aufgrund des Auszuges von relevanten Kantenzügen wurde bereits den einzelnen Straßen ihre entsprechende Kategorie zugeordnet. Nun galt es, den Mustertransportlauf so zu wählen, dass er aus einem Mix verschiedener **Straßenkategorien unterschiedlicher Kapazität** besteht. Außerdem war eine Route mit **topografisch unterschiedlichen Kantenzügen** (Steigungs- und Gefälle-Abschnitte) im Laufweg der Transporttour zunächst erwünscht, um den Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch zu ermessen. Schließlich sollten auch die **Lauflänge** und die **Umlaufzeit** des Nutzfahrzeuges charakteristisch für die Versorgung der Gütersenke sein. Des Weiteren sollten alle ausgesuchten Logistikverkehre **dieselbe Zulaufstrecke** zu ihrem Bedienraum haben. Dieses Anforderungsprofil an eine Referenzstrecke erfüllt schließlich in nahezu idealer Weise die Referenzstrecke Wiener Neudorf – Industriezentrum Niederösterreich Süd nach Wien-Ottakring (Verlauf siehe blaue Pfeile in Darstellung 1-23).

Um einen repräsentativen Mustertransportlauf durchrechnen zu können, müssen ein Start- bzw. Endpunkte gewählt werden, die am besten vielfältigen logistischen Anforderungen entsprechen. Da mit der Grünbergstraße bereits ein Teilstück des Mustertransportlaufes aus topographischen Gründen definiert wurde, lag es nahe, diesen Mustertransportlauf im Wirtschaftsgürtel im Süden von Wien zu starten, wo eine große Anzahl von Handels- und Logistikunternehmen ansässig ist, wie im Industriezentrum NÖ-Süd, das zudem über eine direkte Anschlussstelle zur Südautobahn A2 verfügt, sodass ein kurzes Stück der Route auch unter Fernlauf-Bedingungen absolviert wird.

Die Referenzstrecke, die als Zulaufstrecke zunächst die N₁-, N₂- und die N₃-Touren bündelt, weist Kantenzüge für die Straßenkategorie Hochleistungsstraße (Autobahn, Schnellstraße, Gürtelstraße mit Unterführungen) und Hauptstraße (meist vierstreifig, also zweistreifig in Fahrtrichtung) aus, die in der Kantlänge aufgrund der Längsneigung und der Knotenabfolge mit Verkehrslichtsignalanlage variieren. Zu guter Letzt führt der Mustertransportlauf in den Bedienraum im 16. Bezirk, in dem typisch für Wien, ein innerstädtisches Rasterstraßennetz mit vorrangiger Erschließungsfunktion vorherrscht. Dieses unterscheidet sich aufgrund seiner geringen Kantlänge aufgrund der gründerzeitlichen Baublockgliederung und seiner geringen Fahrstreifenanzahl deutlich von den beiden anderen Kategorien.

Zur Überprüfung der Repräsentativität der ausgewählten Referenzstrecke mag der Vergleich der Laufängen mit den 17 untersuchten schwerverkehrsrelevanten Straßenzügen im Raum Wien dienen (s. Tabelle 1-29). Dabei ist zu beachten, dass im Auszug für den Raum Wien nur die Laufängen in der Fahrtrichtung stadteinwärts enthalten sind, während die Kantenstatistik der Referenzstrecke die Laufängen der Tour mit Zulauf- und Rücklauffahrt beinhaltet. Wesentlich ist dabei, dass die durchschnittlichen Laufängen nach Straßenkategorien sich in ähnlichen und somit vergleichbaren Dimensionen halten. Die in der Tour zweimal im Zu- und im Rücklauf frequentierte Referenzstrecke mit 34 km weist 59 % Laufänge auf Hochleistungsstraßen, 24 % auf städtischen Hauptstraßen und nur 17 % im Erschließungsstraßennetz auf. Diese durchaus typische Verkehrsabwicklung stellt eine symptomatische Konsequenz der Konzentration von Zentrallägern am Autobahnring im Umland und des Abbaues der Schienengüterbedienung der innerstädtischen Güterbahnhöfe und Terminals dar. Damit

wächst der ökonomische Druck auf die Fuhrparkunternehmen möglichst große und schwere Nutzfahrzeuge für die Verteilverkehre einzusetzen.

Tabelle 1-29: Lauflängen der Kantengliederung relevanter Straßenzüge im Raum Wien (li.) und der Referenzstrecke (re.)

Kanten-Statistik aufgrund der verkehrsbedingten Stopps (Auszug Wien)				Kanten-Statistik aufgrund der verkehrsbedingten Stopps			
	Anzahl Kanten	Gesamtlänge [m]	Länge / Kante [m]		Anzahl Kanten	Gesamtlänge [m]	Länge / Kante [m]
Straßenkat. I	17	30.720	1.807	Straßenkat. I	12	19.940	1.662
Straßenkat. II	63	46.235	734	Straßenkat. II	14	8.220	587
Straßenkat. III	32	13.510	422	Straßenkat. III	14	5.800	414
Gesamt	112	90.465	808	Gesamte Tour	40	33.960	849

Quelle: eigene Bearbeitung (arp: Marsch, Toifl)

1.3.3.4 Annahmen zur Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Level of Service

Der Level of Service (LoS) wird durch den Faktor der Geschwindigkeit in der Simulation berücksichtigt. Aufgrund der Beladung des Nutzfahrzeuges und der Neigungsverhältnisse der Straße im Zuge des Laufweges kommt es in der Beschleunigungs- bzw. Verzögerungs- (Brems-) Phase zu einer Bandbreite von minimal und maximal möglichen Geschwindigkeiten. Aufgrund dessen wurde in weiterer Folge ein gemittelter Verlauf angenommen, welcher durch die Geschwindigkeit repräsentiert wird. Jede Kante hat, aufgrund der infrastrukturellen Gegebenheiten, eine maximal zulässige Geschwindigkeit für Lkw, welche, je nach LoS, abgemindert wird. Dabei wurden folgende Annahmen zur Abminderung getroffen:

LoS-A* bedeutet einen freien Verkehrsfluss und somit keine Abminderung der Geschwindigkeit. Da sich die Verkehrsteilnehmenden nicht gegenseitig beeinflussen, wurde für die maximal mögliche Fahrgeschwindigkeit (v_{\max}) die, für die jeweilige Nfz-Klasse zulässige Fahrgeschwindigkeit (auf Hochleistungsstraßen z.B. 80 km/h) angenommen. Aufgrund der Kantenlänge kann es jedoch vorkommen, dass die v_{\max} Fahrdynamik gar nicht erreicht werden kann.

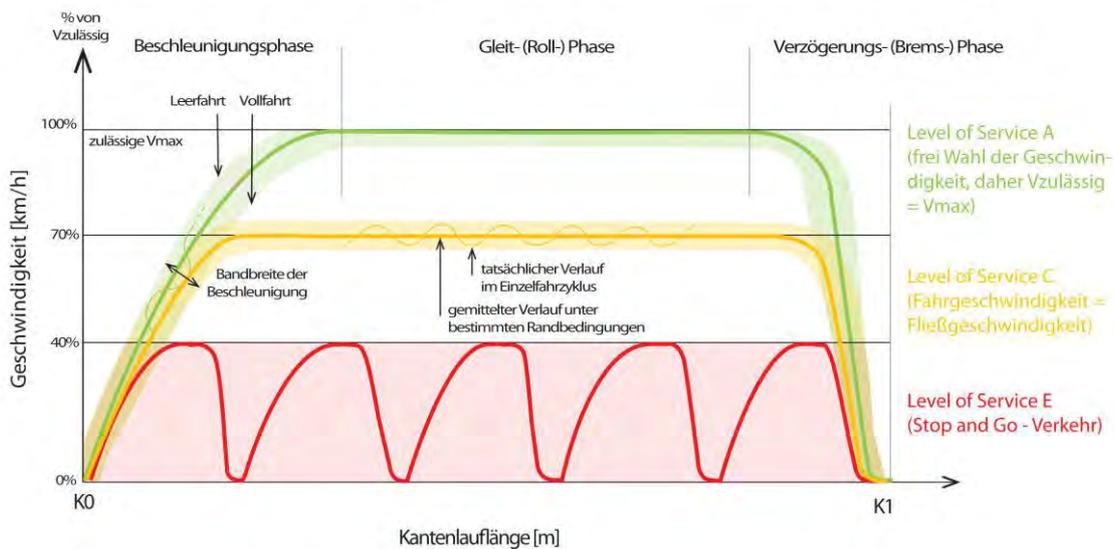
Bei LoS-C* ist der Verkehrsfluss zwar stabil, aber die Bewegungsfreiheit der Verkehrsteilnehmenden ist deutlich eingeschränkt. Daher wurde eine um 30 % reduzierte v_{\max} angenommen (von 80 auf 65 km/h bei Fernverkehrswegen, von 70 auf 49 km/h bei Verkehrsstraßen im Freilandverkehr, von 50 km/h auf 35 km/h im Innerortsverkehr bzw. von 30 km/h auf 21 km/h im innerstädtischen Erschließungsnetz). Auch bei diesem LoS kann eine vergleichsweise kurze Kantenlänge die Beschleunigung auf die v_{\max} beeinträchtigen.

LoS-E* repräsentiert den Stop-and-Go-Verkehr, wodurch von einer um 60 % herabgesetzten v_{\max} ausgegangen wurde (von 80 auf 32 km/h am Fernverkehrsweg, von 70 auf 28 km/h bei Verkehrsstraßen im Freiland, von 50 auf 20 km/h bei Verkehrs- und Sammelstraßen innerorts sowie von 30 auf 12 km/h bei Erschließungsstraßen). Neben der Festlegung auf die maximal mögliche Fahrgeschwindigkeit ist es zudem erforderlich, die Stopps zu definieren. Es wurde die Annahme getroffen, dass es beim LoS-E* alle 50 Meter (auf Hochleistungsstraßen alle 100 Meter) zu einem Stillstand des Fahrzeuges im Ausmaß von fünf Sekunden kommt.

Das städtische Verkehrsgeschehen zwingt, mit Ausnahme der Nachtstunden, ein vereinheitlichtes Fahrverhalten auf, sodass vereinfachend diese Annahmen für alle Nutzfahrzeugtypen (N1, N2, N3) gelten dürfen. Diese Annahmen zur Abminderung der maximal zulässigen Geschwindigkeit für Nutzfahrzeuge werden im folgenden Basisdiagramm zur 1. Simulation veranschaulicht:

Darstellung 1-24: Annahmen zur Abminderung der maximalen Fahrgeschwindigkeit aufgrund der Kapazitätsauslastung des Fahrweges nach Level of Service

Basisdiagramm: Fahrverhalten abhängig von der Kapazitätsauslastung des Fahrweges (LoS)



Quelle: eigene Darstellung (arp)

Angemerkt gehört, dass es sich bei der Definition der LoS um Annahmen rationalen regelkonformen Fahrverhaltens handelt. Die Beobachtung jedoch zeigt, dass das Verkehrsgeschehen in der Realität unterschiedliche Abweichungen aufweisen kann. Besonders deutlich wird der Unterschied zwischen dem rationalen und dem realen Fahrverhalten bezüglich der Nicht-Einhaltung des Sicherheitsabstandes, was zur typischen Ziehharmonika-Bewegung im Verkehrsfluss führt, wodurch der Stauereffekt verstärkt wird. Die folgende Abbildung 1-63 zeigt die drei LoS-A*, -C* und -E* in der Realität der Referenzstrecke (links: A 2 vor Altmannsdorfer Str., Mitte: Grünbergstraße, rechts: Winkelmannstraße).

Abbildung 1-63: LoS-A*, -C* und -E* von Beobachtungsfahrten auf der Referenzstrecke der Mustertransportläufe



Bilder: arp (2014, Toifl)

In der Realität kann es vorkommen, dass ein Transportlauf im Zeitgang einer Tour mehrere Levels of Service im Straßennetz vorfindet. Etwa, wenn die Anfahrt mit voller Beladung in den Bedienraum (Lieferbezirk) unter den Bedingungen von LoS-C* stattfindet, aber nach Abschluss der Verteiltour (z.B. am Nachmittag) die Rückfahrt als Leerfahrt (z.B. in der Frühlabendspitze) unter den Bedingungen von LoS-E* absolviert wird.

1.3.4 Auswahl der externen Faktoren des Logistischen Settings

1.3.4.1 Auswahl und Anforderungen der verkehrslogistischen Prozesse

Im Zuge des ersten Simulationsdurchganges sollen zunächst vor allem grundlegende Annahmen zur **Art des Güterverkehrs** korrespondierend zu den ausgesuchten Nutzfahrzeugtypen aus den Nutzfahrzeugklassen N₁, N₂ und N₃ getroffen werden, um die Interpretation der Ergebnisse von Beginn an überschaubar und nachvollziehbar zu halten. Dazu sind Branchen-Logistiken auszuwählen, die einerseits das breite Spektrum der Güterverkehre und andererseits die Differenzierung der logistischen Anforderungen an den Transportlauf, insbesondere an den Fahrzeugeinsatz, wiedergeben.

Die Auswahl der Logistikprozesse, die den Mustertransportläufen zugrunde gelegt sind, sollte Versorgungsaufgaben betreffen, die regelmäßig, werktäglich und letztlich überall, wo eine breite Güternachfrage besteht, erfüllt werden. In Korrespondenz mit den Nutzfahrzeugmustern N₁, N₂ und N₃ wurden daher eine Tour für einen Kurier-, Express- und Paketdienst (N₁-KEP-Tour) zur Zustellung von Kleinsendungen an beliebige Adressen (Points of Deliveries, PoD) in einem städtischen Zustellrayon, eine Tour für die Belieferung von Filialen des Lebensmitteleinzelhandels (Points of Sale, PoS) in einem dicht bebauten Stadtteil (N₂-LEH-Tour) und eine Tour zur Zulieferung eines industriell gefertigten Standard-Produktes von einer innerstädtischen Produktionsstätte zu einem Wareneingangslager eines Großabnehmers im Umland (N₃-ZZG-Tour) ausgewählt.

1.3.4.2 Auswahl und Strukturierung der Bedienräume (Gütersenken)

Dabei ist die Dichte der Anlieferstationen in der Gütersenke ein hervorragendes Kriterium, weil sie eng mit der Lieferfrequenz und mit der Aufteilung der Liefermengen auf geeignete Nutzfahrzeuge für den Distributionsverkehr verbunden ist. Auch spiegelt sich darin die landesspezifische disperse und kleinteilige Versorgungsstruktur wider. Mit diesen Faktoren ist ein Lieferzeitfenster für die Abwicklung der regelmäßigen Belieferung von Points of Sale (PoS) verbunden. Diese Liefertouren wiederum treffen auf bestimmte Verkehrszustände im Straßennetz zu bestimmten Tageszeiten, was Verzögerungen, Kraftstoffmeherverbrauch und zusätzliche Emissionen kosten kann.

Damit ist erstens ein Gutteil von Gütertransporten im Ballungsraum abgedeckt, zweitens lassen sich diese Güterverkehre auf einer gemeinsamen Zulaufstrecke bündeln, wie es der Realität zwischen dem Wirtschaftsgürtel südlich von Wien und den Außenbezirken der Metropole entspricht, und drittens sind in den genannten Ziel- und Quellgebieten der Warentransporte die Standorte der Ausliefer- und Empfangslager (diesfalls der Raum Industriezentrum Niederösterreich Süd) sowie die Dichte an Points of Delivery und Points of Sale in den Bedienräumen (diesfalls im 16. Wiener Bezirk) nachvollziehbar angesiedelt, ohne auf konkrete Unternehmen Bezug nehmen zu müssen.

1.3.5 Auswahl der internen Faktoren des Transportwirtschaftlichen Settings

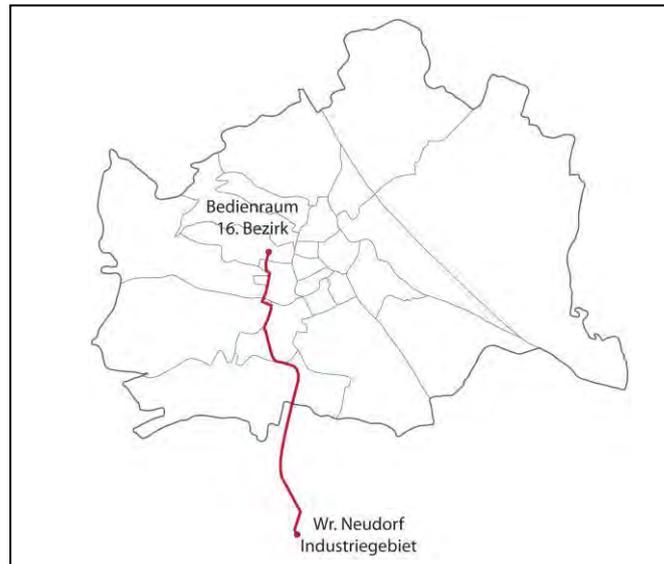
1.3.5.1 Auswahl und Kantenstückelung der Referenzstrecke (Quelle-Ziel-Relationen)

Unter das Transportwirtschaftliche Setting fallen die **Routenwahl** zur Bedienung des Transportlaufes, der **Fahrzeugeinsatz** und allenfalls die **Bündelung von Warentransporten** in der gleichen Relation.

Die drei Mustertransportläufe basieren auf drei fiktiven Touren, welche aufgrund der jeweiligen Branche definiert wurden. Jeder Branche und somit auch jeder Tour wurde eine Fahrzeugklasse (N₁, N₂, N₃) für die Simulation zugeordnet. Tour 1 erfolgt mit der Fahrzeugklasse N₁ und repräsentiert KEP-(Kurier-, Express- und Paket-) Dienste, Tour 2 mit der Fahrzeugklasse N₂ vertritt die Branche des Lebensmitteleinzelhandels und die Fahrt von einem Produktionsstandort zu einem Zentrallager wird durch die Tour 3 mit der Fahrzeugklasse N₃ dargestellt.

Bezüglich der Routenwahl wurde davon ausgegangen, dass die drei Touren in einem Gewerbegebiet südlich von Wien starten, die Verteiltour im 16. Wiener Gemeindebezirk erfolgt und die Nfz anschließend wieder die gleiche Strecke ins Gewerbegebiet südlich von Wien zurückfahren, wo die Tour schließlich endet (Vor- und Rücklauf ident). Die drei Mustertransportläufe haben somit den gleichen Start- bzw. Endpunkt und fahren alle in den gleichen Bezirk, wodurch sie sich lediglich durch die Verteiltour voneinander unterscheiden.

Darstellung 1-25: Zulaufstrecke vom Industriezentrum NÖ-Süd am Ballungsraumrand bis zum innerstädtischen Lieferbezirk im westlichen Gründerzeitgürtel von Wien



Quelle: eigene Darstellung (arp)

Der Start- bzw. Endpunkt der Tour (s. Darstellung 1-25) findet im Industriegebiet Niederösterreich-Süd in Wiener Neudorf statt, wo der Lebensmitteleinzelhandel und KEP-Dienste ihre Zentrallager haben. Durch die große Anzahl der dort ansässigen Logistikunternehmen sind Touren in die Bundeshauptstadt alltäglich und somit relevant für eine Simulation. Dass alle drei Touren in den Wiener 16. Bezirk führen liegt einerseits darin begründet, dass damit die hauptsächlich frequentierten Straßenkategorien abgedeckt

werden (von Hochleistungsstraßen über stark befahrene Hauptstraßen bis hin zu niederrangigen Seitenstraßen) und andererseits, dass unterschiedlich starke Neigungsverhältnisse auf dieser Tour anzutreffen sind. Bezüglich der Neigungsverhältnisse ist besonders die Grünbergstraße zu nennen, da diese ein verhältnismäßig starkes Gefälle mit 36 % aufweist. Im Detail sieht die Referenz-strecke (ohne der branchenspezifischen Verteiltouren) folgendermaßen aus:

Tabelle 1-30: Kenndaten der Kantenzüge der Referenzstrecke Wr. Neudorf IZ NÖ-Süd nach Wien-16

Kantenzug (von-nach)	Straßenkategorie	Lauflänge (m) (Σ 16.890 m)	Eingangsgeschwindigkeit bei (km/h)		
			LoS-A*	LoS-C*	LoS-E*
Start im Industriezentrum NÖ-Süd Straße 6 bis A2-Anschlussstelle					
Südautobahn (A 2) bis Knoten Inzersdorf	I	7.980	130 / 80	91 / 56	52 / 32
Südosttangente (A 23) bis B 224	I	2.950	130 / 80	91 / 56	52 / 32
Altmannsdorfer Straße (B 224)	II	1.810	50	35	20
Grünbergstraße (B 224) bis Wiental	II	1.340	50	35	20
Winckelmannstraße (Hauptstraße gem. VO des Landes Wien)	III	450	50	35	20
Johnstraße (Hauptstraße w.o.)	III	2.160	50	35	20
Possingergasse bis Herbststraße (Hptstr. w.o.)	III	200	50	35	20
Beginn der Verteiltour im Bedienraum					

Quelle: eigene Bearbeitung arp (Marsch, Toifl)

1.3.5.2 Beladungszustand und Tourencharakteristik (Kantenstückelung) im Bedienraum

Die Verteiltour im 16. Wiener Gemeindebezirk ist in erster Linie von der Lage und Anzahl der Points of Sale (PoS) bzw. Points of Delivery (PoD) abhängig. Als weitere Einflussgrößen kommen noch die Fahrzeugklasse und die davon abhängige Nutzlast dazu, wodurch sich die Verteiltour der drei Touren folgendermaßen unterscheidet:

N₁ – KEP-Tour

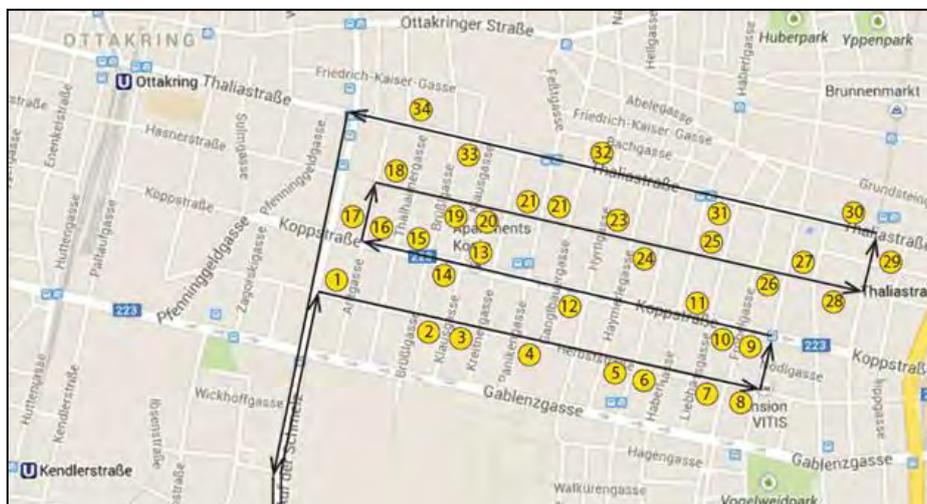
Das N₁-Fahrzeug der KEP-Tour (Tour 1) hat eine maximale Nutzlast von 0,9 t. Aufgrund der branchenspezifischen Eigenschaften wurde erfahrungsgemäß angenommen, dass bei dieser Fahrzeugklasse zwar das Volumen einigermaßen ausgelastet wird, jedoch nicht die Nutzlastkapazität des Lieferfahrzeuges. Daher wurde eine Beladung von 0,5 t angenommen, was einer Beladung von 125 Paketen mit je durchschnittlich 4 kg entspricht.

Die angenommene Route 1 der KEP-Tour-N₁ verläuft ausgehend von einem unbenannten Logistikzentrum im Raum Wiener Neudorf – Industriezentrum NÖ Süd in den Bedienraum 1160 Wien mit dichter Abfolge von Points of Delivery, meistens Privathaushalte und einige Kleinunternehmen (wie Büros und Läden), wobei jeweils zwischen 0 kg und 26 kg abgeschichtet werden. Insgesamt gibt es auf der Tour 34 Stopps, bei denen durchschnittlich 3,7 Pakete mit je rund 4 kg abgeliefert werden (s. Darstellung 1-26). Das Straßennetz im Bedienraum des „Milk Run“ ist als regelmäßiges gründerzeitliches Raster angelegt, das eine zügige Bedienung begünstigt, wobei die Anlieferpunkte an den Erschließungsstraßen

erfahrungsgemäß verkehrsbedingt leichter angefahren werden können als jene entlang der Hauptstraße, die als Bezirksgeschäftsstraße fungiert. Stellmöglichkeiten ergeben sich untertags (ca. vor 16 h) in der parkraumbewirtschafteten Zone relativ günstig. Das Lieferfahrzeug kehrt nach der Tour, allerdings mit einem Anteil der Ladung von nicht zustellbaren Sendungen (180 kg oder 36 %), wieder zum Logistiklager zurück. Eine vollständige Entladung im Bedienraum bei Partner-Läden des KEP-Dienstes ist hierbei nicht vorgesehen worden. Im Detail sieht die Abschichtungsfolge der Verteiltour folgendermaßen aus:

- | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Stopp 1: Herbststraße: -8 kg | Stopp 13: Koppstraße: -0 kg | Stopp 24: Richard-Wagn.-P.: -11 kg |
| Stopp 2: Herbststraße: -12 kg | Stopp 14: Koppstraße: -12 kg | Stopp 25: Hasnerstraße: -10 kg |
| Stopp 3: Herbststraße: -3 kg | Stopp 15: Klausgasse: -14 kg | Stopp 26: Hasnerstraße: -4 kg |
| Stopp 4: Herbststraße: -20 kg | Stopp 16: Brüllsgasse: -4 kg | Stopp 27: Kirchstetterng.: -4 kg |
| Stopp 5: Herbststraße: -2 kg | Stopp 17: Koppstraße: -7 kg | Stopp 28: Hasnerstraße: -10 kg |
| Stopp 6: Herbststraße: -6 kg | Stopp 18: Arltgasse: -22 kg | Stopp 29: Thaliastraße: -3 kg |
| Stopp 7: Herbststraße: -15 kg | Stopp 19: Hasnerstraße: -5 kg | Stopp 30: Thaliastraße: -5 kg |
| Stopp 8: Kirchstetterng.: -3 kg | Stopp 20: Hasnerstraße: -12 kg | Stopp 31: Thaliastraße: -9 kg |
| Stopp 9: Kirchstetterng.: -9 kg | Stopp 21: Hasnerstraße: -0 kg | Stopp 32: Thaliastraße: -4 kg |
| Stopp 10: Koppstraße: -8 kg | Stopp 22: Hasnerstraße: -7 kg | Stopp 33: Thaliastraße: -0 kg |
| Stopp 11: Koppstraße: -14 kg | Stopp 23: Panikengasse: -26 kg | Stopp 34: Thaliastraße: -11 kg |
| Stopp 12: Koppstraße: -10 kg | | |

Darstellung 1-26: Angenommener Routenverlauf zu beliebigen Points of Delivery im Bedienraum Wien 16



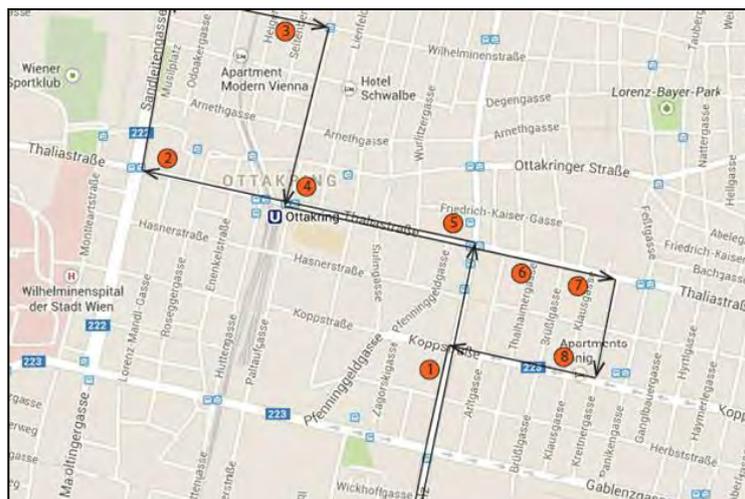
Quelle: Kartengrundlage: Google Maps; Bearbeitung: arp

N2 – LEH-Tour

Der Zu- bzw. Rücklauf von Tour 2 ist ident zu Tour 1, wodurch die Tour von einem Logistikzentrum im Raum Wiener Neudorf-Industriezentrum NÖ Süd in den Bedienraum 1160 Wien führt. Das N2-Fahrzeug der Lebensmittel-Tour 2 befördert eine Nutzlast von 4,5 t, die 9 Paletten (oder 18 Halbpaletten, die in der Lebensmittel-Logistik wegen des Handlings häufig verwendet werden) mit je etwa 500 kg (oder 250 kg) entspricht. Auch bei dieser Tour liegen alle neun Points of Sale im 16. Wiener Gemeindebezirk (s. Darstellung 1-27). Der Vorlauf bis zur ersten Filiale erfolgt mit einer Vollladungslast und der Rücklauf entspricht einer Leerfahrt. Im Detail sieht die Verteiltour folgendermaßen aus:

- | | |
|--|---|
| Stopp 1: Thaliastraße: Ladezone vor Filiale | Stopp 6: Thaliastraße: Ladezone vor Filiale |
| Stopp 2: Thaliastraße: Ladezone vor Filiale | Stopp 7: Koppstraße: Ladezone vor Filiale |
| Stopp 3: Wilhelminenstraße: Ladezone vor Filiale | Stopp 8: Possingergasse: Ladezone vor Filiale |
| Stopp 4: Ottakringerstraße: Ladezone im Innenhof | Stopp 9: Kreitnergasse: Ladezone vor Filiale |
| Stopp 5: Thaliastraße: Ladezone vor Filiale | |

Darstellung 1-27: Angenommener Routenverlauf zu beliebigen Points of Sales

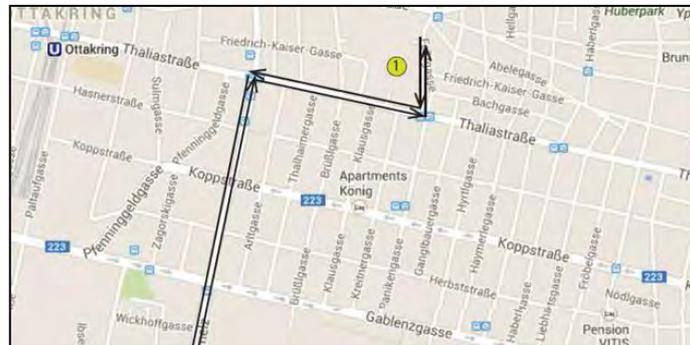


Quelle: Kartengrundlage: Google Maps; Bearbeitung: arp

N3 – Industrielle Zuliefertour

Der Hin- und Rücklauf der Route 3 (N3-Fahrzeug) ist ident zu jenen von Tour 2 und 3. Start-/Endpunkt liegt daher im Logistikzentrum im Raum Wiener Neudorf – Industriegebiet NÖ Süd und die Tour führt in den 16. Wiener Gemeindebezirk. Das N3-Fahrzeug der Tour 3 hat eine Nutzlast von 25 t, wovon 20 t ausgeschöpft werden. Bei dieser Tour gibt es genau genommen keine Verteiltour, da es keine Abschichtungen, sondern nur eine Beladung gibt. Es handelt sich hierbei um eine Fahrt vom Zentrallager im Süden von Wien bis zur Produktionsstätte in den 16. Wiener Gemeindebezirk, und wieder zurück. Dies bedeutet, dass der Vorlauf bis zur Produktionsstätte einer Abholfahrt (also auch einer Leerfahrt) entspricht und der Rücklauf einer Vollladungslast. Die Beladung des Lieferfahrzeuges erfolgt auf privatem Grund der Produktionsstätte.

Darstellung 1-28: Angenommener Routenverlauf im Zulieferverkehr von einem innerstädtischen Produktionsstandort zu einem Großabnehmer im Speckgürtel



Quelle: Kartengrundlage: Google Maps; Bearbeitung: arp

Behandlung der Haltezeiten

Sowohl die transportwirtschaftlichen (z.B. Entladung) als auch die infrastrukturellen (z.B. Verkehrslichtsignalanlage, Einbiegen in Vorrangstraße) Einflussfaktoren können das Fahrzeug zum Stillstand zwingen. Hierbei handelt es sich um zeitverzehrende Knoten, denen, anders als den Kanten, kein LoS zugewiesen werden kann. Der Stillstand wird daher mittels einer entsprechenden Haltezeit in der Simulation berücksichtigt. Die Dauer der infrastrukturell bedingten Haltezeit (in weiterer Folge auch Stopp genannt) wurde standardisiert mit 30 Sekunden berücksichtigt.

Die Haltezeit für das Be- bzw. Entladen der Fahrzeuge bei der Kundschaft ist in erster Linie von der Branche und dem Handling am Fahrzeug abhängig und wird getrennt behandelt. Für die Abschichtung der Pakete bei Tour 1 (KEP-Dienste) mit der Fahrzeugklasse N1 wurde jeweils ein Stopp von 6 Minuten (360 Sekunden) berücksichtigt. Bei Tour 2 (Lebensmitteleinzelhandel) wurde für die Abschichtung bei den Filialen jeweils eine Haltezeit von 10 Minuten (600 Sekunden) angesetzt. Für die Zuliefer-Tour 3 sind 20 Minuten (1.200 Sekunden) erforderlich, weil das N3-Fahrzeug bei der Produktionsstätte für die Fahrt zum Warenempfang im Zentrallager beladen wird.

Quellenhinweise zu Kapitel 1.3:

VAN BASSHUYSEN, R.; SCHÄFER, F. (Hrsg.) (2010): Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen. Komponenten. Systeme. Perspektiven. 5. Auflage. Wiesbaden

DIESTEL (2006): Graphentheorie. Springer Verlag. 358 Seiten. Heidelberg

DÖRR (2001): Planungsstrategien zum Wirtschaftsverkehr in Metropolregionen. S. 49-59. In: Raumforschung und Raumordnung 1/2001. Bonn.

DÖRR, H. et al. (2010): Friendly Supply Chains. Indikatorenkonzept für die verkehrsträger-übergreifende Bewertung von Transportketten am Beispiel der Supply Chains zu den NST/R-Gütergruppen Wein, Bier, Fruchtsaft und Milchprodukte. Endbericht zur Studie im Rahmen des izv-Forschungsprogrammes des BMVIT. IVS-Schriften Band 35. Wien

HÖRL, B. et. al. (2012): Metro.Freight.2020. Transportmittelauswahl für die mittelbetriebliche Wirtschaft. Strategie zur Stärkung und effizienten Nutzung der Schieneninfrastruktur in Ballungsräumen. Studie finanziert im Forschungs- und Technologieprogramm izv2s plus herausgegeben vom BMVIT, Innovation und Technologie. Wien

KÄFER (2011): Straßenverkehrszählung Wien 2010 – Auswertung Gemeindestraßen A + B. Wien: MA 18.

1.4 Ergebnisse und Interpretation der ersten Fahrzyklen-Simulation der Mustertransportläufe

1.4.1 Fahrzyklus für Nutzfahrzeugklasse 1 im KEP-Dienst

1.4.1.1 Definition des Referenzzyklus und der verkehrslogistischen Randbedingungen

Es handelt sich um eine Verteilfahrt eines KEP-Dienstes, die den Charakter eines spontanen Suchverkehrs hat. Die Annahmen und die Herleitung der Mustertransportläufe sind in Kapitel 1.3.5 beschrieben worden. Hier werden nur die maßgeblichen verkehrslogistischen Parameter nochmals angeführt.

❑ Routenverlauf und Kantenstückelung

Die angenommene Route der KEP-Tour-N1 verläuft ausgehend von einem Logistikzentrum im Raum Wiener Neudorf – Industriezentrum NÖ Süd in den Bedienraum 1160 Wien mit dichter Abfolge von Points of Delivery, wie zuvor in Kapitel 1.3.5.2 eingehend beschrieben wurde..

❑ Fahrzeuggewicht und Beladungszustände

- N1 Kastenwagen 3,5 t höchstzulässiges Gesamtgewicht (GVW⁹)
- 2,1 t Eigenmasse, 1,4 t Nutzlastpotenzial
- 0,5 t Beladung angenommen (Volumen ausgelastet) = 125 Pakete à durchschnittlich 4kg
- Abschichtungen bei Privathaushalten oder Kleinunternehmen
- Abschichtungen zwischen 0 kg und 26 kg, 34 Stopps mit durchschnittlicher Abschichtung von 3,7 Pakete à durchschnittlich 4 kg pro Stopp
- Vollladungslast bis zum/zur ersten KundIn; Rückfahrt mit Paketen ohne Zustellmöglichkeit (180 kg)

❑ Verkehrs- und logistikbedingte Stopps

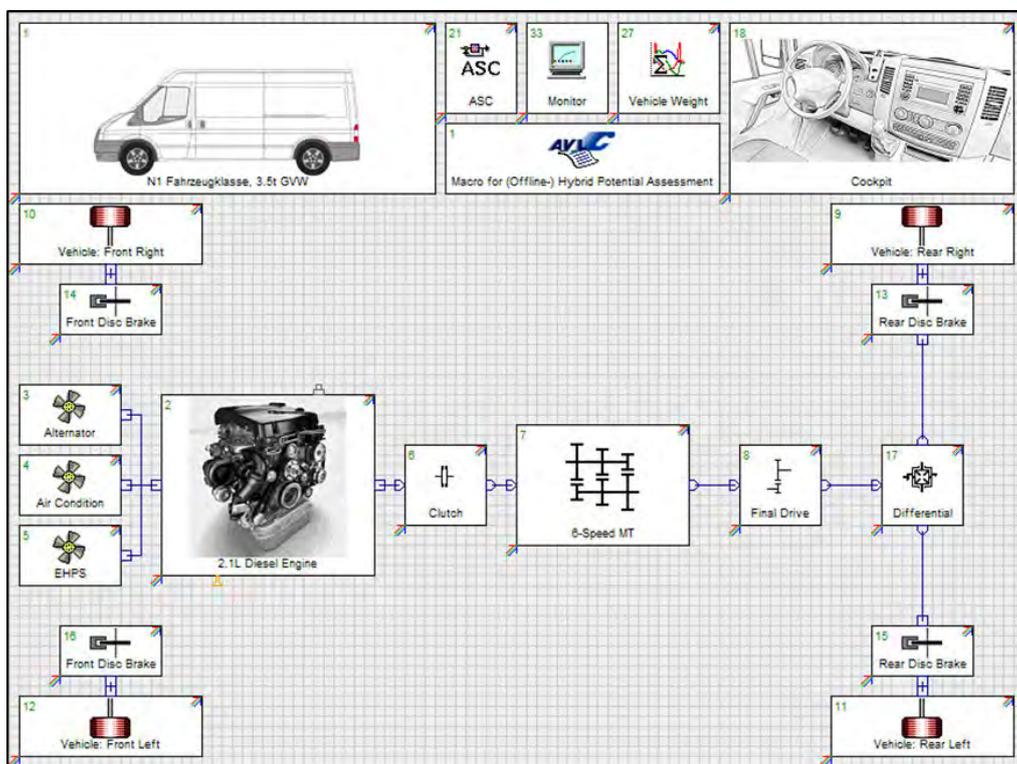
- Haltezeit zum Ausladen 6 Minuten
- Haltezeit bei Verkehrslichtsignalanlage oder bei Einbiegen in Vorrangstraße 30 Sekunden

⁹ GVW = Gross Vehicle Weight bzw. zulässiges Gesamtgewicht

1.4.1.2 Technische Beschreibung des N1-Fahrzeugmodells

Als Referenzfahrzeug der Klasse N1 dient ein Kastenwagen mit 3,5 t höchstzulässigem Gesamtgewicht (GVW) mit 2,1 t Eigenmasse und 1,4 t Nutzlastpotenzial. Als Basismotorisierung wurde eine Reihen 4-Zylinder Turbodiesel-VKM^h mit 2,1 l Hubraum gewählt, die ein maximales Drehmoment von 360 Newtonmeter (Nm) bei einem Drehzahlbereich von 1.400 bis 2.400 Umdrehungen pro Minute (rpm) sowie eine maximale Leistung von 120 Kilowatt (kW) bei einer Drehzahl von 3.800 Umdrehungen pro Minute aufweist (kurz: 360 Nm@1.400-2.400 rpm, 120 kW@3.800 rpm). Als Getriebe dient ein 6-Gang-Handschaltergetriebe mit Hinterachsantrieb und einer verbrauchsorientierten Schaltstrategie.

Darstellung 1-29: AVL CRUISE-Simulationsmodell des Referenzfahrzeuges der Klasse N1



Quelle: eigene Darstellung (AVL)

Das Fahrzeugmodell (s. Darstellung 1-29) des Testfahrzeugs N1 besteht aus den Komponenten des Antriebsstrangs bzw. des Fahrzeugaufbaus, der den Fahrwiderstand beinhaltet, sowie aus der Betriebsstrategie (beispielsweise die Aktivierung der Start/Stop-Einrichtung nach dem Erreichen der Betriebstemperatur) und dem Fahrer (z.B. Gangwahl).

Die Triebstrangkomponenten sind unter Berücksichtigung der jeweiligen physikalischen Eigenschaften und Energieverluste als Einzelkomponenten modelliert und mechanisch verbunden. Das so konfigurierte Fahrzeugmodell durchläuft in der Simulation die vorgegebenen Testzyklen.

^h VKM = Verbrennungskraftmotor

1.4.1.3 Simulationsergebnisse

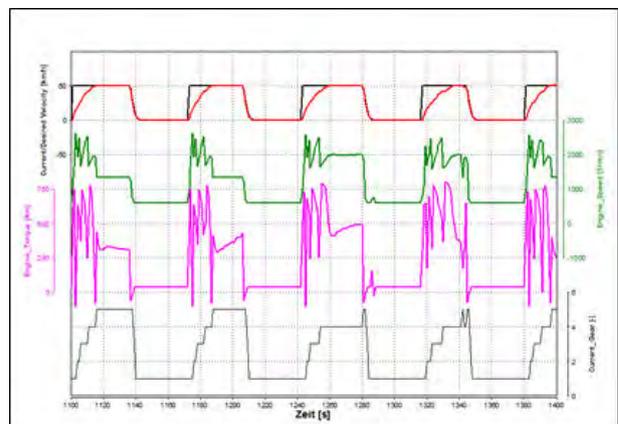
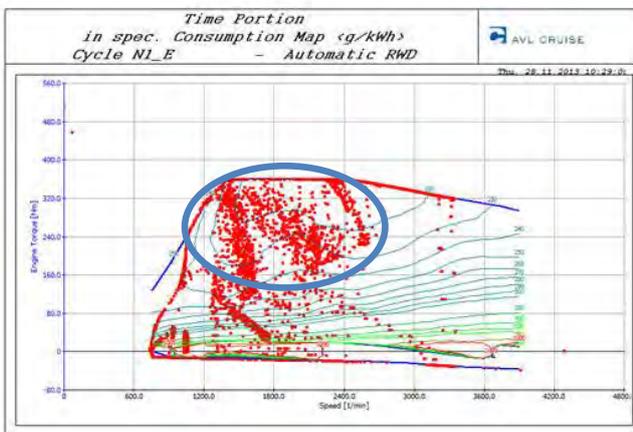
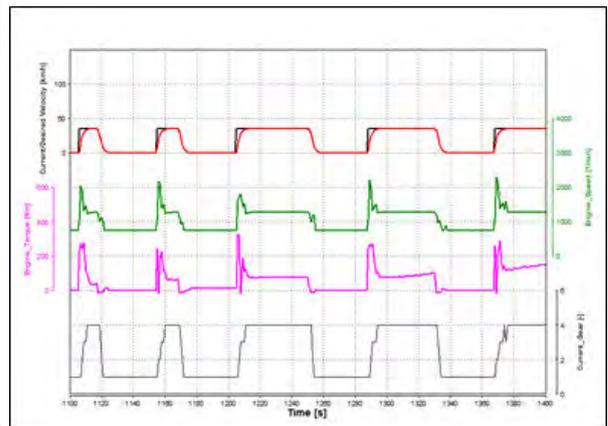
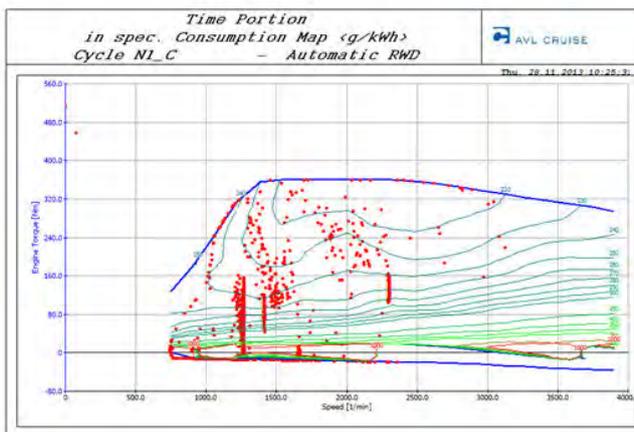
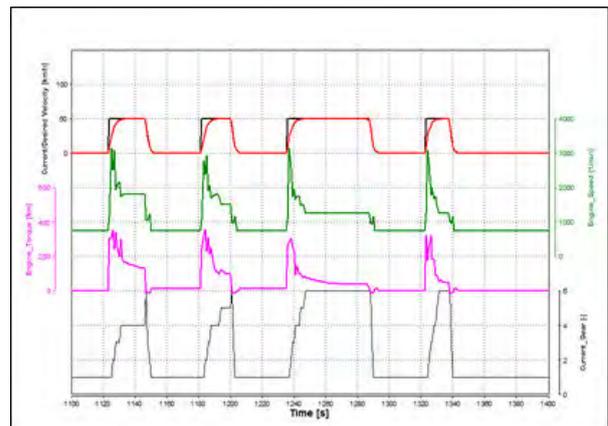
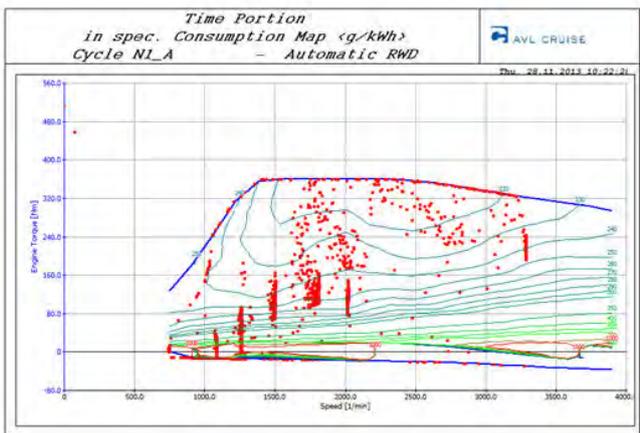
Die Simulationsergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen (s. Darstellung 1-31) und Motorkennfeldern (s. Darstellung 1-30) dargestellt und werden anschließend aus verkehrslogistischer und -ökologischer Sicht interpretiert. Die Darstellungen zeigen untereinander die verschiedenen Levels of Service A*, C* und E*. Linkerhand die Ergebnisse der Motorlastkollektive als Maß für den Kraftstoffverbrauch im Motorkennfeld und rechterhand Ergebnisdiagramme zum Fahr- und Schaltverhalten entlang eines repräsentativen Ausschnittes der Referenzstrecke für das N1-Fahrzeug.

Die in dieser F&E-Dienstleistung betrachteten kantenförmigen Geschwindigkeitsabschnitte werden jeweils aus dem Fahrzeugstillstand (Leerlaufphase) angefahren, wobei sich aufgrund der Trägheiten in Fahrzeug und Triebstrang ein verzögertes Annähern an die Zielgeschwindigkeit ergibt, was in den Bildern rechts gut zu erkennen ist (die tatsächliche Fahrzeuggeschwindigkeit in rot folgt der Vorgabe in schwarz verzögert). Dementsprechend findet das Anfahren typischerweise immer unter Volllast statt, was sich auch in den Motorlastkollektiven an den zahlreichen Betriebspunkten entlang der Kurve maximalen Drehmomentes erkennen lässt.

Die restlichen Motor-Betriebspunkte verteilen sich dann charakteristisch über große Bereiche des Verbrauchskennfeldes, wobei insbesondere solche mit geringem Moment und entsprechend höheren spezifischen Kraftstoffverbrauchswerten gut für eine nachhaltige Effizienzsteigerung des Motorbetriebes durch Hybridisierung geeignet sind. Im Level of Service E* findet das Fahren durch die vielen Start/Stopp-Ereignisse bereits hauptsächlich im steten Wechsel zwischen Beschleunigung und Bremsen statt, konstantes Fahren im niedrigen oder mittleren Leistungsbereich ist kaum noch zu sehen, weshalb sich auch ein besonders massives Lastkollektiv im hohen Lastbereich zeigt (blau markiert). Die größere Anzahl Betriebspunkte relativ zu den Levels of Service A* und C* stammt hier von der größeren Anzahl an Rechenschritten in der Simulation aufgrund des dynamischeren Fahrzyklus.

Darstellung 1-30 (li.): Motorlastkollektive als Maß für den Kraftstoffverbrauch im Motorkennfeld für N1-Fahrzyklus nach Verkehrszustand (Level of Service A*, C*, E*)

Darstellung 1-31 (re.): Diagramme zu Schaltverhalten (grau), Drehmoment (rosa), Motordrehzahl (grün) und Fahrgeschwindigkeit (rot) entlang eines Ausschnittes der Referenzstrecke für N1 bei Level of Service A*, C* und E*



Quelle: Berechnung mit AVL-Cruise

1.4.1.4 Verkehrsplanerische Interpretation der N₁-Points of Delivery-Verteiltour (KEP-Dienst)

Wie bei den anderen Nutzfahrzeugmustern nachfolgend erweist sich auch beim N₁ der schlechte Verkehrszustand als aussagekräftiger Einstieg in eine Interpretation. Die Punktwolken konzentrieren sich bei LoS-C* und LoS-E* auffällig in der Hälfte des niedrigen Drehzahlbereiches, was vor allem daran liegen kann, dass keine Freilandtour, sondern das urbane Straßennetz frequentiert wird. Lediglich bei LoS-A* kommen auch höhere Drehzahlen und Fahrgeschwindigkeiten zum Tragen. Die verkehrslogistische Eigenart von KEP-Diensten, nämlich spontane Suchverkehre, ähnlich der Parkplatzsuche von Pkw, bildet sich bei LoS-C* und LoS-A* deutlicher in der Streuung des Kraftstoffverbrauches ab, als bei LoS-E*, der deswegen so dichte Häufungen aufweist, weil neben den vielen zu bedienenden Stopps im Auslieferbezirk die Menge der (roten) Betriebspunkte aufgrund des stockenden Verkehrsflusses stark ansteigt.

Das Einsparungspotenzial wird daher hauptsächlich in der Bündelung von Paketabholstationen liegen, wie sie in letzter Zeit immer mehr eingerichtet werden. Dann können nämlich optimiert beladene und unter Umständen größere (N₂) Fahrzeuge eingesetzt werden, für die die Anlieferpunkte mit Ladestreifen ausgestattet werden können. Dabei könnte die Verbesserung des Nutzlastfaktors im Lieferfahrzeug zusammen mit einer gebündelten Abschichtung an Anliefer-Stationen auch mit einer Hybridisierung des Fahrzeuges, u.a. zur lokalen Umweltentlastung, gekoppelt werden.

1.4.2 Fahrzyklus für Nutzfahrzeugklasse 2 im Distributionsverkehr für den Lebensmittelhandel

1.4.2.1 Definition des Referenzzyklus und der verkehrslogistischen Randbedingungen

Es handelt sich um eine Lieferfahrt zur werktäglichen Versorgung von Filialen von Handelsketten im dicht bewohnten Stadtgebiet, die logistisch vorgeplant regelmäßig in einem gewissen Lieferzeitfenster stattfinden. Die Annahmen und die Herleitung der Mustertransportläufe sind in Kapitel 1.3 beschrieben worden. Hier werden nur die maßgeblichen verkehrslogistischen Parameter nochmals angeführt.

Die Charakteristik des Straßennetzes im Bedienraum ist dieselbe, wie in Kapitel 1.4.1.1. bereits beschrieben worden ist.

❑ Fahrzeuggewicht und Beladungszustände

- N₂-Fahrzeug 12 t höchstzulässiges Gesamtgewicht mit 4,5 t Eigenmasse und 7,5 t Nutzlastpotenzial
- 4,5 t Beladung angenommen (9 Abschichtungen = 9 Paletten à 500 kg)
- Vollladungsfahrt mit Startgewicht des Fahrzeuges von 9 t bis zum 1. Point of Sale
- Rückfahrt ohne Beladung

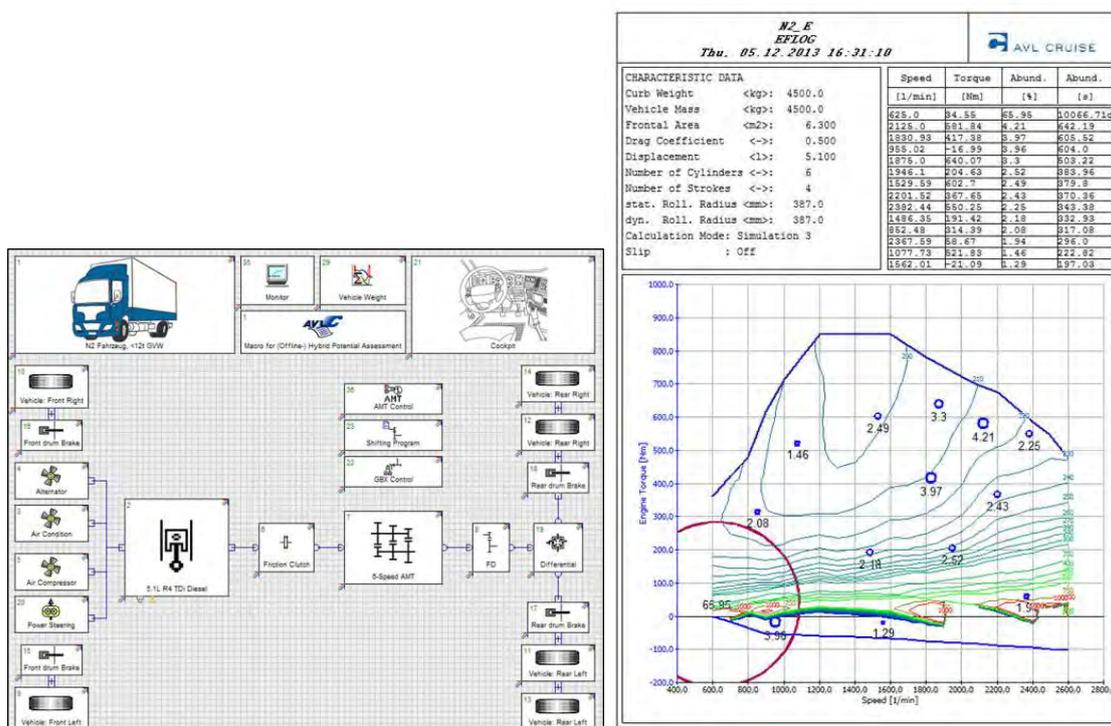
❑ Verkehrs- und logistikbedingte Stopps

- Haltezeit bei PoS zum Ausladen 8 Minuten
- Haltezeit bei Verkehrslichtsignalanlage oder bei Einbiegen in Vorrangstraße 30 Sekunden

1.4.2.2 Technische Beschreibung des N2-Fahrzeugmodells

Als Referenzfahrzeug der Klasse N2 dient ein LKW mit 12 t höchstzulässigem Gesamtgewicht (GVW) mit 4,5 t Eigenmasse und 7,5 t Nutzlastpotenzial. Als Basismotorisierung wurde eine EURO VI Reihen 4 Zylinder Turbodiesel-VKM mit 5,4 l Hubraum gewählt, die ein maximales Drehmoment von 850 Newtonmeter (Nm) bei einem Drehzahlbereich von 1.200 bis 1.600 Umdrehungen pro Minute (rpm) sowie eine maximale Leistung von 155 Kilowatt (kW) bei einer Drehzahl von 2.200 Umdrehungen pro Minute aufweist (kurz: 850 Nm@1.200-1.600 rpm, 155 kW@2.200 rpm). Als Getriebe dient ein automatisiertes 6-Gang-Handschaltergetriebe mit Hinterachsantrieb und einer verbrauchsorientierten Schaltstrategie.

Darstellung 1-32: AVL CRUISE-Simulationsmodell des Referenzfahrzeuges der Klasse N2



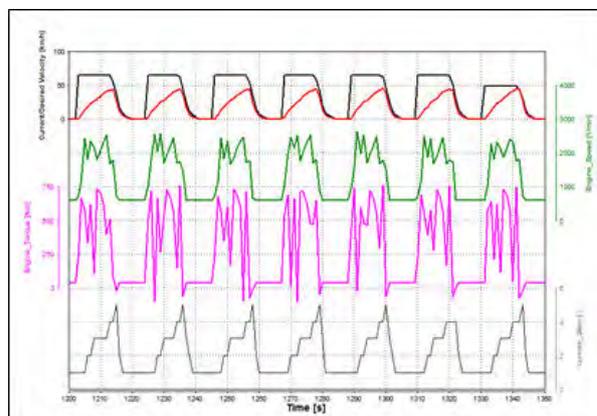
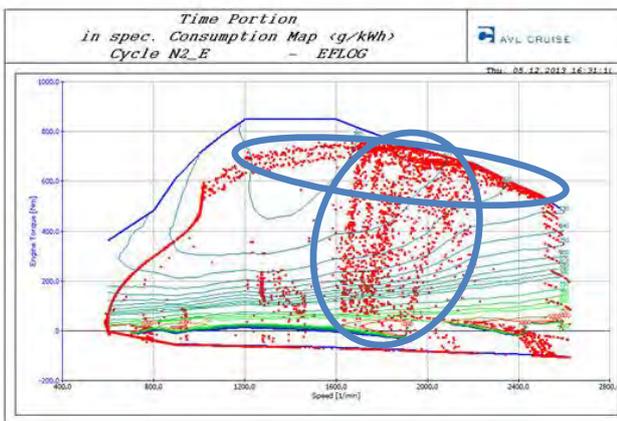
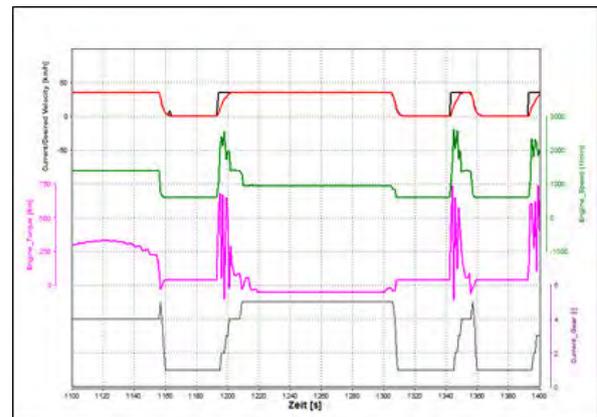
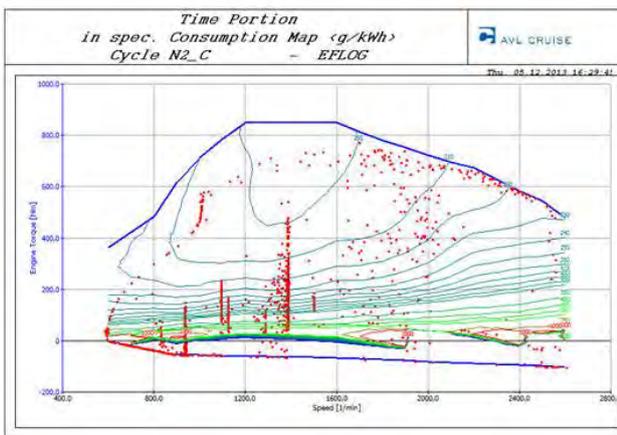
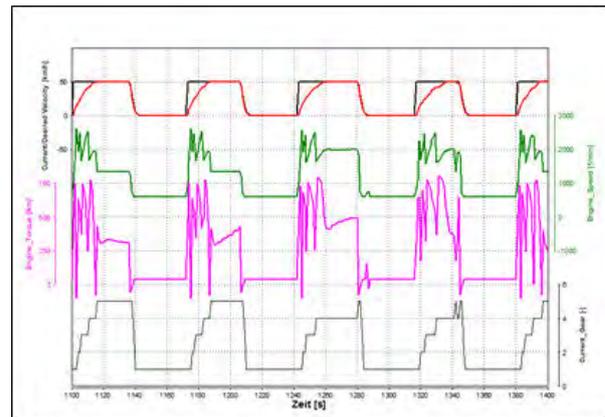
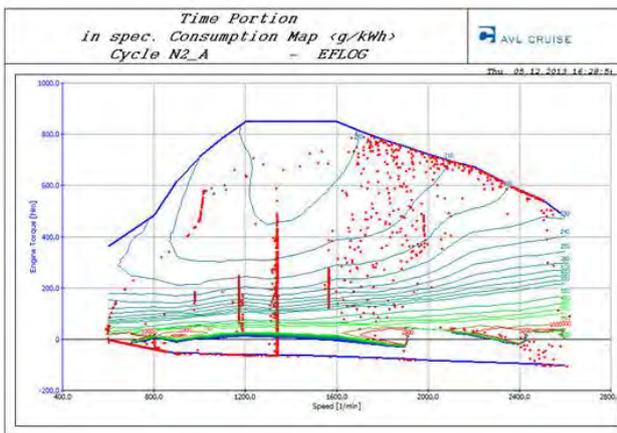
Quelle: eigene Darstellung (AVL)

1.4.2.3 Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen (s. Darstellung 1-34) und Motorkennfeldern (s. Darstellung 1-33) dargestellt und werden anschließend aus verkehrslogistischer und -ökologischer Sicht interpretiert. Die Darstellungen zeigen grundsätzlich ähnliches Verhalten wie für die Klasse N1 (siehe oben). Aufgrund der höheren Fahrzeugmasse finden die jeweiligen Beschleunigungsvorgänge aus dem Fahrzeugstillstand stärker verzögert statt, wodurch sich das Lastkollektiv des Motorbetriebes deutlicher hin zu den Bereichen maximaler Leistung verschiebt (gut zu sehen für Level of Service E*, blau markiert). Auch folgt daraus ein Ausdünnen der Lastkollektive im niedrigen und mittleren Lastbereich, was letztlich zu einem niedrigeren Hybridisierungspotenzial als in der Klasse N1 führt.

Darstellung 1-33 (li.): Motorlastkollektive als Maß für den Kraftstoffverbrauch im Motorkennfeld für N2-Fahrzyklus nach Verkehrszustand (Level of Service A*, C*, E*)

Darstellung 1-34 (re.): Diagramme zu Schaltverhalten (grau), Drehmoment (rosa), Motordrehzahl (grün) und Fahrgeschwindigkeit (rot) für Ausschnitte entlang der Referenzstrecke für N2 bei Level of Service A*, C* und E*



Quelle: Berechnung mit AVL-Cruise

1.4.2.4 Verkehrsplanerische Interpretation der N₂-Points of Sale-Liefertour im Lebensmittelhandel

Die Punktwolke massiert sich im höheren Drehzahlbereich vor allem bei schlechtem Verkehrszustand LoS-E*, womit sich beim Stop-and-Go-Verkehr auch ein erhöhter Kraftstoffverbrauch bei niedrigem Drehmoment ergibt, aber ebenso beim Zwischendurch-Beschleunigen der Plafond des Drehmoments in Steigungstrecken erreicht wird. Bei LoS-A* und -C* gibt es Luft nach oben in Richtung höchsten Drehmoments und geringem Kraftstoffverbrauch, weil bei LoS-A* ohnehin schneller, als es günstiger wäre, gefahren wird und bei LoS-C* das höchste Drehmoment aufgrund des angenommenen Beladungsfaktors (60 % der Nutzlastgewichtskapazität auf der Zulauffahrt und Leerfahrt zurück) und der gleichmäßigeren Fahrdynamik weniger angefordert wird.

Diese Situation ist typisch für tägliche Lebensmittel-Beladungen zur Belieferung innerstädtischer Points of Sale mit relativ kleiner Verkaufsfläche. Weitere Einsparpotenziale liegen daher eher im Bereich der Standortpolitik und Logistikorganisation des Empfänger-Unternehmens als im Bereich der Fahrzeugtechnik.

1.4.3 Fahrzyklus für Nutzfahrzeugklasse 3 im Zulieferverkehr an Großabnehmer

1.4.3.1 Definition des Referenzzyklus und der verkehrslogistischen Randbedingungen

Es handelt sich um eine Lieferfahrt eines innerstädtisch gelegenen Produktionsstandortes zum Zentrallager eines Empfängers des Großhandels, die vertraglich vereinbart mit Werksfuhrpark (oder als Kontraktlogistik) regelmäßig durchgeführt wird. Als Besonderheit ist es ein Punkt-zu-Punkt-Verkehr, der nur verkehrsbedingte Stopps aufweist. Die Annahmen und die Herleitung der Mustertransportläufe sind in Kapitel 1.3 beschrieben worden. Hier werden nur die maßgeblichen verkehrslogistischen Parameter nochmals angeführt.

Die Charakteristik des Straßennetzes im 16. Bezirk, wo der Produktionsstandort gelegen ist, wurde in Kapitel 1.4.1.1. bereits beschrieben. Es werden aber nur Hauptstraßen oder außerhalb des 16. Bezirkes auch Hochleistungsstraßen frequentiert.

□ Fahrzeuggewicht und Beladungszustände

- N₃-Fahrzeug mit 40 t höchstzulässigem Gesamtgewicht, 15 t Eigenmasse und 25 t Nutzlastpotenzial
- Angenommene Beladung: 20 t; ergibt ein Startgewicht des Fahrzeuges von 35 t
- Einmalige Beladung; keine Abschichtung
- Eine Vollladungsfahrt (mit 20 t Zuladung) und eine Leerfahrt

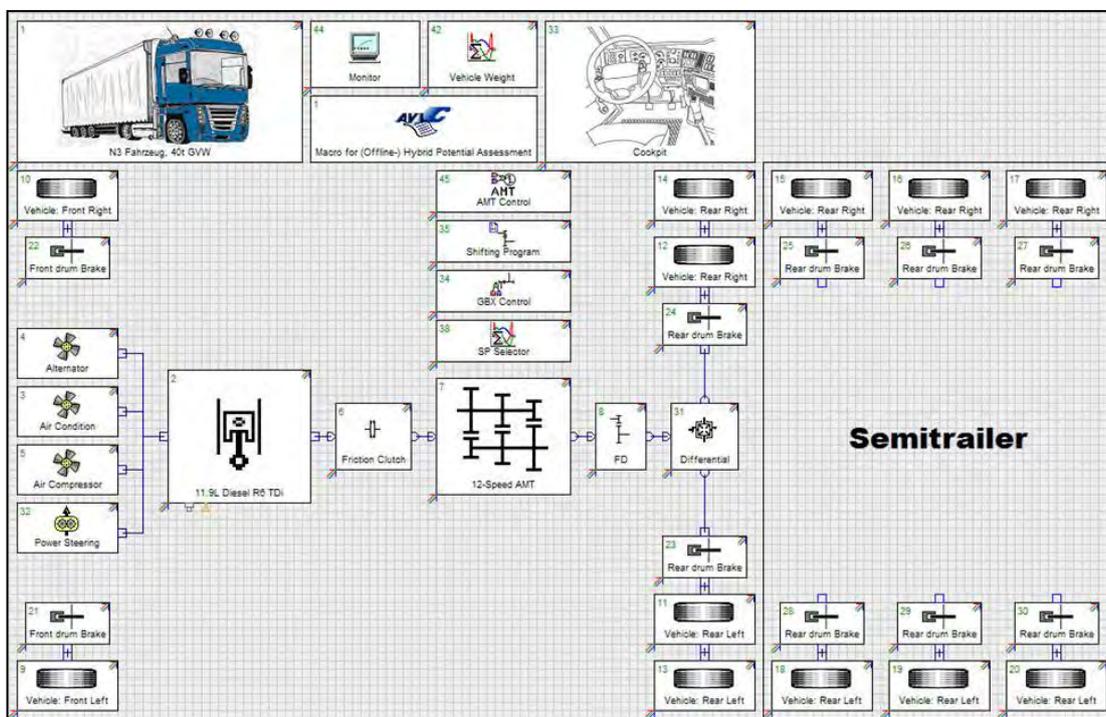
□ Verkehrs- und logistikbedingte Stopps

- Haltezeit zum Beladen 20 Minuten
- Haltezeit bei Verkehrslichtsignalanlage oder bei Einbiegen in Vorrangstraßen 30 Sekunden

1.4.3.2 Technische Beschreibung des N3-Fahrzeugmodells

Als Referenzfahrzeug der Klasse N3 dient ein Sattelzug-LKW mit 40 t höchstzulässigem Gesamtgewicht (GVW) mit 15 t Eigenmasse und 25 t Nutzlastpotenzial. Als Basismotorisierung wurde eine EURO IV Reihen 6 Zylinder Turbodiesel-VKM mit 12 l Hubraum gewählt, die ein maximales Drehmoment von 2.200 Newtonmeter (Nm) bei einer Drehzahl von 1.100 Umdrehungen pro Minute (rpm) sowie eine maximale Leistung von 330 Kilowatt (kW) bei einer Drehzahl von 1.800 Umdrehungen pro Minute aufweist (kurz: 2.200Nm@1.100 rpm, 330kW@1.800 rpm). Als Getriebe dient ein automatisiertes 12-Gang-Handschaltergetriebe mit Hinterachsantrieb und einer verbrauchsorientierten Schaltstrategie. Ein dreiachsiges Anhängerfahrzeug (Semitrailer) dient der Ladungsaufnahme und ist in den Simulationen berücksichtigt.

Darstellung 1-35: AVL CRUISE-Simulationsmodell des Referenzfahrzeuges der Klasse N3



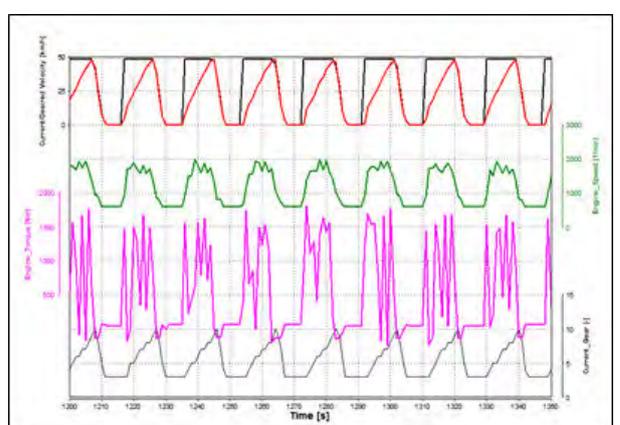
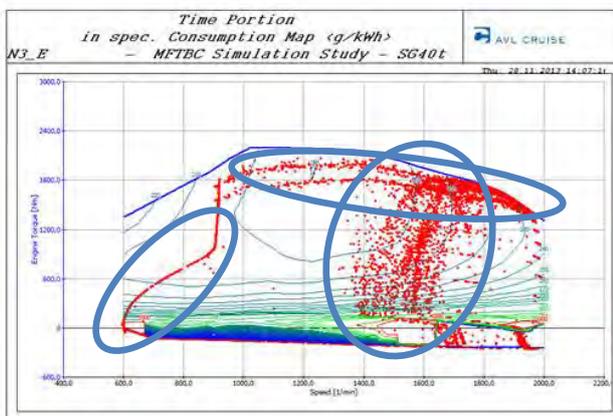
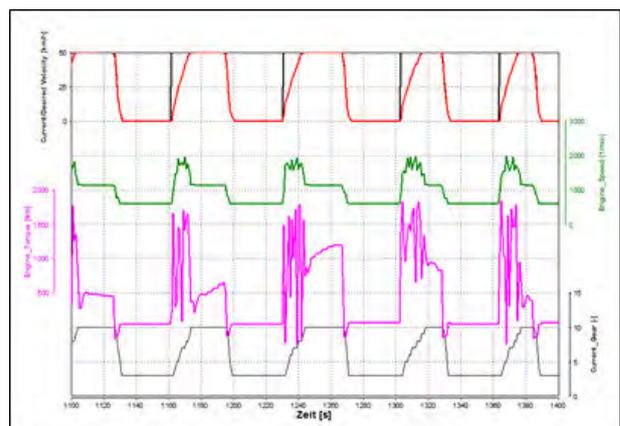
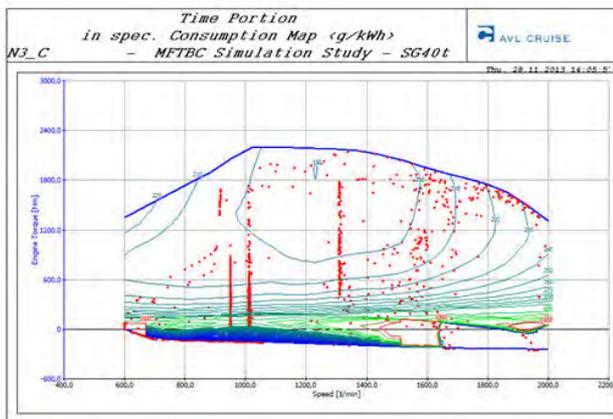
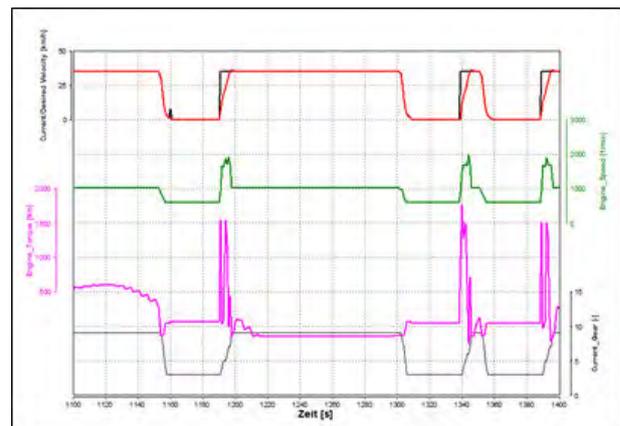
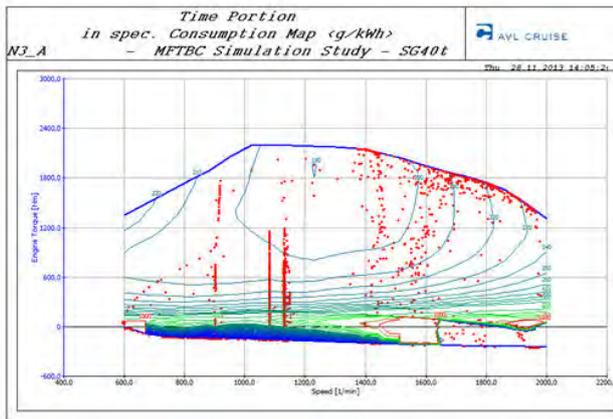
Quelle: eigene Darstellung (AVL)

1.4.3.3 Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen (s. Darstellung 1-37) und Motorkennfeldern (s. Darstellung 1-36) dargestellt und werden anschließend aus verkehrslogistischer und -ökologischer Sicht interpretiert. Die Darstellungen zeigen wiederum ähnliches Verhalten wie für die Klasse N1 und N2 (siehe oben). Aufgrund der noch deutlich höheren Fahrzeugmasse finden die jeweiligen Beschleunigungsvorgänge aus dem Fahrzeugstillstand entsprechend noch stärker verzögert statt, wodurch sich das Lastkollektiv des Motorbetriebes massiv hin zu den Bereichen maximaler Leistung verschiebt (gut zu sehen für Level of Service E, blau markiert). Auch folgt daraus ein noch stärkeres Ausdünnen der Lastkollektive im niedrigen und mittleren Lastbereich, was letztlich zu einem relativ niedrigen Hybridisierungspotential führt, verglichen mit den Klassen N1 und N2.

Darstellung 1-36 (li.): Motorlastkollektive als Maß für den Kraftstoffverbrauch im Motorkennfeld für N3-Fahrzyklus nach Verkehrszustand (Level of Service A, C, E)

Darstellung 1-37 (re.): Diagramme zu Schaltverhalten (grau), Drehmoment (rosa), Motordrehzahl (grün) und Fahrgeschwindigkeit (rot) entlang eines Ausschnittes der Referenzstrecke für N3 bei Level of Service A, C und E



Quelle: Berechnung mit AVL-Cruise

1.4.3.4 Verkehrsplanerische Interpretation der N₃-Industrielle Zulieferfahrt

Die erste Feststellung betrifft die vergleichende Betrachtung der Motorzustandsbilder in Abhängigkeit vom LoS*, wo sich der LoS-E* deutlich von LoS-A* und LoS-C* visuell abhebt. Zum einen, weil aufgrund der verlängerten Reisezeit mehr (rote) Betriebspunkte (ca. einer pro hundertstel Sekunde!) auftauchen, zum anderen, weil die Zahl der verkehrsbedingten Stopps sich vervielfacht hat, was wiederum die Varianz der Motorzustände (Breite und Flächendeckung der Punktelwolke) vergrößert.

Bei LoS-E* steigt der Kraftstoffverbrauch aber dramatisch auf das 5,5-fache unter Berücksichtigung des Höhenprofils und ohne dessen Berücksichtigung sogar um das 6,3-fache an (s. Tabelle 1-31). In den hier dargestellten Motorkennfeldern sind sowohl die Volllastfahrt als auch die Leerfahrt retour gemeinsam eingezeichnet, wie das dem Logistikprozess einer exklusiven Zulieferfahrt entspricht. Die N₃-Diagramme zeigen besonders eindrücklich den Einfluss der Verkehrszustände auf die Fahrdynamik, weil es nur verkehrsbedingte Stopps an VLSA-geregelten Straßenkreuzungen und durch Abbiegevorgänge gibt.

Solche Güterverkehre sollten also aktiv stauverdächtige Zeiträume vermeiden. Das allein ist aber keine große Erkenntnis. Generell ist bei Engpässen im Netz vor allem in der Verkehrsorganisation das Linksabbiegen von Schwerfahrzeugen möglichst zu vermeiden und eine Rechtabbiegeschleife zu bevorzugen. Auch wenn sie den Lkw-Weg verlängert, kann derart in der Regel die Verkehrssituation insgesamt flüssiger gestaltet werden.

1.4.4 Resümee zur ersten Fahrzyklen-Simulation von Mustertransportläufen mit konventionellen Antrieben

1.4.4.1 Kraftstoffverbrauch konventioneller Dieselantriebe nach verkehrslogistischen Szenarien

Bei der ersten Simulation wurde jeder der drei Mustertransportläufe (Unterscheidung aufgrund der Fahrzeugklassen N₁, N₂, N₃) mit jedem der drei dazu definierten Levels of Service (LoS-A*, LoS-C*, LoS-E*) berechnet. Dabei wurde der Kraftstoffverbrauch konventioneller Diesel-Antriebe simuliert. Der Kraftstoffverbrauch als Schlüsselergebnis, gemessen in Liter Diesel pro 100 km, kann für die drei Touren mit und ohne Höhenprofil gegenübergestellt bzw. innerhalb der Fahrzeugklassen und der Levels of Service verglichen werden.

Der Einfluss des Höhenprofils auf den Kraftstoffverbrauch ist durch die unterschiedlichen Ergebnisse der Fahrzeugklassen und LoS nicht eindeutig feststellbar. Allgemein lässt sich jedoch behaupten, dass bei Berücksichtigung des Höhenprofils (mittlere Spalte) der Kraftstoffverbrauch nur geringfügig höher ist, in zwei der neun Fälle sinkt er sogar leicht. Bei der Fahrzeugklasse N₃ und dem LoS-C* ist der Verbrauch im Vergleich mit einem komplett flachen Mustertransportlauf um 11,5 % höher. Dies ist jedoch der extremste Unterschied. Beim LoS-E* spielt das Höhenprofil eigentlich keine Rolle. Zusammengefasst zeigt die Tabelle deutlich, dass der Kraftstoffverbrauch durch das Höhenprofil kaum beeinflusst wird. Die Höhenunterschiede von kumuliert ca. 220 m sind, bezogen auf die Länge der Zulaufstrecke von ca. 17 km, zu gering. Aus diesem Grund kann das Höhenprofil in der zweiten Simulation vernachlässigt werden.

Tabelle 1-31: Kraftstoffverbrauch nach Level of Service und Fahrzeugklasse mit und ohne Höhenprofil des Laufweges

Kraftstoffverbrauch in l/100km		
N1	Tour mit Höhenprofil	Tour ohne Höhenprofil
LoS-A	16,43	16,45
LoS-C	13,29	13,28
LoS-E	33,96	33,47
N2	Tour mit Höhenprofil	Tour ohne Höhenprofil
LoS-A	24,43	23,26
LoS-C	20,71	20,28
LoS-E	80,96	80,27
N3	Tour mit Höhenprofil	Tour ohne Höhenprofil
LoS-A	42,54	39,10
LoS-C	32,71	28,93
LoS-E	182,83	182,89

Quelle: eigene Darstellung (AVL: Huss)

Die Gegenüberstellung des Treibstoffverbrauchs bei unterschiedlichen LoS innerhalb einer Fahrzeugklasse ist wohl am interessantesten, da der LoS von der Geschwindigkeit abhängt, welche noch am ehesten beeinflussbar bzw. steuerbar ist. Auffallend ist, dass der Verbrauch nicht bei LoS-A* am geringsten ist, sondern bei LoS-C*. Ein Grund dafür ist, dass der Treibstoffverbrauch zwischen 30 km/h und 70 km/h am kleinsten ist und ein großer Teil der Tour auf der Hochleistungsstraße stattfindet, wo die v_{max} bei LoS-A* bei 80 km/h und bei LoS-C* bei 65 km/h liegt. Bei LoS-E* nehmen die verbrauchten Liter an Kraftstoff exponentiell zu, da ein konstantes Fahren nicht möglich ist.

Je schwerer das Fahrzeug ist, desto länger dauert es, bis die v_{max} erlangt wird, falls diese überhaupt erreicht wird. Durch die Häufigkeit der Stopps bei LoS-E*, welche durch den Stop-and-Go-Verkehr unvermeidbar sind, kann durch die Trägheit des Fahrzeugs so gut wie nie mit der Zielgeschwindigkeit gefahren werden, da lediglich Anfahrvorgänge durchgeführt werden, die noch vor Erreichen der Zielgeschwindigkeit abgebrochen werden müssen.

Aus der ersten Simulation können daher folgende Aussagen geschlossen werden:

- Bei konventionellen Antrieben ist ein konstantes Fahren mit möglichst wenigen Anfahrten und mittlerer Geschwindigkeit am kraftstoffsparendsten.
- Je dynamischer hingegen das Fahrverhalten ist, desto mehr könnte der Hybridantrieb profitieren. Deshalb hat ein Fahrzeug im LoS-E* durchaus Potenzial zur Hybridisierung, da die Leerlaufphasen (Start/Stop-Vorgänge) gut ausgenutzt werden können und zusätzlich das Potenzial Bremsenergie rückzugewinnen entsprechend hoch ist (Rekuperation). Bei LoS-A* und LoS-C* ist dagegen deutlich weniger Hybridpotenzial vorhanden.

-
- Ein Elektromotor für elektrisches Fahren wäre bei LoS-A* und LoS-C* teilweise nutzbar, aus Gründen einer energetischen Optimierung aber nur ca. bis zu einer Geschwindigkeit von 30 km/h.
 - Die Zyklen bei LoS-E* sind für einen elektrischen Fahrbetrieb hingegen nicht geeignet, weil der Energieverzehr der Batterie zu rasch stattfinden würde.

1.4.4.2 Folgerungen abgeleitet aus der Randbedingung Level of Service

(1) Level of Service C*:

- ❑ Unter den gegebenen Randbedingungen erlaubt LoS-C* den Best-Punkte-Fahrbetrieb in Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch. Das spricht übrigens für die in Österreich üblichen Geschwindigkeitsbeschränkungen, weil sie den Verkehrsfluss bzw. das Fahrverhalten vereinheitlichen und solcherart die Fahrdynamik homogenisieren.
- Eine verkehrsplanerische Folgerung daraus ist es, den werktäglichen Zeitraum mit LoS-C* möglichst zu erstrecken, z.B. indem die täglichen Verkehrsbewegungen aller Kraftfahrzeuge im Zeitablauf und vielleicht auch im Netz besser verteilt werden, damit die Verkehrsspitzen gekappt werden können. Dazu gehört es außerdem, die Überlagerungen verschiedener motorisierter Individualverkehre, wozu auch die Gütertransportfahrzeuge gehören, wie die von Berufspendler- und Lieferverkehren zur Frühverkehrsspitze, nach Möglichkeit besser zu entflechten.

(2) Level of Service A*:

- ❑ Unter den gegebenen Randbedingungen ermöglicht LoS-A* zwar die freizügigste Fahrdynamik und damit die flexibelsten KundInnenbedienungen, z.B. für Eillieferungen, Just-in-Time-Verkehre, aber um den Preis eines um 18 % (N₂) bis 30 % (N₃) erhöhten Dieserverbrauchs.
- Gerade unter diesen liberalen Befahrungsbedingungen im Netz könnten halbautonome Fahrerassistenzsysteme (Tempomat gekoppelt mit kurzfristiger Prognose des Fahrverlaufes) und außerdem Fahrpersonalschulungen Einsparungen erbringen.

(3) Level of Service E*:

- ❑ Unter den gegebenen Randbedingungen ist dieser schlechte Verkehrszustand als extrem anzusehen, aber der Mehrverbrauch gegenüber dem Bestpunkte-Fahrbetrieb unter LoS-C* um 255 % bei N₁ bis 559 % bei N₃ überrascht doch negativ. Wenn die stufenweise Verschlechterung des Verkehrszustandes zwischen LoS-C* und LoS-E* einen exponentiell ansteigenden Kraftstoffverbrauch um den Faktor mal 2 bis mal 6 nach sich zieht, liegt das Potenzial nennenswerter Einsparungen „auf der Straße“ und weniger am Fahrzeug (s. Tabelle 1-31).
- In weiterer Folge bedeutet das, dass die Verschränkung von privater Logistik-Organisation und öffentlichem Verkehrsmanagement die höchsten Potenziale künftig verspricht, was aber nicht heißen soll, die technologischen Möglichkeiten, vor allem in Hinblick auf die Emissionsreduktion und Energieunabhängigkeit nicht weiterhin zu forcieren.

2. FEASIBILITY-ANALYSE

2.1 Wirtschaftlichkeitsbeurteilung der verkehrslogistischen Einsatzfähigkeit der Antriebsformen

Die verkehrslogistische Einsatzfähigkeit soll anhand verständlicher Schlüsselkriterien aus der Interessenslage von FahrzeughalterInnen bzw. FuhrparkbetreiberInnen beschrieben werden. Dabei sind fahrzeugseitige, einsatzseitige und infrastrukturseitige Aspekte zu berücksichtigen, die sich interdependent zueinander verhalten. Diese Verknüpfung kann mit dem Oberbegriff Verkehrslogistik umschrieben werden. Damit werden zudem die komplexen Wechselwirkungen im Verkehrsgeschehen aus der Sicht und dem Handlungsspielraum der agierenden Personen im Gütertransport thematisiert.

Der Ausgangspunkt der Beurteilung der verkehrslogistischen Einsatzfähigkeit ist immer ein für die jeweilige Logistikaufgabe eines Transportunternehmens ausgewähltes Nutzfahrzeug mit herkömmlicher Antriebstechnik, an dem beispielsweise die am Markt angebotenen Nutzfahrzeuge mit „alternativer“ Antriebstechnik wohl gemessen werden.

Um den Mechanismus, unter welchen Bedingungen die Innovationsdiffusion bzw. Migration alternativer Fahrzeugmuster stattfindet, ansatzweise zu beschreiben, dienen folgende Bewertungsgrößen:

- **Faktoren**, die Geschäftsprozesse der Logistik und des Transportes maßgeblich beeinflussen, hier aber nicht im Mittelpunkt der Betrachtung stehen.
- **Kriterien**, die von den fahrzeughaltenden AkteurInnen als Maßstäbe angelegt und Entscheidungen zu Grunde gelegt werden. Es handelt sich um ein Argumentarium für und wider eine Beschaffung.
- **Indikatoren** (Kennzahlen), die der Beobachtung der Fortschritte der technologischen Leistungsparameter, der Entwicklung der Marktanteile alternativer Fahrzeugmuster und schließlich dem Monitoring der Innovationsdiffusion im Fahrzeugbestand und in den Regionen dienen. Mit ihrer Hilfe können außerdem die Effekte auf das Verkehrsgeschehen und die Umwelt dargestellt werden.

2.1.1 Kostenfaktoren des Fahrzeugeinsatzes (Fahrzeugnutzung)

Eine repräsentative Kostenrechnung kann hier nicht sinnvoll aufgestellt werden, da es sich um Geschäftsbeziehungen von AkteurInnen im Waren- und Gütertausch handelt, deren Vereinbarungen wenig verallgemeinerbar sind. Jedoch wird von der Straßengüterwirtschaft betont, dass die Transportpreise ständig gedrückt werden und die Margen äußerst gering sind. Über denkbare innerunternehmerische Quersubventionierungen von Werksverkehren, z.B. der eigenen Verteilverkehre im Handel, ist nichts zu erfahren. Es sei daher nur grundsätzlich auf die fahrzeugseitige Kostenstruktur von Transportläufen hingewiesen (DÖRR et al., 2010, 64):

- **Arbeitskosten** (Personalkosten aufgrund unterschiedlicher Arbeitsverhältnisse)
- **Bewegungsunabhängige fixe Verkehrsmittelkosten** (für Bereitstellung, Grundwartung)

- **Fahrleistungsabhängige Verkehrsmittelkosten** (Energiekosten, Wegeentgelte, Kosten für weitere Betriebsmittel und Verschleißteile)
- **Overheadkosten** (Fahrzeugdisposition, Verrechnung, Kundenservice wie Tracking)
- **Externalisierte Kosten** (Verkehrssicherheits-, Lärm-, Gesundheits- und sonstige Umweltkosten)

- Auch wenn die fahrleistungsabhängigen Kosten im Vordergrund der Aufmerksamkeit stehen, darf nicht übersehen werden, dass bei allen Kostenarten spezifische Kostenelemente bei der Integration von alternativen Fahrzeugmustern in den Fuhrpark hinzukommen. So bedeutet beispielsweise eine Dual Fuel-Strategie eine doppelte Tank-/Energie-Infrastruktur.
- Beim Personal kann eine höhere technische Qualifizierung gefragt sein. Bei der Wartung entstehen sowohl personenseitig als auch materialeitig Zusatzkosten. Bei der Fahrzeugdisposition müssen die Reichweiten-Empfindlichkeit bei der Tourenplanung bzw. die Umweg- und Standzeiten für die Energieaufnahme kostenmäßig berücksichtigt werden. Das kann außerdem eine Vergrößerung des Fuhrparks bei gleicher Einsatzleistung auslösen, wenn sich die Disponibilität der Fahrzeuge verringert.
- Bei den externalisierten Kosten können beispielsweise die Schulungen und erforderlichen Gerätschaften bei den Unfall-Einsatzkräften (etwa bei den Freiwilligen Feuerwehren) als Mehrkosten zu Buche schlagen.
- Für diese Fragestellungen besteht grundsätzlicher Klärungsbedarf in Hinblick auf die internen und externen Integrationskosten und mit welchen Instrumenten diese abgedeckt werden können.

2.1.2 Kriterien der Wirtschaftlichkeitsbeurteilung des Fahrzeugnutzens

Für das investitionswillige Fuhrparkunternehmen stehen Kriterien der Wirtschaftlichkeit im Vordergrund, die sich ex ante einigermaßen abschätzen lassen. Dabei werden von den VertreterInnen der AkteurInnen vor allem folgende Richtgrößen genanntⁱ

- **Return on Investment (RoI)**, der nicht unwesentlich von den staatlichen Steuern und Abgaben mit beeinflusst wird. Angesichts der heutzutage üblichen raschen Flottenerneuerung bei den Fuhrparks mit größeren Lkw für den Fernverkehr aufgrund der Abgasrichtlinien von 5 bis 7 Jahren wird von der Branche ein RoI von 1 bis 2 Jahren erwartet. Das heißt, ab diesem Zeitraum soll mit dem Fahrzeugeinsatz Gewinn erzielt werden.

Dieser Umstand stellt gegenwärtig noch ein kaum überwindliches Hindernis für eine nennenswerte Umstellung zu nichtfossilen Antriebsformen bzw. emissionsmindernden Hybrid-Fahrzeugen dar. Allein schon die Anschaffungskosten rentieren sich voraussichtlich erst jenseits des Zeitraumes des Erneuerungszyklus, geschweige denn, dass sie diesen deutlich unterschreiten würden. Somit ist auch die Darstellung der Total Costs of Ownership (TCO) als Vergleichsmaßstab vorderhand hinfällig.

- Der **Wiederverkaufswert** ist ein des Öfteren genanntes Kriterium angesichts des raschen Erneuerungszyklus. Dabei geht die Schere zwischen der technischen (länger) und der wirtschaftlichen (kürzer) Lebensdauer, insbesondere bei den schweren Nutzfahrzeugen, immer weiter auseinander.

ⁱ Diese Hinweise verdankt die AutorInnenschaft dem beim BMVIT zu dieser F&E-Dienstleistung eingerichteten Fachbeirat aus der Fahrzeugindustrie und der Transportwirtschaft.

Da die Wiederverkaufsmärkte derzeit hauptsächlich außerhalb der EU zu finden sind, ist zu erwarten, dass der Wiederverkaufswert innerhalb der EU weiterhin gering bleibt, außerhalb der EU aber aufgrund der komplexeren Technik und Wartung alternativer Fahrzeugmodelle diese weitgehend unverkäuflich sein werden. In Anbetracht dessen ist die Bewertung als Betriebsvermögen auch heikel. Es sind also die Geschäftsmodelle seitens des Nutzfahrzeughandels gefordert. Dazu gehört das Leasing über einen Nutzungszeitraum für das Fahrzeug, aber auch eigens für kritische Komponenten (wie Batterien, Brennstoffzelle, Spezialtanks), damit das Risiko der Pionierkundschaft (Early Adopters) abgedeckt werden kann. Ebenso wird sich der Fahrzeughandel – wie nicht unüblich – um den Aufbau eines Sekundärmarktes für gebrauchte alternative Nutzfahrzeuge bemühen müssen.

- Die **Einsatzkosten**, also die Kosten des laufenden Fahrzeugbetriebes im Vergleich mit herkömmlichen Fahrzeugen, sind ein schlagendes Argument für und wider alternative Nfz-Modelle zu beschaffen. Diese Abschätzung ex ante ist aber weder durch den/die FahrzeugnutzerIn genau zu prognostizieren noch durch die Verkehrsforschung eindeutig zu indizieren. Es sei denn, man führt einen Flottenversuch über einen längeren Zeitraum durch und vergleicht danach die Einsatzkosten, sofern die Einsatzpläne übereinstimmen. Ein solcher Pilotversuch ist vermutlich nur für die Einsatzaufgabe und das jeweilige Einsatzgebiet repräsentativ.

Eine brauchbare Annäherung kann über Indikatoren geschehen, die sich z. B. an Key Performance Indicators anlehnen, wie es Load Factors sind (DEPARTMENT OF TRANSPORT, 2006, 2007, 2009 zit. in DÖRR et. al., 2010, 112 f.).

2.1.3 Kriterien der technischen Leistungsangebote für die Fahrzeugauswahl

Angesichts der manchmal missionarisch vorgetragenen Argumente für und wider braucht es einen objektivierten, realitätsnahen Zugang zur Einschätzung der Breite der Innovationsdiffusion und der Marktchancen, der sich an den vermutlichen Kalkülen der AkteurInnen anlehnt. Geht man von der kapazitiven Bedarfslage der Operateure aus, so stehen diese Anforderungen zuvorderst, und wenn ein Kreis von Fahrzeugmodellen diesen genügt, kommt der Energieverbrauch ins Spiel der Fahrzeugauswahl. Wie zuvor ausgeführt, werden der technische Handhabungswert und der Markenwert für den Wiederverkauf auf den Gebrauchtfahrzeugmärkten in die Überlegungen mit einbezogen. Für das Kriterium Emissionen gilt im Regelfall, was vorgeschrieben ist, muss erfüllt werden, mehr aber auch nicht.

2.1.3.1 Fahrzeugseitige Schlüsselkriterien der Leistungsangebote

Die Leistungsangebote der herkömmlichen wie der alternativen Fahrzeugkonzepte und Antriebstechnologien äußern sich im Wesentlichen in den Dimensionen:

1. **Nutzlastkapazität** (Rationalität des Fahrzeugkonzeptes)
2. **Einsatzreichweite** (Rationalität der Bedienungsfunktion)
3. **Energieverbrauch** (Rationalität der Nachhaltigkeit)
4. **Emissionen** (Rationalität der Umweltverträglichkeit)

Die Beurteilung solcher Leistungsangebote erfolgt durch die Fahrzeuge beschaffenden Unternehmen der Transportwirtschaft, die sie mit ihren Bedienangeboten an Logistikdienstleistungen für ihre Kundschaft abgleichen.

Daraus resultieren die **Fahrzeugbeschaffungspolitik eines Transportunternehmens** und damit seine **Fuhrpark-Zusammensetzung**, die zwischen den beiden Polen, wie folgt, anzusiedeln ist:

- Ein Fahrzeugmuster für alle Einsatzfälle oder
- für jeden regelmäßigen Einsatzfall das geeignetste Fahrzeugmuster in der passenden Stückzahl in der Flotte vorzuhalten.

2.1.3.2 Einsatzzeitige Schlüsselfaktoren der Logistik-Dienstleistungen

Die verkehrslogistische Einsatzorganisation äußert sich in der:

1. **Fuhrpark-Disposition**, bei der entschieden wird, welche logistischen Aufgaben mit welchem Fahrzeugmuster bewältigt werden.
2. **Tourenplanung**, bei der verknüpft mit dem Personaleinsatz (z.B. mit oder ohne Fahrpersonalwechsel während der Tour) je nach KundInnenanforderung (Lieferzeiten) und den Bedingungen an den Zielorten (Anfahrbarkeit der Lieferstationen) zwei prinzipielle Bedienungsstrategien zur Anwendung kommen können, die man folgendermaßen umschreiben kann:
 - öfter (Expresszustellung) und leichter (Sendungsstückelung)
 - konzentrierter und schwerer im Transportlauf (Warenbündelung)

Da die Personalkosten gewöhnlich mehr als die Hälfte der Transportkosten ausmachen, knüpft sich daran eine Kette weiterer Entscheidungen. Nämlich, ob sich der Personalmehraufwand bei Erhöhung der Lieferfrequenz und Verringerung der Liefermenge je Transportlauf rechnet, weil die Mehrkosten an die KundInnen übergewälzt werden können oder nicht. Eine Lösung dieses Dilemmas kann im Outsourcing von Lieferfahrten an einzelne Kleinunternehmen gefunden werden, womit auch die Vorhaltekosten für den dann verkleinerten Fuhrpark sinken würden.

2.1.3.3 Indikatoren zur Nutzlast-Kapazität

Dazu bietet es sich unabhängig vom beabsichtigten Einsatzzweck an, das jeweilige Fahrzeug-Muster in Hinblick auf die **Nutzlast-Kapazitäten** bezüglich Zuladungsgewicht und -volumen zu betrachten und daraus einsatzrelevante Bezüge herzustellen.

Zunächst aber interessiert in einem fahrzeugtechnologisch orientierten Projekt das additive Zusammenwirken der wesentlichen Gewichtskomponenten am Fahrzeug, nämlich Antriebsstrang, Energiespeicher, Fahrwerk, Chassis, Karosserie und Nutzaufbau sowie das sonstige Equipment für Sonderausführungen (z.B. für Kühlfahrzeug, Ladekran, Kipphydraulik, Schubboden, Hebebühne u. a.). Wird vom zulässigen Fahrzeuggesamtgewicht (zGG) auf die technisch gegebenen und die logistisch nutzbaren Elemente des Fahrzeuges heruntergerechnet, so ergibt sich als Schlüsselindikator das **Nutzlast-/Gesamtgewichts-Verhältnis**, das im Überblick auf die Wettbewerbsfähigkeit der Antriebsvarianten untereinander hinweist (s. Darstellung 1-13 bis Darstellung 1-15).

-
- Dabei setzt sich das Gesamtgewicht aus dem Eigengewicht mit vollem Tank (und Fahrpersonal) plus der maximal möglichen Beladung bei Gewichtsauslastung zusammen. Aus dieser simplen Definition ergeben sich die **Schlüssel-Variablen** für die jeweiligen verkehrslogistischen Einsatzaufgaben und damit in weitere Folge die **Effekte auf den Güterverkehr**.
 - Da Gewicht und Dimensionen (Raumbedarf für den Einbau am Fahrzeug) des Energiespeichers mit seiner Leistungskapazität, also mit der **Einsatz-Reichweite**, korreliert sind, bedeutet mehr Raum und Gewicht des Energiespeichers (bzw. Tanks) für mehr Reichweite eine **Einbuße an Nutzlast**, die sich jedenfalls gewichts-, aber auch raummäßig, zumindest bei den kleineren Nutzfahrzeugen, negativ auswirkt.
 - Das bedeutet für die praktische **Beurteilung der fahrzeugeitigen Leistungsangebote**: Braucht das Logistikdienstleistungsunternehmen für seine Einsatzplanung dringender die Verlässlichkeit eines täglichen Einsatz-Radius, also eine garantierte Mindestreichweite, und weniger das Höchstgewicht der Zuladung, weil die Volumenauslastung im Regelfall eher erreicht wird als die Gewichtsauslastung, dann kommen größer dimensionierte Energiespeicher bei alternativen Fahrzeugmodellen in Frage. Ist in weiterer Folge der Energieverbrauch deutlich geringer für eine definierte Transportleistung stellt sich als nächste Hürde der Anschaffungspreis in den Weg, der den Return on Investment determiniert.
 - Gleiches gilt für die zusätzlichen Aggregate für die Hybridisierung und Elektrifizierung des Antriebsstranges, deren Nutzen in der Energieeinsparung und in der Emissionsreduktion zu messen sind. Erstere findet in die monetäre Betriebskostenrechnung Eingang, letztere in die allgemeinere Gemeinwohl-Rechnung, es sei denn Schadstoff- und Treibhausgas-Ausstöße des Verkehrs werden einsatzseitig künftig verstärkt mit Abgaben belegt oder in einen Zertifikathandel einbezogen.

2.2 Annahmen zu den Mustertransportläufen für die zweite Fahrzyklen-Simulation

Im Vergleich zum ersten Simulationsdurchgang, bei dem es darum ging, die Auswirkungen bestimmter Einflussfaktoren zu erkennen und ein gewisse Erfahrung für die Art der Simulation zu bekommen, konnten beim zweiten Simulationsdurchgang bestimmte Einflussfaktoren verfeinert werden. Besonders die Fahrgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Levels of Service im Infrastrukturellen Setting und die Berücksichtigung der branchenspezifischen Zeitfenster im Logistischen Setting wurden detaillierter herausgearbeitet.

2.2.1 Modifikation der externe Faktoren des Logistischen Settings: Zeitfenster

Um die Mustertransportläufe möglichst realistisch und repräsentativ simulieren zu können, sind die Einflussfaktoren für die Ermittlung der Zeitfenster von hoher Relevanz. Die Zeitfenster, in denen diese Güterverkehre stattfinden, hängen in erster Linie von den branchenspezifischen Anforderungen und von deren logistischer Durchführung ab. Dabei dürfen gesetzliche Rahmenbedingungen nicht außer Acht gelassen werden. Außerdem ist bei der Festlegung der Zeitfenster zu beachten, dass nicht nur der tatsächliche Zeitraum der möglichen Anlieferung (Öffnungszeiten der Filiale, Erreichbarkeit der Kundschaft etc.), sondern auch die jeweiligen Hin- und Rückfahrten auf der Zulaufstrecke vom Zentrallager zu den Anlieferstationen maßgeblich sind. Aufgrund dessen werden die Zeitfenster für die drei Mustertransportläufe folgendermaßen definiert:

Für den Mustertransportlauf der KEP-Dienste (N₁-Tour) sind vor allem die zeitlichen Begrenzungen aufgrund der Kundschaft relevant. Daher ist diese Tour in erster Linie an jene Zeiten angelehnt, an denen die EmpfängerInnen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Hause oder allenfalls in einem Betriebslokal anzutreffen sind, um die Ware entgegennehmen zu können. Zugleich sollen die Morgen- und Abendruhe nicht gestört werden. Inklusive Hin- und Rückfahrt vom Zentrallager bis zu den Points of Delivery kann daher für diese Tour ein Zeitfenster von 8-17 Uhr eingeplant werden.

Auch die Touren für den Lebensmitteleinzelhandel (N₂-Tour) sind teilweise von der Endkundschaft abhängig, da frische Waren bestenfalls schon vor den Öffnungszeiten der Filialen bzw. spätestens am Vormittag angeliefert werden müssen, um rechtzeitig für den Verkauf angeboten zu werden. Alle anderen Waren können im Laufe des Tages angeliefert werden und sind zeitlich nur von den abendlichen Öffnungszeiten der Filialen begrenzt. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen und unter Berücksichtigung der Hin- und Rückfahrt vom Zentrallager wird das Zeitfenster von 6-20 Uhr angesetzt und stellt somit das größte Zeitfenster der drei Mustertransportläufe dar.

Die N₃-Tour von einem innerstädtischen Produktionsstandort zu einem Wareneingangslager eines/einer AbnehmerIn im Umland und wieder zurück ist im Vergleich zu den beiden anderen Touren weniger vom Konsumverhalten abhängig und wird in erster Linie von den gesetzlichen Rahmenbedingungen beeinflusst. Da die Abholung der Ware vom Produktionsstandort zeitlich nicht begrenzt ist und höchstens am Morgen des Folgetages zur weiteren Auslieferung bereit sein muss, können diese Transporte so gewählt werden, dass dem erhöhten Verkehrsaufkommen untertags aus dem Weg gegangen werden könnte. Außerdem muss die gesetzliche Vorgabe des Nachtfahrverbotes, bei dem allen Lkw mit mehr als 7,5 t zulässigen Gesamtgewichts das Fahren im Zeitraum von 22-5 Uhr verboten wird, berücksichtigt werden. Aufgrund dessen kann für diese Tour ein Zeitfenster von 17-22 Uhr herangezogen werden.

2.2.2 Modifikation der exogenen Faktoren des Infrastrukturellen Settings

2.2.2.1 Herleitung des Levels of Service nach Kapazitäten der Straßenkategorien

Bei nahezu allen Einflussfaktoren des Infrastrukturellen Settings zur Referenzstrecke wurden nach der ersten Simulation Änderungen vorgenommen. Lediglich einige fixe Größen, wie die Anzahl der Fahrstreifen, sind von der ersten Simulation verblieben. Der Einfluss durch die Neigungsverhältnisse wurde aufgrund der Erkenntnisse der ersten Simulation in der zweiten Simulation nicht mehr berücksichtigt.

Am stärksten haben sich die Annahmen zu den Fahrgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des LoS verändert, da dieser neu definiert wurde. Diese Definition war wichtig, um in weiterer Folge mit einem möglichst realitätsnahen LoS arbeiten zu können. Für die Ermittlung des LoS war es erforderlich, die realen Verkehrsstärken mit jenen theoretischen Richtwerten aus der Literatur abzugleichen (FGSV, 2001). Die realen Verkehrsstärken konnten aufgrund der Tagesganglinien des jahresdurchschnittlichen werktäglichen Verkehrs (JDTVw), die aus der Straßenverkehrszählung Wien 2010 resultierten (KÄFER, 2011), ermittelt werden. Dazu wurden das Verkehrsgeschehen und die Kapazitätsauslastung des Fahrweges (Level of Service) zu unterschiedlichen Tageszeiten analysiert.

Der vorliegenden Verkehrserhebung liegt eine von Feiertagen unbeeinflusste Normwoche im Mai 2010 zu Grunde. Trotz des kurzen Zeitraums der Datenauswertung der Zählstellen sind die resultierenden

Tagesganglinien erfahrungsgemäß ausreichend signifikant, um auf die Jahresganglinien hochzurechnen. Dass die Ganglinien in einer sehr feinen zeitlichen Auflösung (in 15 Minuten-Intervallen oder 96 Zeitschnitten) aufbereitet waren, erwies sich als vorteilhaft. Die ermittelte Verkehrsstärke der Tagesganglinien wurde anschließend mit der im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) festgelegten maximalen Kapazität verglichen (FGSV, 2001). Hier ist anzumerken, dass die von der FGSV bestimmten maximalen Kapazitäten einerseits von der Straßenkategorie und andererseits von der Anzahl der Fahrstreifen je Richtung abhängen (s. auch Kap. 1.2.5.2):

Die von der FGSV vorgegebene Anzahl der Fahrstreifen entspricht jedoch nicht in allen Fällen der Realität, weswegen hier die Annahme getroffen wurde, die maximale Kapazität, je nach Differenz zwischen der in der Literatur angeführten und der tatsächlichen Anzahl der Fahrstreifen linear zu reduzieren bzw. zu erweitern. Nicht nur die Anzahl der Fahrstreifen je Richtung, sondern auch die Straßenkategorien haben aufgrund ihres typischen Ausbaustandards einen Einfluss auf die maximale Kapazität. Deshalb wurde die Referenzstrecke der Touren von einem Zentrallager südlich von Wien (Wiener Neudorf) bis zur Verteiltour im 16. Wiener Gemeindebezirk so gewählt, dass damit die verschiedensten Straßenkategorien von Hochleistungsstraßen über stark frequentierte Hauptstraßen bis hin zu niederrangigen Seitengassen abgedeckt werden konnten. Dies erfolgte in Anlehnung an die im Projekt Metro.Freight.2020 vorgenommene und für österreichische Großstädte charakteristische Straßenkategorisierung aus dem Blickwinkel des Straßengüterverkehrs, wobei hier eine deutlich geringere Anzahl, nämlich drei Straßenkategorien, ausreichte (DÖRR et al., 2010). Zu jeder Straßenkategorie wurde die, laut der FGSV, entsprechende Anzahl an Fahrstreifen je Richtung sowie die theoretisch maximale Kapazität zugeordnet. Diese Zuordnung ist in der folgenden Tabelle 2-1 ersichtlich:

Tabelle 2-1: Kfz/h_{THEO} je nach Straßenkategorie und Anzahl der Fahrstreifen

Straßenkategorie	Anzahl der Fahrstreifen je Richtung	Theoretisch maximale Kapazität [Kfz/h _{THEO}]
I – Hochleistungsstraße	4	7.200
II – Straßenzug mit direkter Anbindung an eine Hochleistungsstraße	2	1.600
III – Innerstädtischer Straßenzug mit vorrangiger Erschließungsfunktion	2	1.300

Quelle: Dörr et al. 2010, S.36f und FGSV, 2001, 3-17

Folgende drei Straßenkategorien sind für die Simulation relevant:

- Bei der Straßenkategorie I handelt es sich in erster Linie um Hochleistungsstraßen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen, die sowohl innerhalb als auch außerhalb des Siedlungsgefüges liegen können. Bezogen auf den Mustertransportlauf handelt es sich um die beiden Hochleistungsstraßen A2 und A23. Des Weiteren ist das Straßenumfeld dieser Kategorie allenfalls anbaufrei. Aufgrund der hohen Anzahl an Fahrstreifen je Richtung zeichnen sie sich durch hohe Leistungsfähigkeit aus (s. Tabelle 2-1). Die Richtungsfahrbahnen sind voneinander getrennt und weisen eine geringe Knotenpunktdichte sowie eine planfreie Knotenpunktgestaltung auf. Zudem sind sie durch eine hohe erlaubte Fahrgeschwindigkeit, welche abschnittsweise durch Beschränkungen mittels Überkopfanzeigen verringert werden kann, gekennzeichnet.

- Bei der Straßenkategorie II handelt es sich um Hauptstraßen innerhalb des Siedlungsgefüges, welche in den meisten Fällen eine direkte Anbindung (Zubringer) an eine Hochleistungsstraße aufweisen. Ihnen kommt eine wichtige Verbindungsfunktion zu und sie sind daher durch ein relativ hohes Verkehrsaufkommen gekennzeichnet. Bezogen auf den Mustertransportlauf sind die Altmannsdorfer Straße sowie die Grünbergstraße zu nennen. Die Knotendichte und die Erschließungsfunktion sind bei dieser Straßenkategorie sehr unterschiedlich und können als mittel bis hoch eingestuft werden. In zentrumsnahen Bereichen, wo das Straßenumfeld angebaut ist, erhöht sich die Knotendichte deutlich. Üblicherweise beträgt die maximal erlaubte Fahrgeschwindigkeit bei dieser Straßenkategorie 50 km/h, wobei auch in peripheren Bereichen 70 km/h zugelassen sein können. Im Regelfall weist diese Straßenkategorie zwei Fahrstreifen je Richtung auf.
- Bei der Straßenkategorie III handelt es sich um einen innerstädtischen Straßenzug mit vorrangiger Erschließungsfunktion, wie die Johnstraße und die Thaliastraße. Dementsprechend hoch ist daher die Knotenpunktdichte und das Straßenumfeld ist in jedem Fall unmittelbar angebaut. Aufgrund der innerstädtischen Lage ist die Fahrgeschwindigkeit aufgrund der gesetzlichen Vorgaben auf maximal 50 km/h beschränkt. Außerdem weist diese Straßenkategorie im Normalfall einen oder zwei Fahrstreifen je Richtung auf.

Die Straßenkategorie und die Anzahl der Fahrstreifen je Kante ergeben somit eine theoretisch maximale Kapazität. Die durch die Tagesganglinien abgelesene tatsächliche Verkehrsstärke je Stunde wird nun mit der theoretisch maximalen Kapazität verglichen, woraus der Level of Service ermittelt werden kann. Diesbezüglich wurde die begründete Annahme getroffen, dass unter der theoretischen maximalen Kapazität der Übergang von LoS-C auf LoS-D zu verstehen ist (s. roter Balken in Tabelle 2-2). Des Weiteren wurde für die Ermittlung abgeleitet, ab wann der LoS wechselt, eine Multiplikation bzw. Division mit einem gewissen Faktor erforderlich ist. Für die Ermittlung des Faktors wurden Daten des FGSV 2001 herangezogen, bei der die zulässigen Verkehrsstärken je LoS behandelt werden. Darauf aufbauend konnten Faktoren für die Umrechnung auf den jeweiligen LoS ermittelt werden, welche in der folgenden Tabelle 2-2 ersichtlich sind. Für die Berechnung der LoS sind die Faktoren 1,3636 und 1,2 relevant, da diese die Übergänge von LoS-C* auf LoS-A* bzw. von LoS-C* auf LoS-E* darstellen (mehr zu den definierten LoS-A*, LoS-C* und LoS-E* s. Kapitel 2.2.2.3).

Tabelle 2-2: Berechnung der Übergänge von LoS-A* auf LoS-C* und LoS-C* auf LoS-E* ausgehend von Kfz/h_{THEO} bei einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn

LoS	Kfz pro Stunde und Richtung je Fahrstreifen	LoS*	Bsp: Kfz/h _{THEO} = 1000
A	≤ 1200	A*	< 733
B	≤ 2200		
C	≤ 3000	C*	733 - 1200
D	≤ 3600		
E	≤ 4000	E*	> 1200
F	≥ 4000		

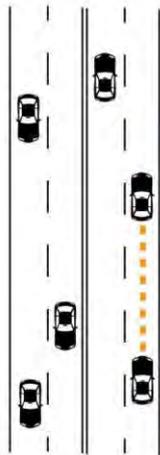
Linksseitige Faktoren: $\times 1,8333$ (A), $\times 1,3636$ (B), $\times 1,2$ (C), $\times 1,1111$ (D)
 Rechtsseitige Faktoren: $\times 1,3636$ (C), $\times 1,2$ (D)

Fußnoten:
 LoS-A < Kfz/h_{THEO} : 1,3636 und LoS-E > Kfz/h_{THEO} × 1,2
 Kfz/h_{THEO} × ≤ LoS-C ≤ Kfz/h_{THEO} × 1,2 | Kfz/h_{THEO} = theor. max. Kapazität = 3.000

Quelle: eigene Bearbeitung (arp und IVS) nach FGSV 2001, 3-17

Darstellung 2-1: Die Abwandlung (*) des Level of Service (LoS-A*, -C*, -E*) auf 2-streifiger Richtungsfahrbahn

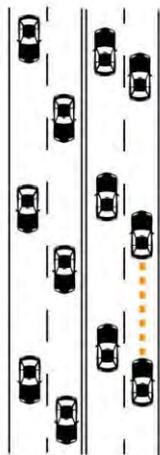
Definition der LoS A*, C* und E*



unter Berücksichtigung des Sicherheitsabstandes von mind. 12,5 m bei 50 km/h

LoS A*

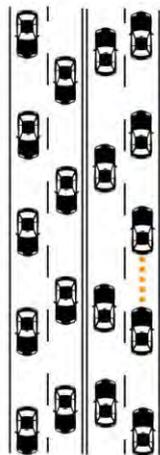
Dieser Level of Service fasst die beiden LoS-A und -B der sechsstufigen Skala zusammen. Dies bedeutet, dass sich die Verkehrsteilnehmenden sehr wenig gegenseitig beeinflussen, wodurch es zu keiner bzw. einer geringen Beeinträchtigung des/der Einzelnen kommt. Der Verkehrsfluss ist bei diesem LoS allenfalls frei.



unter Berücksichtigung des Sicherheitsabstandes von mind. 9 m bei 35 km/h

LoS C*

Dieser Level of Service fasst die beiden LoS-C und -D der sechsstufigen Skala zusammen. Dies bedeutet, dass sich die Verkehrsteilnehmenden häufig gegenseitig beeinflussen, wodurch es zu einer deutlichen Beeinträchtigung des/der Einzelnen kommt. Die Bewegungsfreiheit ist zwar spürbar eingeschränkt, der Verkehrsfluss ist jedoch stabil und flüssig.



unter Berücksichtigung des Sicherheitsabstandes von mind. 5 m bei 20 km/h

LoS E*

Dieser Level of Service fasst die beiden LoS-E und -F der sechsstufigen Skala zusammen. Dies bedeutet, dass sich die Verkehrsteilnehmenden ständig gegenseitig beeinflussen, wodurch es zu einer deutlichen Beeinträchtigung des/der Einzelnen kommt. Die Bewegungsfreiheit ist nur sehr gering möglich und der Verkehrsfluss ist nicht mehr stabil, es herrscht Stop-and-Go-Verkehr.

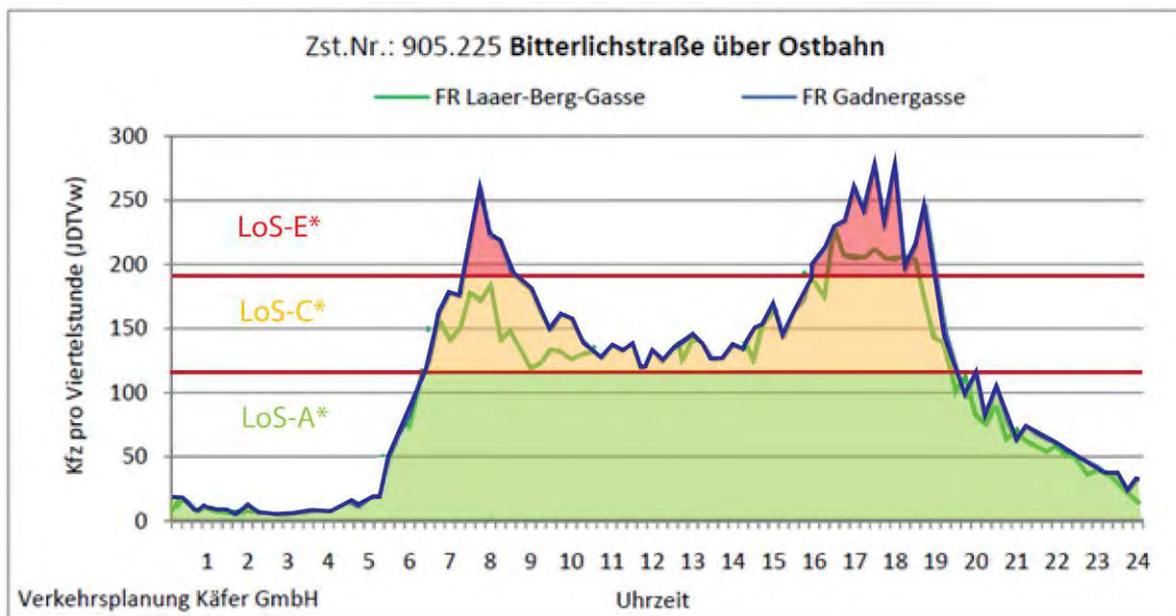
Quelle: eigene Darstellung arp (Toifl)

Diese Reduzierung von sechs auf drei Stufen des Levels of Service lässt sich aus dem Blickwinkel des Güterverkehrs damit begründen, dass Nutzfahrzeuge den Fahrkomfort und die Geschwindigkeitswahl eines freien Verkehrsflusses nicht voll ausschöpfen können. Nicht zuletzt „vergleichmäßigen“ Fahrerassistenzsysteme und optimierte automatische Schaltprogramme die Fahrdynamik, und erzeugen derart ein quasi „unsportliches“, aber kraftstoffsparendes Fahren.

Jene Verkehrsstärken, die kleiner sind als die theoretische maximale Kapazität durch $1,3636$ entsprechen dem LoS-A*. Der LoS-C* ist jener Verkehrsstärkenbereich zwischen der theoretischen maximalen Kapazität durch $1,3636$ und mal $1,2$. Zu guter Letzt wird jede Verkehrsstärke, die größer ist als die theoretische maximale Kapazität samt 20% -igem Zuschlag als LoS-E* bezeichnet. Ein Beispiel in der letzten Spalte der Tabelle 2-2 (mit einer theoretischen maximalen Kapazität von 1.000 Kfz/h) soll dies besser erläutern.

Darstellung 2-2 verdeutlicht das Zusammenspiel der theoretischen maximalen Kapazität und der realen Tagesganglinie an einem anschaulichen Beispiel mit ausgeprägter Morgen- und Abendverkehrsspitze an der Zählstelle Bitterlichstraße, die zur Straßenkategorie III mit nur einem Richtungsfahstreifen zählt und tangential im südlichen Wiener Bezirk Favoriten verläuft.

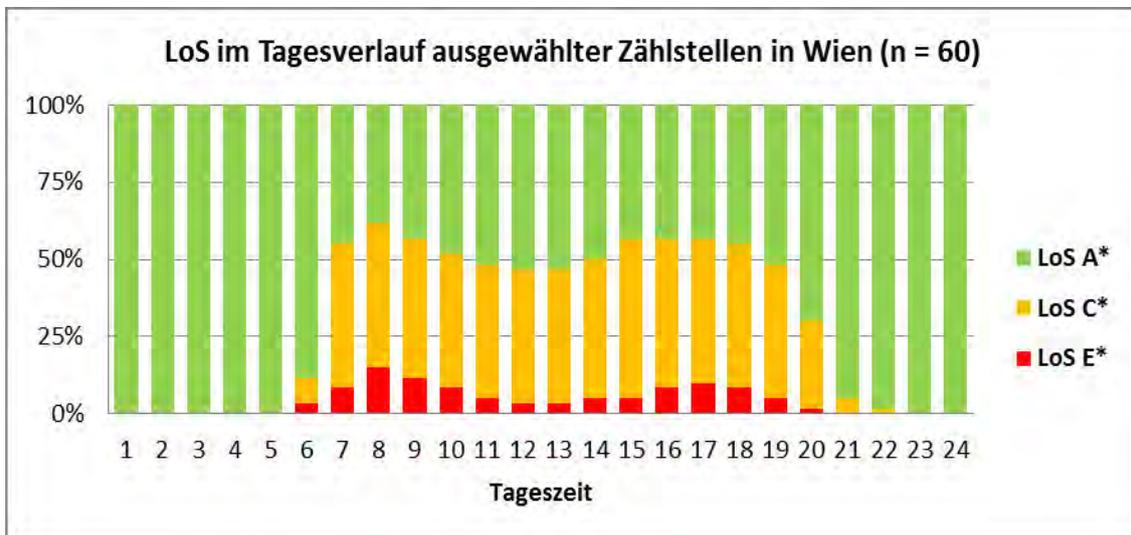
Darstellung 2-2: LoS-A*, LoS-C* und LoS-E* im Tagesgang am Beispiel der Zählstelle Bitterlichstraße



Quelle: Bearbeitet auf der Grundlage von KÄFER Verkehrsplanung 2011

Um eine große Bandbreite an relevanten Straßenkategorien abdecken zu können, wurden 60 Tagesganglinien nach Fahrtrichtung ausgewertet und für jede Stunde wurde die Verkehrsstärke abgelesen. Aus diesem Sample von 60 Zählstellen wurden anschließend anteilmäßig die Levels of Service stundenweise ermittelt. Die nachfolgende Darstellung verdeutlicht die Anteile der LoS im Tagesverlauf, wobei neben der leichten Früh- und Abendspitze besonders der vorherrschende LoS-A* zwischen 23 Uhr und 5 Uhr zu erkennen ist.

Darstellung 2-3: Anteile der LoS im Tagesverlauf anhand 60 Tagesganglinien der Verkehrserhebung in Wien 2010



Quelle: eigene Bearbeitung auf Grundlage KÄFER Verkehrsplanung 2011

Das Ergebnis des LoS im Tagesverlauf über alle 60 Straßen ist informativ, jedoch ist es für die Simulation erforderlich, jedem Mustertransportlauf ein eigenes Zeitfenster mit den jeweiligen LoS-Anteilen zuzuweisen. Da diese Zeitfenster sehr stark von der Kundschaft abhängen, gehört dieser Einflussfaktor zum Logistischen Setting, der im Kapitel 2.2.2 dargelegt worden ist.

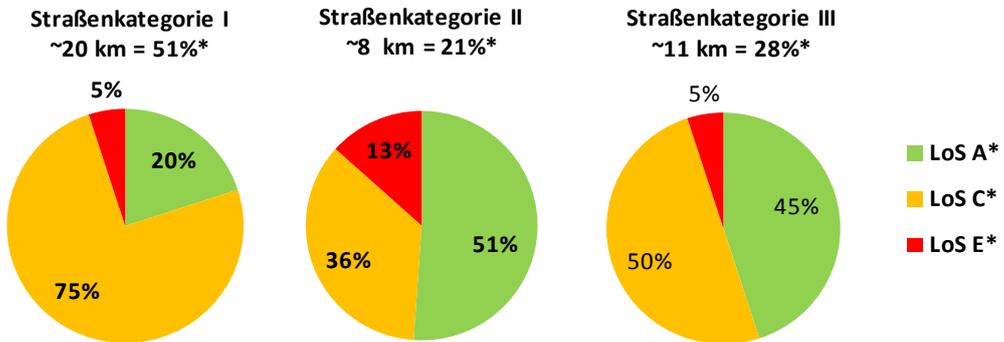
Für alle drei Zeitfenster wurden nun die LoS-Anteile mit Hilfe der Tagesganglinien für jede Straßenkategorie ermittelt. Für die Straßenkategorie II wurden dafür 18 Tagesganglinien und für die Straßenkategorie III 42 Tagesganglinien ausgewertet. Für die Straßenkategorie I (Hochleistungsstraße) liegen zwar ASFINAG-Zählstellen vor, allerdings sind die Tagesganglinien nicht öffentlich zugänglich. Aus diesem Grund wurden die Anteile der LoS für die drei Zeitfenster geschätzt.

2.2.2.2 Anwendung des repräsentativen Levels of Service in verkehrslogistischen Zeitfenstern

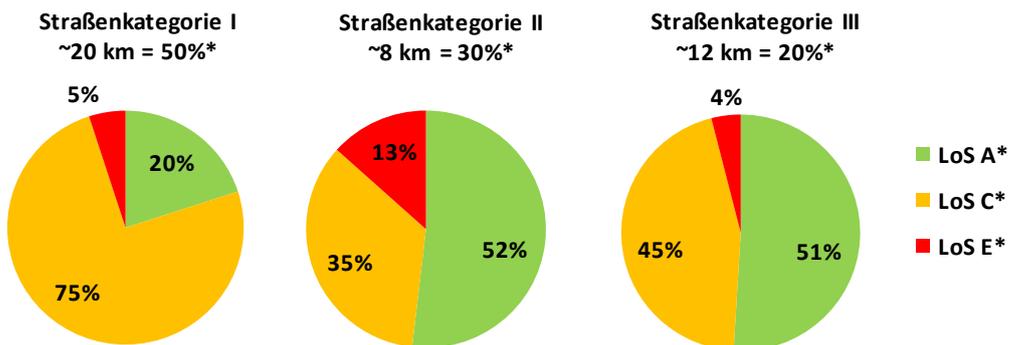
Die folgende Darstellung zeigt die LoS-Anteile je Zeitfenster und Straßenkategorie, wobei die Unterschiede zwischen den drei Mustertransportläufen sowie jene zwischen den Straßenkategorien deutlich hervorgehen. Besonders auffällig ist, dass die N₃-Tour aufgrund des späteren Zeitfensters einen relativ hohen LoS-A*-Anteil aufweist. Außerdem fällt auf, dass Straßenkategorie II in allen drei Zeitfenstern den höchsten LoS-E*-Anteil hat, was darin begründet liegt, dass es sich bei dieser Straßenkategorie um wichtige Hauptstraßen mit direkter Anbindung an eine Hochleistungsstraße und dementsprechend hohem Verkehrsaufkommen handelt.

Darstellung 2-4: Anteile von LoS-A*, LoS-C* und LoS-E* je nach Straßenkategorie und Nutzfahrzeugklasse im Zeitfenster des zugehörigen Mustertransportlaufes

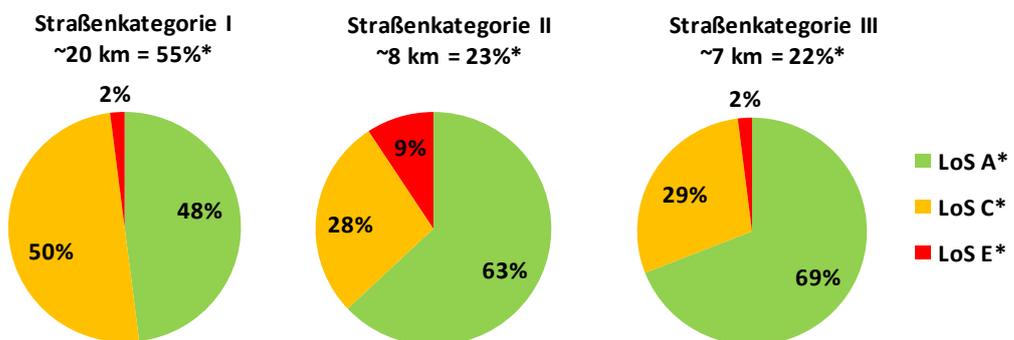
N1: LoS-Anteile im Zeitfenster 8-17 Uhr



N2: LoS-Anteile im Zeitfenster 6-20 Uhr



N3: LoS-Anteile im Zeitfenster 17-22 Uhr



* der Gesamtdistanz

Quelle: eigene Darstellung (arp)

Als Grundlage zur Ermittlung des LoS hätte man auch lediglich die Daten jener Zählstellen heranziehen können, die tatsächlich auf der Referenzstrecke liegen. Dies wurde jedoch aus mehreren Gründen unterlassen. Vor allem die geringe Zählstellendichte ist an dieser Stelle zu nennen, wodurch nur wenige konkrete Tagesganglinien verwendet werden können. Auf der Hauptroute, welche für alle drei Nutzfahrzeugklassen gleich ist, gab es 2010 fünf Zählstellen, wovon jedoch nur zwei (Grünbergstraße, Linzer Straße unter Westbahn) verwendbar sind. Die weiteren Zählstellen befinden sich auf der Hochleistungsstraße (keine Tagesganglinien verfügbar) bzw. geben nur den JDTVw in Kfz/24h ohne viertelstündliche Auswertung wieder (Altmannsdorfer Straße).

Auf der Verteiltour gibt es noch weitere vier Tagesganglinien (Koppstraße/Gablenzgasse, Kirchstettnergasse, Ottakringer Straße vor Brauerei, Thaliastraße vor Panikengasse). Der LoS ist demnach für jene Kanten korrekt, für die viertelstündliche Verkehrserhebungen stattgefunden haben. Für andere Straßen auf der Referenzstrecke ist dies jedoch nicht der Fall, weshalb man für diese Kanten ohnedies eigene Schätzungen durchführen müsste. Zudem kann der LoS trotz einer vorhandenen Zählstelle auf der nächsten Kante, nach einer großen Kreuzung etwa, bereits ganz anders verteilt sein.

Aus diesem Grund wurden zur Ermittlung der LoS-Anteile mehrere Tagesganglinien der gleichen Straßenkategorie in Betracht gezogen (darunter auch, aber nicht nur die Tagesganglinien der Referenzstrecke). Damit erhält die Simulation eine gewisse Repräsentativität für ähnliche, anderswo verlaufende Transportläufe im Raum Wien und vielleicht in anderen Großstädten. Außerdem kann eine solche Tour beliebig und auch mehrmals innerhalb des jeweiligen Zeitfensters durchgeführt werden.

Sind nun aus der Kapazitätsanalyse der 60 Zählstellen nach Straßenkategorien aufgeschlüsselt die Zeiträume bestimmter Verkehrsqualität, also die Levels of Service, bekannt, ergeben sich daraus die Anteile der LoS in den drei verkehrslogistischen Zeitfenstern und man weiß auch die Begleitumstände durch das herrschende Verkehrsaufkommen bzw. die Stärke der Beeinträchtigung durch andere Verkehrsteilnehmende. Um diese realitätsnahen Parameter in die Simulation integrieren zu können, wird die gesamte Tour mit dem von der Straßenkategorie abhängigen LoS-Anteil des Zeitfensters berechnet. Aus Gründen der Eingabe in die Simulation muss jedem einzelnen Kantenabschnitt ein LoS (anteilig an der gesamten Tour) und somit eine entsprechende Geschwindigkeit zugewiesen werden.

Diese Vorgehensweise soll anhand des folgenden Beispiels näher erläutert werden: Dafür wird eine Kante der N1-Tour herangezogen. Die Tour kann sich im Zeitfenster 8-17 Uhr abspielen. Aufgrund des Zeitfensters setzt sich der LoS-Anteil, beispielsweise für Straßenkategorie III, folgendermaßen zusammen: LoS-A*: 45 %; LoS-C*: 50 % und LoS-E*: 5 %. Beträgt eine Kantenlänge nun beispielsweise 2.000 m, ergibt sich für die Simulation eine anteilmäßige LoS-Verteilung von 900 m LoS-A*, 1.000 m LoS-C* und 100 m LoS-E*.

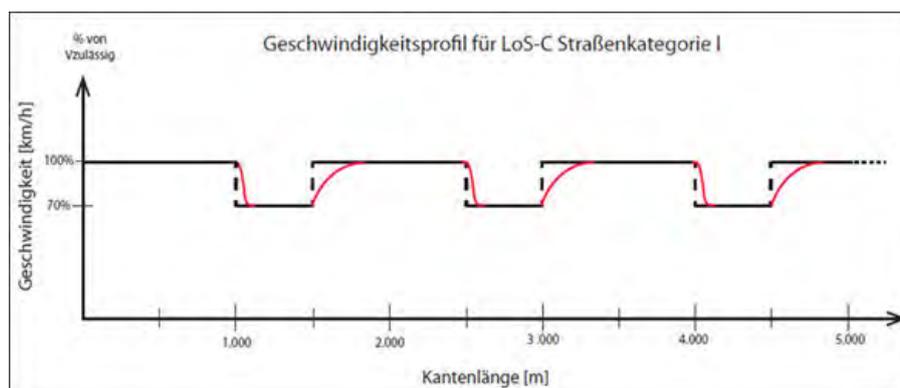
2.2.2.3 Anpassung der Fahrdynamik an den repräsentativen Level of Service

Bei der Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils wurde im Gegensatz zur ersten Simulation nicht die mittlere Geschwindigkeit herangezogen, sondern ein dynamischeres Fahrverhalten zugrunde gelegt. Die Brems- und Beschleunigungsvorgänge zwischen zwei Knoten im Kantenzug sollten nicht außer Acht gelassen werden, da speziell der Energiehaushalt von Hybridfahrzeugen davon profitiert. Wie bereits beschrieben, wurde bei der ersten Simulation die gesamte Tour mit allen drei LoS separat berechnet. Im

Unterschied dazu wird nun bei der zweiten Simulation das Geschwindigkeitsprofil realistischer gestaltet. Dazu wurden, unter anderem, für die LoS folgende Annahmen getroffen.

- Bei LoS-A* (eigentlich LoS-A und LoS-B der sechsstufigen Skala) kann die Fahrgeschwindigkeit frei gewählt werden, da es keine Beeinträchtigungen durch andere Verkehrsteilnehmenden gibt. Es ist davon auszugehen, dass der/die FahrerIn so schnell wie möglich liefern möchte und deshalb die höchstzulässige Geschwindigkeit wählt. Die Verkehrsvorschriften werden jedoch in jedem Fall eingehalten. Das Nfz beschleunigt demnach bis die zulässige Höchstgeschwindigkeit erreicht wird, welche bis zum Beginn der Bremsphase vor dem nächsten Knoten gehalten wird. Die Dauer der Beschleunigungs- und Bremsphase hängt von der Nutzfahrzeugklasse und der Beladung ab.
- Bei LoS-C* (eigentlich LoS-C und LoS-D der sechsstufigen Skala) beeinflussen sich die FahrerInnen häufig gegenseitig, wodurch die Fahrgeschwindigkeit den anderen Verkehrsteilnehmenden angepasst wird. Von den FahrerInnen wird die höchstzulässige Geschwindigkeit angestrebt, welche zwar häufig erreicht wird, jedoch aufgrund von Beeinträchtigungen nicht lange gehalten werden kann. Die Häufigkeit und die Stärke der Geschwindigkeitsreduktion hängen von der Straßenkategorie ab:
 - Auf Hochleistungsstraßen (Straßenkategorie I) muss das Nfz die Geschwindigkeit nach 1.000 m Fahrt mit der höchstzulässigen Geschwindigkeit um 30 % verringern. Die Höchstgeschwindigkeit wird nicht stärker abgemindert, da die Lkw ohnehin den Großteil der Strecke auf der rechten, meist langsameren, Spur fahren und vom restlichen Verkehrsgeschehen und damit von einer Verringerung der potenziell höheren Geschwindigkeiten nicht in erster Linie betroffen sind. 500 m nach Einleitung der Bremsphase wird wieder auf die höchstzulässige Geschwindigkeit beschleunigt. Welche Distanz dann tatsächlich mit der um 30 % verminderten Geschwindigkeit zurückgelegt wird, hängt von der Dauer der Bremsphase ab.

Darstellung 2-5: Angenommenes Geschwindigkeitsprofil für Level of Service C* auf Hochleistungsstraßen

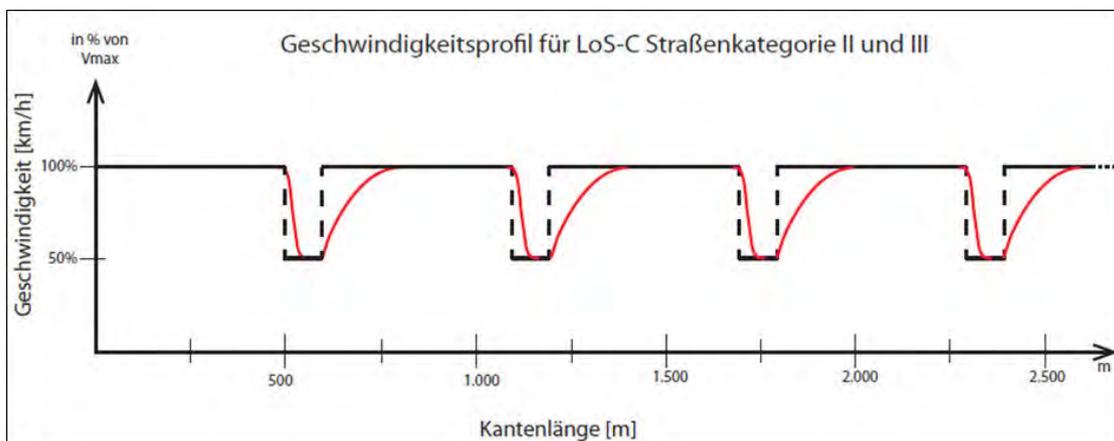


Quelle: eigene Bearbeitung arp (Marsch, Toifl)

- Im städtischen Verkehr, abseits der Hochleistungsstraßen – also Straßenkategorie II und III – ist z.B. durch querende FußgängerInnen eine Abkehr von der höchstzulässigen Geschwindigkeit in geringeren Abständen anzunehmen. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist möglich, allerdings wird alle 500 m die Geschwindigkeit um die Hälfte reduziert. Nach 100 Metern wird wieder auf die höchstzulässige Geschwindigkeit beschleunigt, um diese dann wieder nach 500 Metern um 50 %

abzumindern. Die Geschwindigkeitsreduktion ist durch abbiegende Fahrzeuge, FußgängerInnen, RadfahrerInnen etc. begründbar.

Darstellung 2-6: Angenommenes Geschwindigkeitsprofil für Level of Service C* für Straßenkategorien II und III



Quelle: eigene Bearbeitung arp (Marsch, Toifl)

- Bei LoS-E* (eigentlich LoS-E und LoS-F der sechsstufigen Skala) im Stop-and-Go-Verkehr wird das Nutzfahrzeug durch die Verkehrsverhältnisse alle 100 m (Straßenkategorie I) bzw. alle 50 m (Straßenkategorie II und III) zum Anhalten gezwungen. Zwischen diesen Stopps versucht der/die FahrerIn auf die um 40 % herabgesetzte höchstzulässige Geschwindigkeit zu beschleunigen, was aufgrund der häufigen Stopps jedoch z.B. bei hoher Beladung nicht immer gelingt, da während der Beschleunigungsphase schon wieder die Bremsphase eingeleitet werden muss.

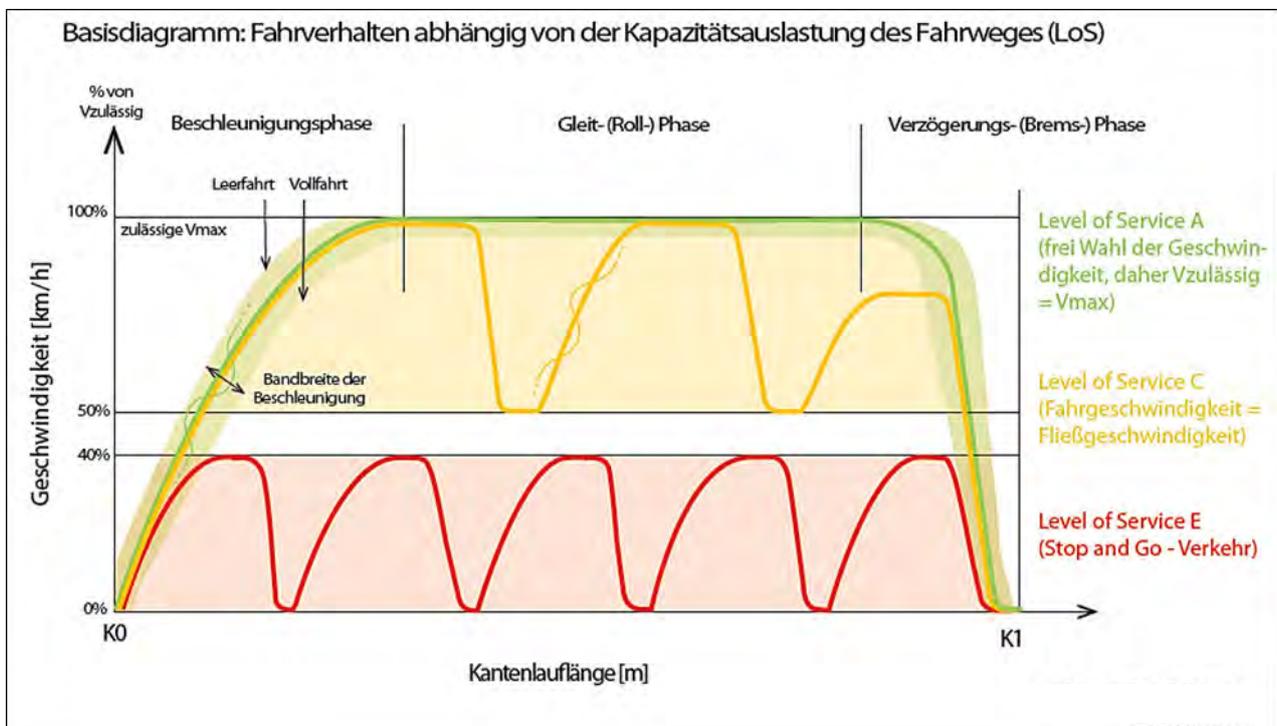
In Tabelle 2-3 sind die Fahrgeschwindigkeiten auf der Referenzstrecke je nach Straßenkategorie ersichtlich. Zu beachten ist, dass Fahrzeuge der Klasse N₂ und N₃ maximal 80 km/h fahren dürfen. Deshalb existiert in der Tabelle bei der Straßenkategorie I (Hochleistungsstraßen) eine Unterscheidung zwischen den Nutzfahrzeugklassen. $v_{zulässig}$ steht für die höchstzulässige Geschwindigkeit, welche auf der Referenzstrecke bei Straßenkategorie II und III bei 50 km/h und auf der Hochleistungsstraße, je nach Abschnitt, bei 60 km/h, 80 km/h bzw. 130 km/h liegt. v_{max} bezeichnet die maximal, v_{min} die minimal erreichbare Geschwindigkeit während der Gleitphase beim jeweiligen Level of Service. Darstellung 2-7 fasst das angenommene Fahrverhalten für die unterschiedlichen LoS in einer Grafik zusammen. Die Geschwindigkeiten wurden schließlich den Kantenabschnitten der Referenzstrecke zugeordnet.

Tabelle 2-3: Fahrgeschwindigkeiten in der Gleitphase je nach $v_{zulässig}$, LoS und Nutzfahrzeugklasse

		Straßenkategorie I N1	Straßenkategorie I N1, N2, N3	Straßenkategorie II, III N1, N2, N3
LoS-A*	$v_{max} = v_{zulässig}$	130 km/h	80 km/h	60 km/h
	$v_{min} = v_{zulässig}$	130 km/h	80 km/h	60 km/h
LoS-C*	$v_{max} = v_{zulässig}$	130 km/h	80 km/h	60 km/h
	$v_{min} = 70\%/50\%$ von $v_{zulässig}$	90 km/h	56 km/h	42 km/h
LoS-E*	$v_{max} = 40\%$ von $v_{zulässig}$	52 km/h	32 km/h	24 km/h
	$v_{min} = \text{Stopp}$	0 km/h	0 km/h	0 km/h

Quelle: eigene Bearbeitung arp (Marsch, Toifl)

Darstellung 2-7: Geschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Level of Service für die zweite Simulation



Quelle: eigene Bearbeitung arp (Dörr, Marsch, Toifl)

2.3 Erweiterung der fahrzeugseitigen Inputdaten für die zweite Fahrzyklen-Simulation

2.3.1 Auswahl der antriebsseitigen Spezifikationen für die Nutzfahrzeugklassen

Eine wesentliche Erkenntnis aus den verkehrslogistischen Leistungsanforderungen für die Mustertransportläufe N₁, N₂ und N₃ war nach dem Ergebnis der vorangegangenen Simulation, dass nicht nur der Dieselmotor mit unterschiedlichen Elektroantrieben kombiniert wird, sondern dass auch jeweils eine Kombination mit CNG und Elektromotor erfolgen sollte, da CNG als zukunftsfähiger Kraftstoff bei Nutzfahrzeugen angesehen werden kann. Daher wurde entschieden, die folgenden Antriebsarten bzw. Hybrid-Kombinationen, wenn sie von der Leistungsanforderung der N₁-, N₂- und N₃-Touren ausreichend und vom Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis noch zweckmäßig erscheinen, in der zweiten Fahrzyklen-Simulation zu berechnen (Kapitel 2.4). Daraufhin wurden alle angeführten Antriebsarten nur für das N₁-Fahrzeug in der KEP-Tour simuliert. Bei den größeren Nutzfahrzeugen N₂ und N₃ wurden aufgrund der technischen Sinnhaftigkeit nicht mehr alle Systeme verglichen. Um die unterschiedlichen Antriebe miteinander vergleichbar zu machen, wurden je Fahrzeugklasse alle Systeme mit der gleichen Antriebsleistung (120, 155 bzw. 330 kW) berechnet, die den Leistungsanforderungen der drei verkehrslogistischen Touren im Ballungsraum genügen.

- **Konventioneller Verbrennungskraftmotor (VKM mit Diesel oder CNG betrieben):** Diese herkömmliche Antriebsvariante für alle Nutzfahrzeugklassen dient dazu, um die übrigen Hybridisierungen mit dem Ausgangswert der konventionellen Antriebe vergleichen zu können. Es werden in der 2. Simulation sowohl ein reines Diesel-Fahrzeug als auch ein reines CNG-Fahrzeug simuliert. Die Basisberechnung findet daher für alle Nutzfahrzeugmuster **N₁, N₂, N₃** statt.
- **Micro Hybrid Electric Vehicle - P₁ (Diesel und CNG):** Dabei handelt es sich um eine kleinere Elektro-Maschine, die hauptsächlich zur Start/Stop-Funktion eingesetzt wird. Sie kann nur in sehr geringem Ausmaß Energie rekuperieren. Die Batterie ist demnach auch sehr klein. Eine Kombination ist mit Diesel und mit CNG möglich. Diese Variante wird für alle Nutzfahrzeugmuster (**N₁, N₂, N₃**) simuliert.
- **Mild Hybrid Electric Vehicle – P₁ (Diesel und CNG):** Mit einer Leistung von 10-15 kW ist dies eine leichte Form der Hybridisierung, wobei die E-Maschine zur teilweisen Rekuperierung der Energie und als Boost (Anfahrkraft-Unterstützung) beim Anfahren dient. Eine Kombination mit Diesel und mit CNG ist möglich. Diese Variante wird nur bei **N₁** berechnet.
- **Full Hybrid P₂ (Diesel und CNG):** Bei dieser Hybridisierung mit zwei Motoren ist es möglich, auch eine kurze Strecke von wenigen Kilometern rein elektrisch zu fahren. Eine Kombination ist mit Diesel und mit CNG möglich. Wird für **N₁, N₂ und N₃** berechnet.
- **Plug-In Hybrid P₂ / Dual Energy Concept (Diesel):** Ein rein elektrisches Fahren ist möglich, wobei die Batterie aber um einiges größer dimensioniert ist als beim Full Hybrid. Zudem muss die Batterie mittels Stromkabel extern aufgeladen werden. Eine Kombination wurde nur mehr mit Diesel simuliert. Wird für **N₁** und für **N₂ mit Dieselantrieb** berechnet.

- **Power Split Hybrid / PS^j (Diesel):** Diese Antriebsvariante mit Planetengetriebe für die Leistungsverzweigung zum Antrieb und zum Generieren ist ein komplexes System, das beispielsweise beim Pkw Toyota Prius eingesetzt wird. Es ist aber für Nutzfahrzeuge des betrachteten Typs eher nicht relevant und wird sich voraussichtlich nicht etablieren. Eine Kombination wurde nur mehr bei **N₁ mit Dieselantrieb** simuliert.
- **Series Hybrid (Diesel):** Dabei wird mit einem Verbrennungsmotor Energie für den E-Motor erzeugt und das Fahrzeug fährt dann mit dem E-Motor. Dieses System ist mit jenem einer diesel-elektrischen Lokomotive zu vergleichen. Der Series Hybrid wurde mit zwei Verbrennungskraftmaschinen (40 KW und 120 KW) simuliert. Diese Kombination wird nur mit Diesel-VKM für **N₁ und N₂** simuliert.
- **Elektrofahrzeug (Battery Electric Vehicle BEV),** das batterieversorgt weder mit Diesel- noch mit CNG-Antrieb kombiniert ist, wird für **N₁ und N₂** simuliert.

2.3.2 Hybridisierungskonzepte im Antriebsstrang^k

Die zur Simulation verwendeten Hybridisierungskonzepte sind in Darstellung 2-8 vorgestellt.

Die parallelen Hybridkonzepte unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Position der E-Maschine sowie die implementierten Hybridfunktionen:

- Im Micro HEV (typischerweise in Form eines Riemen-Starter-Generator-Konzepts) wird über eine leistungsschwache E-Maschine nur Start/Stop umgesetzt.
- Im Mild HEV (typischerweise als Kurbelwellen Starter Generator Konzept mit einer Trennkupplung umgesetzt) ermöglicht eine leistungstärkere E-Maschine auch begrenzt Rekuperation von Bremsenergie und Boosten.
- Im Full HEV (typischerweise als Kurbelwellen-Starter-Generator-Konzept mit zwei Trennkupplungen oder alternativ als getriebeintegrierter Starter Generator umgesetzt) schließlich wird neben der vollen Abdeckung von Rekuperation auch das elektrische Fahren angeboten.

Im Serien HEV wird die gesamte Antriebsenergie von mechanisch auf elektrisch (mittels Generator) und wieder zurück auf mechanisch (im Fahrmotor) gewandelt, sodass der Verbrennungsmotor zur Optimierung des Systemwirkungsgrades komplett vom Antrieb entkoppelt ist. Alle Hybridfunktionen sind wie im Full HEV möglich. In der Simulation werden zwei unterschiedliche Konzepte betrachtet, welche jeweils ihre Vorteile bzw. Nachteile zeigen:

- Im Serien HEV ₁ (Bestpunkt-Betrieb) wird die VKM nur in ihrem verbrauchsoptimalen Betriebspunkt, also bei konstanter Leistung, betrieben, was die Auslegung von VKM und Generator vereinfacht (und verbilligt), jedoch zu einem hohen Energiedurchsatz durch die Systembatterie führt (und damit zur Notwendigkeit, eine große Batterie zu verwenden), da die variierende Antriebsleistung ständig über die Batterie gepuffert werden muss.
- Im Serien HEV ₂ (Linien-Betrieb) wird hingegen die VKM Leistung der geforderten Antriebsleistung kontinuierlich angepasst, sodass eine kleine Batterie zur Abdeckung des

^j PS = Power Split Hybrid, bzw. Leistungsverzweigter Hybrid

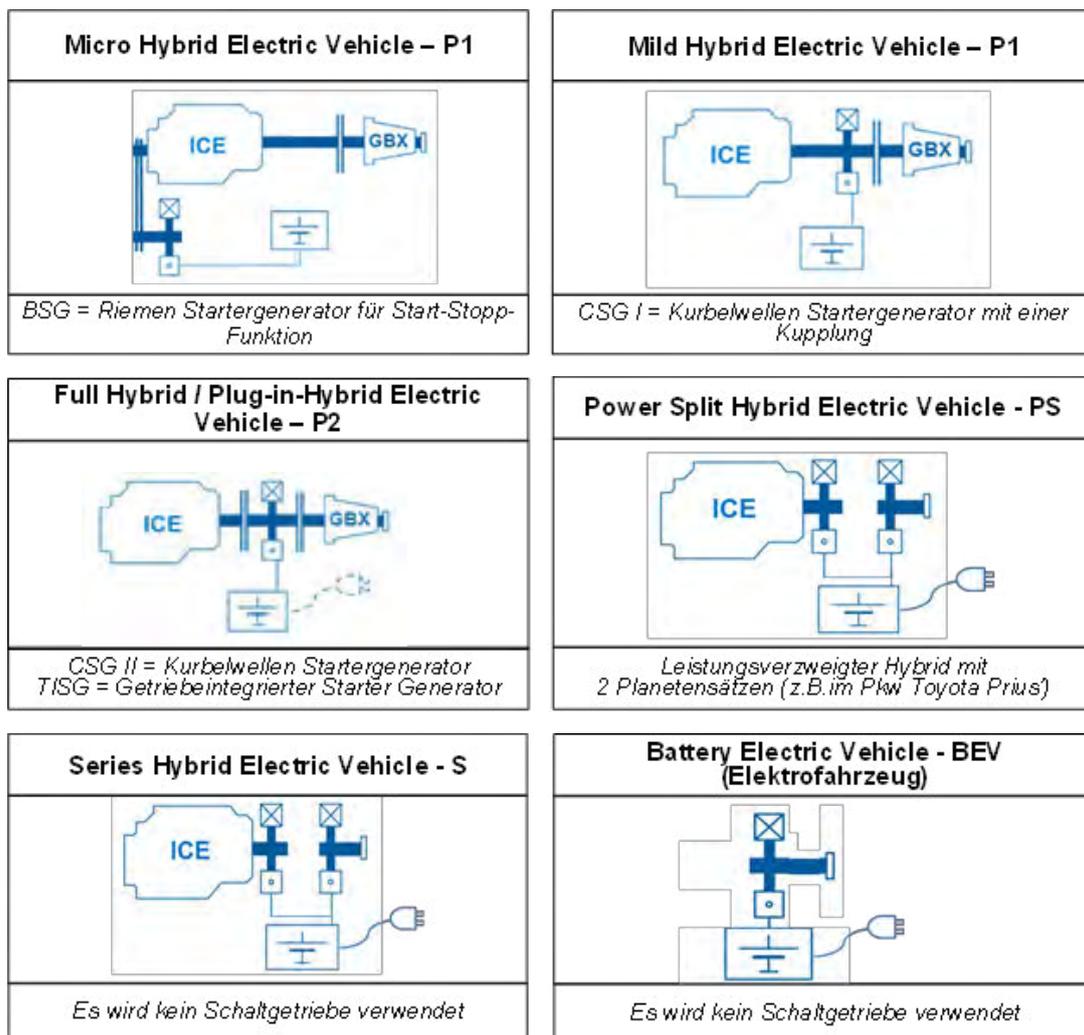
^k HEV = Hybrid Electric Vehicle

Rekuperationspotentials ausreicht. Allerdings wird dadurch die Auslegung von VKM und Generator aufwendig und die VKM kann nicht nur im verbrauchsoptimalen Betriebspunkt betrieben werden.

Im Power Split sind ebenfalls alle Hybridfunktionen voll verfügbar. Eine Leistungsverzweigung zwischen elektrischer und mechanischer Leistungsübertragung sorgt für eine Optimierung des Systemwirkungsgrades in jeweils verschiedenen Fahrsituationen.

Das reine Elektrofahrzeug ist genau genommen nicht als Hybridkonzept zu sehen, wird der Vollständigkeit halber aber trotzdem an dieser Stelle erwähnt.

Darstellung 2-8: Schema der Antriebskonfigurationen für hybridisierte bzw. elektrifizierte Fahrzeuge



Quelle: eigene Darstellung (AVL)

2.3.3 Technologiepakete und Hybridisierungsvarianten

Neben der jeweiligen Basiskonfiguration der Nutzfahrzeug-Triebstränge für die drei unterschiedlichen Nutzfahrzeugklassen N₁, N₂ und N₃ waren davon abgeleitete Varianten mit unterschiedlichen aktuellen

Technologiepaketen sowie Hybridisierungsvarianten bis zum reinen batteriebetriebenen E-Fahrzeug (BEV) Gegenstand der Fahrzyklussimulation.

Die unter Anwendung der einzelnen Technologie-Pakete und Hybridisierungsgrade gewonnenen Simulationsergebnisse Zyklusverbrauch bzw. CO₂-Emission wurden bezüglich der Potentiale zur Emissionsreduktion ausgewertet und einander gegenüber gestellt.

In der Berechnung der CO₂-Emissionen teil- oder vollelektrischer Antriebskonzepte, die über eine Plug-In-Einrichtung zur Nachladung der Batterie aus dem Stromnetz verfügen, wurden die bei der Produktion und Bereitstellung elektrischer Energie entstehenden CO₂-Emission sowie CO₂-Äquivalente anderer Treibhausgase berücksichtigt. Dabei wurde der lokale durchschnittliche Strom-Mix verwendet: CO₂-Äquivalent inkl. Ladungsverluste basierend auf einem Recharging Wirkungsgrad von 85 % und dem Strom-Mix für Österreich (inkl. Import) von 197 gCO₂-Äq/kWh (2020) (JOANNEUM RESEARCH, Symposium Energieinnovation, 16.02.2012).

Im Folgenden sei ein Überblick über die verwendeten (nicht-Hybrid) Technologien gegeben:

❑ **Reduzierter Fahrwiderstand (FW)**

Der Fahrwiderstand setzt sich im Wesentlichen aus Rollwiderstand (Reifenabrollwiderstand, Reibung in den Radlagern sowie im restlichen Antriebsstrang soweit nicht entkoppelbar, Schleifen der Bremsen auch im nicht betätigten Zustand, etc.), sowie den aerodynamischen Verlusten zusammen. Durch Verwendung beispielsweise von Reifen mit reduziertem Rollwiderstand, sowie Maßnahmen, die Aerodynamik des Fahrzeug betreffend, lassen sich beide Verluste reduzieren.

❑ **Erdgas bzw. Compressed Natural Gas (CNG)**

CNG Verbräuche und Emissionen wurden per Simulation unter Verwendung entsprechender Verbrauchskennfelder sowie unter Berücksichtigung des modifizierten Tanksystems und der daraus folgenden Erhöhung der Fahrzeugmasse ermittelt. Dabei wurde das Tankvolumen der Marktsituation entsprechend so angepasst, dass sich eine gegenüber der Dieselveariante zwar reduzierte aber akzeptable Reichweite ergibt.

❑ **Waste Heat Recovery System (WHRS)¹**

Unter Verwendung des Waste Heat Recovery Systems gelingt es, Abwärme aus dem Motor-Abgasstrang, die ansonsten ungenützt bleibt, über einen thermomechanischen Expander in mechanische bzw. im weiteren in elektrische Energie umzuwandeln und so nach Zwischenspeicherung einer späteren Verwendung im Fahrbetrieb zuzuführen. Dadurch erhöht sich der Systemwirkungsgrad im Triebstrang.

❑ **Start/Stop-System**

Dieses System erlaubt automatisiertes Abstellen und Neustarten des Verbrennungsmotors im Leerlauf, um den Leerlaufverbrauch vermeiden zu können. Diese Funktion ist auch bei allen Hybrid-Konzepten vorhanden.

¹ WHRS = Waste Heat Recovery System , bzw. System zur Nützung der Abwärme aus dem Motor-Abgasstrang

2.4 Ergebnisse der zweiten Simulation für die Nutzfahrzeugtypen nach Antriebsarten

2.4.1 Nutzfahrzeugklasse 1 im KEP-Dienst

2.4.1.1 Definition des Referenzzyklus und der Randbedingungen

□ Routenverlauf und Kantenstückelung

Diese Randbedingungen sind gegenüber der ersten Simulation in Kapitel 1.4.1.1 unverändert übernommen worden. Der Routenverlauf im Bedienraum entspricht den getroffenen Annahmen in der Darstellung 1-26 in Kapitel 1.3.5.2. Allerdings wurde das Höhenprofil des Laufweges nicht mehr zur Anwendung gebracht.

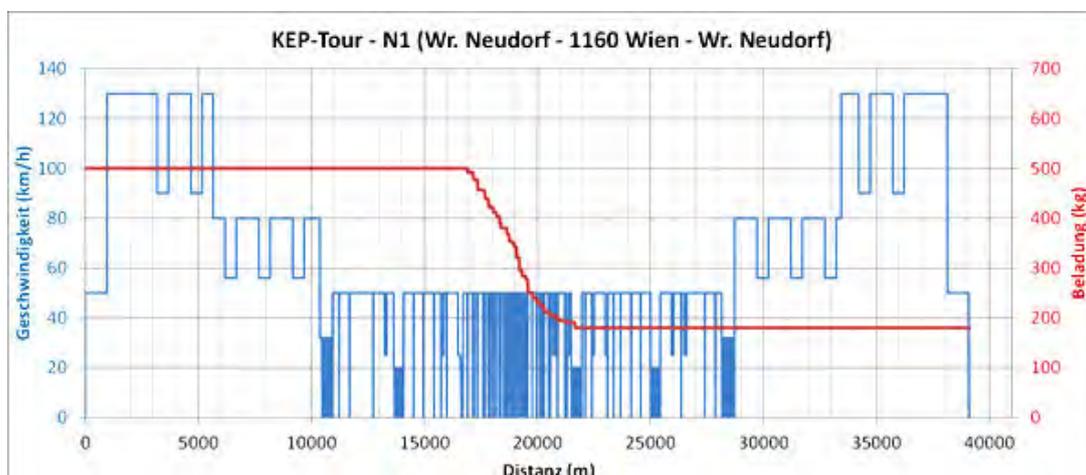
□ Fahrzeuggewicht und Beladungszustände

Der Fahrzeugtyp N1-Kastenwagen mit 3,5 t höchstzulässigem Gesamtgewicht, wovon 2,1 bis 2,5 t Eigenmasse und 1,0 bis 1,4 t Nutzlastkapazität sind, ist gleichgeblieben. Aufgrund der unterschiedlichen hybriden und elektrischen Antriebssysteme variiert aber das Gesamtgewichts-Nutzlastverhältnis aufgrund der zusätzlichen Gewichtskomponenten wie Batterie, zwei Tanks, zwei Motoren etc. Da mit 500 kg Zuladung das Lieferfahrzeug volumensorientiert ausgelastet wird, ändert sich an der logistischen Transportleistung und der Abschichtung nichts, geringfügig verändert sich jedoch der Transportaufwand (also die bewegte Fahrzeugmasse) je nach Antriebsart des Fahrzeuges.

□ Verkehrs- und logistikbedingte Stopps

Die logistikbedingten Stopps im Bedienraum im 16. Bezirk bleiben unverändert. In Hinblick auf die verkehrsbedingten Stopps kommt der repräsentative Mix der Verkehrszustände LoS im Bedienzeitfenster zwischen 8 h und 17 h zum Tragen. Das bedeutet, dass das Profil der maximal möglichen Geschwindigkeit im Kantenzug nunmehr in einer vierten Ausprägung (LoS-A*, LoS-C*, LoS-E* und als LoS-Mix) als Dateninput, wie in nachfolgender Darstellung abgebildet, zur Anwendung kommt.

Darstellung 2-9: Profil der maximal möglichen Geschwindigkeiten (nach Kantenzügen) und Beladungszustand der N1-KEP-Tour bei repräsentativem Level of Service



Quelle: eigene Darstellung (arp)

2.4.1.2 Fahrzeugvarianten und Komponenten

□ Systemauslegung Hybridisierung für Antriebsleistungsbedarf N1-KEP-Tour

Tabelle 2-4 zeigt eine detaillierte Zusammenstellung der Systemauslegung der verschiedenen Hybridisierungsvarianten des N1-Fahrzeuges in Bezug auf den KEP-Tour-N1-Fahrzyklus: Dargestellt sind die Systemleistungen, aufgeteilt in verbrennungsmotorische sowie durch den E-Motor bereitstehende maximale Leistung, die Reichweite, sofern möglich auch emissionsfrei (am Fahrzeug), Daten des Batteriesystems (bzgl. Kapazität und Typ) sowie die Fahrzeugmasse, die durch notwendige zusätzliche Antriebsstrangkomponenten (Batterie, E-Motor, CNG Tank) erhöht wird und somit die maximal zulässige Zuladung reduziert. Die Referenzmasse entspricht der jeweiligen Eigenmasse zuzüglich der aktuellen Beladung: Am Start ist die Beladung auf 500 kg festgesetzt, die sich durch die Abschichtungen auf 180 kg reduziert (um fehlgeschlagene Zustellungsversuche abzubilden). Der CNG-Tank wurde so dimensioniert, um 400 km Reichweite zu erzielen; die Masse erhöht sich dadurch um 50 kg. Beim rein elektrischen Fahrzeug (BEV) wurde eine Batteriegröße gewählt, die eine Reichweite von 100 km ermöglicht. Dabei erhöht sich die Eigenmasse um 400 kg.

Für den Einsatz für eine städtische KEP-Tour kommen prinzipiell alle Hybrid- und Elektro-Fahrzeug-Varianten in Frage, die in Kapitel 2.3 ausgeführt worden sind. Nur ein Brennstoffzellen-Fahrzeug ist hier nicht eigens berücksichtigt, weil es mit einem reinen Elektrofahrzeug gleichgesetzt werden kann und weil die Betankungsinfrastruktur für Wasserstoff in absehbarer Zeit nicht zur Verfügung stehen wird. Die Leistung des Hauptantriebes ist mit 120 kW festgelegt worden. Je nach Ausstattung mit Energiespeicher (Flüssigtank, Drucktank, Batterie) ist bei gleichbleibendem maximalen Gesamtgewicht des Fahrzeuges von 3,5 t die Nutzlastkapazität zwischen 1.000 kg beim reinem E-Fahrzeug bis 1.380 kg beim Mikro-Hybrid-Fahrzeug (nur mit Start/Stopp-Funktion) aufgespannt (s. Tabelle 2-4).

Tabelle 2-4: Fahrzeugvarianten und Komponenten nach Systemleistungsparametern für die N1-KEP-Tour

Fahrzeugvarianten und Komponenten N1	Kraftstoff	Systemleistung			Reichweite		Batteriesystem		Gewicht		
		Gesamt	VKM	E-Motor Spitzenleistung	Gesamt	Emissionsfrei	Technologie	Kapazität	Eigen-gewicht	Max. Zuladung	Referenz-Beladung
		---	kW	kW	kW	km	km	---	kWh	kg	kg
Konventionell	Dies el	120	120	---	500	---	---	---	2,100	1,400	Eigen-gewicht - Variabler Beladungszustand : Startbeladung 500 kg, 34 Abschichtungen bei Privatfahrten, Ende 180kg
	CNG	120	120	---	400	---	---	---	2,150	1,350	
Micro Hybrid P1 (BSG)	Dies el	120	120	10	500	---	---	---	2,120	1,380	
	CNG	120	120	10	400	---	---	---	2,170	1,330	
Mild Hybrid (CSG I)	Dies el	120	120	20	500	---	Li-Ion	1	2,140	1,360	
	CNG	120	120	20	400	---	Li-Ion	1	2,190	1,310	
Full Hybrid P2 (CSG II / TISG)	Dies el	120	120	40	500	---	Li-Ion	2	2,180	1,320	
	CNG	120	120	40	400	---	Li-Ion	2	2,230	1,270	
Plug-In Hybrid P2 / Dual energy concept	Dies el	120	120	60	500	200	Li-Ion	10	2,270	1,230	
PowerSplit Hybrid (PS)	Dies el	120	120	MOT: 80 GEN: 60	500	60	Li-Ion	5	2,320	1,180	
Series Hybrid (Bestpunkt-Betrieb) (SH)	Dies el	120	40	MOT: 120 GEN: 40	500	60	Li-Ion	10	2,350	1,150	
Series Hybrid (Linien-Betrieb) (SH)	Dies el	120	120	MOT: 120 GEN: 120	500	60	Li-Ion	5	2,360	1,140	
Elektrofahrzeug (BEV)	Strom	120	---	120	100	100	Li-Ion	50	2,500	1,000	

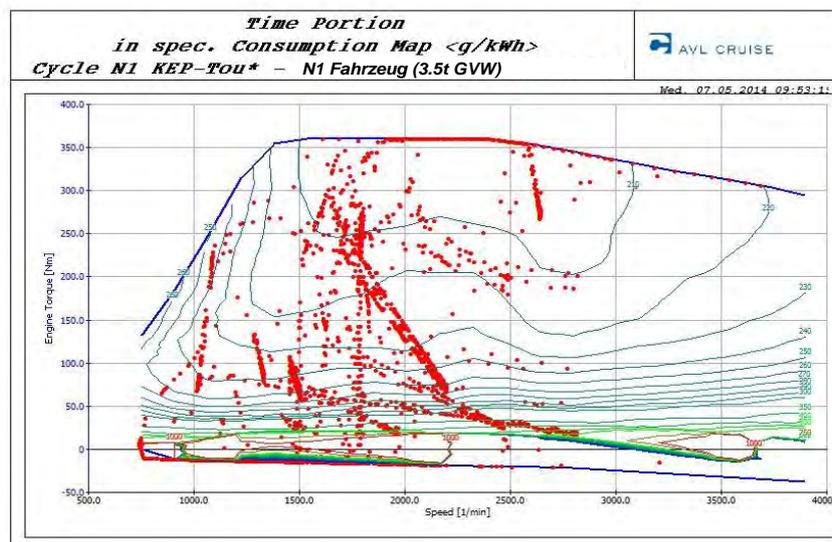
Quelle: Systemauslegung AVL

Anmerkung zur Spalte „E-Motor-Spitzenleistung“: MOT = abrufbare Motorleistung für das Fahren, GEN = maximale Rekuperationsleistung der Elektromaschine als Generator

Da es sich um die Frage dreht, welche Art der Hybridisierung bzw. Elektrifizierung für einen bestimmten typischen verkehrslogistischen Einsatz sowohl wirtschaftlich vertretbar als auch ökologisch zielführend erscheint, ist zunächst der Mustertransportlauf auf seine Leistungsanforderungen an den Antrieb hin zu überprüfen.

Darstellung 2-10 zeigt das Lastprofil in Form von Motordrehzahl und gefordertem Motordrehmoment, begrenzt von Vollast- und Schubmomentkurve des Verbrennungsmotors. Die roten Punkte stellen die momentanen Motordrehzahl- und Motordrehmomentpaarungen für jede Sekunde im Fahrzyklus dar. Als Muschelkurven ist der spezifische Kraftstoffverbrauch des Motors dargestellt. Es zeigt sich also, dass ein Teil der Zykluszeit im Teillastbereich (bei niedrigen Momenten und somit hohen spezifischen Verbrauchswerten) verbracht wird, aber auch, dass der Zyklus Vollastbeschleunigung(en) enthält, die ein geringes bzw. kein Hybridisierungspotential aufweisen.

Darstellung 2-10: Exemplarisches Lastkollektiv des konventionellen Fahrzeugs N1 mit Dieselmotor



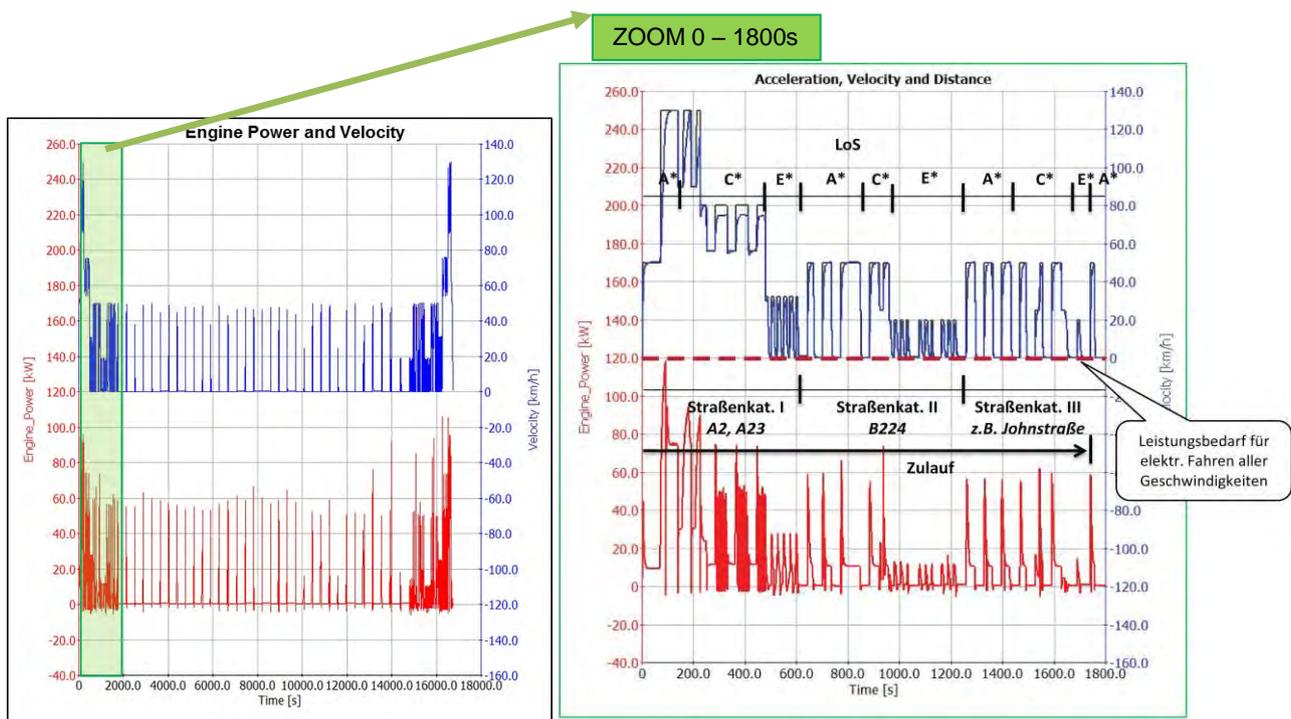
Quelle: Systemauslegung AVL

Das nachfolgende Zeit-Geschwindigkeitsdiagramm (s. Darstellung 2-11) zeigt den Fahrleistungsbedarf in kW, der nur für sehr kurze Zeiträume auf der Straßenkategorie I (Autobahn oder Schnellstraße) an die Grenze der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h (z.B. beim Überholen von Schwerverfahrzeugen) heranreicht und einen Spitzenbedarf von knapp 120 kW dem Antrieb abverlangt, im Bereich des Stadtrandes und auf städtischen Hochleistungsstraßen Beschleunigungsspitzen bis zu 80 km/h und im Ortsgebiet der Stadt bis zu 50 km/h aufweist, was die erforderliche Antriebsleistung auf unter 80 kW sinken lässt. Entsprechend des Fahrprofils ergibt sich, dass von $t = 1.000\text{ s}$ bis $t = 16.000\text{ s}$ die Fahrgeschwindigkeit kaum über 50 km/h steigt und die notwendige Fahrleistung ca. 60 kW beträgt, d.h. mit einer verfügbaren E-Motorleistung von 60 kW ließe sich der Testlauf über weite Strecken rein elektrisch fahren.

Zum besseren Verständnis des neuralgischen Bereiches des Fahrzyklus im Zulauf zum Stadtrand sind die ersten 30 Minuten Fahrzeit im rechten Bildteil in der Darstellung 2-11 herausgezoomt. Dabei kommt nicht

nur der freie Verkehrsfluss des LoS-Anteiles A*, sondern auch der zwar geringfügige, aber an der Wiener Südeinfahrt sporadisch vor allem zur Morgenspitze auftretende Stop-and-Go-Verkehr des LoS-Anteiles E* zum Tragen. Aus der Darstellung 2-11 lässt sich die maximale abgerufene Fahrleistung ablesen, die 120 kW beträgt, und somit der Nennleistung des konventionellen Fahrzeugs entspricht. Wenn das Zyklusprofil, also eigentlich das erzielte Geschwindigkeitsprofil des konventionellen Referenzfahrzeugs, gänzlich elektrisch befahren werden können soll, dann muss ein somit fahrleistungsgleiches Hybrid- oder Elektrofahrzeug die gleiche E-Motorleistung aufweisen.

Darstellung 2-11: Motorleistung und Fahrgeschwindigkeit der N1-KEP-Tour bei repräsentativem Level of Service



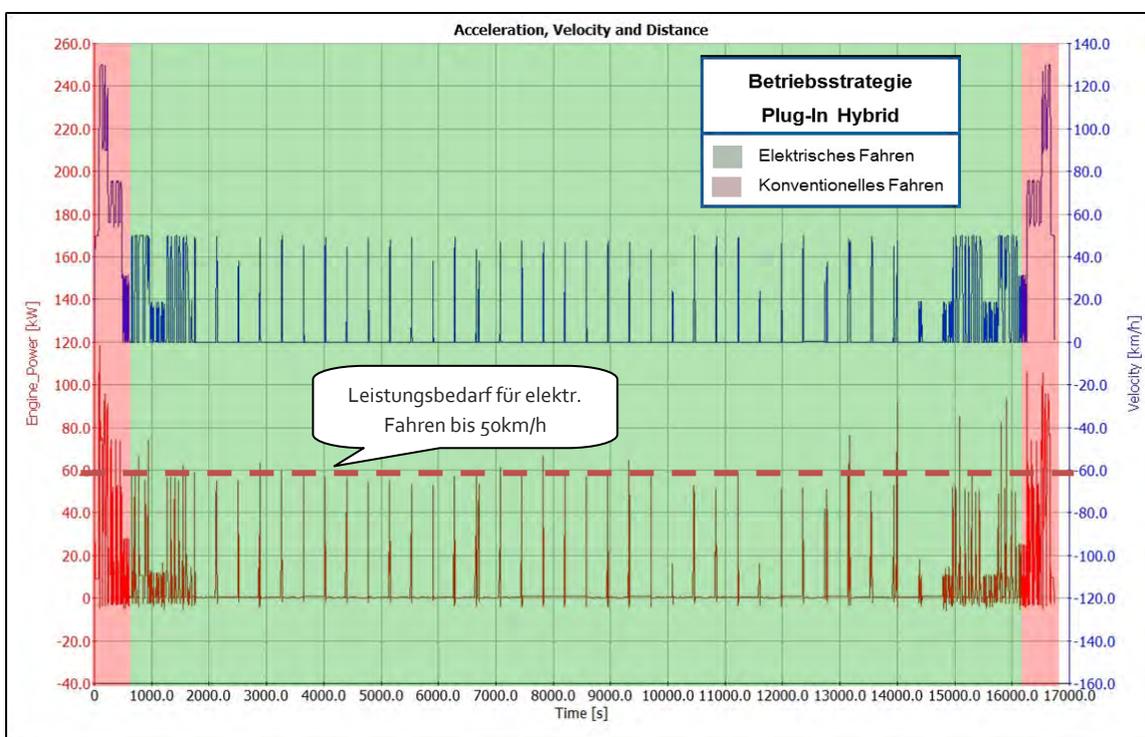
Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Die folgende Grafik simuliert die Fahrdynamik aufgrund der modellierten Geschwindigkeit des N1-Fahrzeugs im Zeitablauf der KEP-Tour. Dadurch wird ersichtlich, dass sich das Fahrzeug nur relativ kurze Zeitspannen im Bereich hoher Geschwindigkeiten befindet. Das Fahrzeug bewegt sich gemessen an der Fahrleistung (km) etwas mehr als die Hälfte der Lauflänge der Tour auf Hochleistungsstraßen, bei denen höhere Geschwindigkeiten (über 50 km/h) gefahren werden können. Die „Zeit“-Grafik macht jedoch deutlich, dass die Verteiltour mit den häufigen Stopps wesentlich mehr Zeit in Anspruch nimmt. Denn das N1-Fahrzeug befindet sich bei der KEP-Tour logistikbedingt sehr häufig und in kurzen Abständen im Stillstand.

Darstellung 2-12 zeigt zusammenfassend die Möglichkeiten eines ausreichend dimensionierten Plug-In Hybrid-Konzepts, in dem die Hochleistungsbereiche mit geforderter Antriebsleistung von 75 bis 120 kW und Geschwindigkeiten bis 130 km/h konventionell betrieben werden, während der dominante Teil mit max. 50 km/h rein elektrisch betrieben werden kann.

Aus den verkehrslogistischen Leistungsanforderungen der KEP-Tour ergeben sich die Einsatzbereiche für die aus Gründen der Motorenleistung konventionell mit Diesel- und CNG-Antrieb zu fahrenden Streckenabschnitte bzw. Kantenzüge (rot) und die aus Gründen des Energieverbrauchs und der Emissionen günstiger hybrid-elektrisch zu fahrenden Streckenabschnitte (grün) (s. Darstellung 2-12). Sollten die Fuhrpark betreibenden Unternehmen ihre Logistikprozesse dahingehend geprüft haben, kann die Entscheidung über die dazu passende Fahrzeugkonfiguration und deren Beschaffung vorgenommen werden. Dabei spielen aber Wirtschaftlichkeitskalküle hinein, wie sie in Kapitel 2.1 angesprochen worden sind, die eng mit dem Geschäftsmodell des jeweiligen fahrzeughaltenden Unternehmens zusammenhängen.

Darstellung 2-12: Antriebsleistungsbedarf der N1-Tour für Plug-In-Hybrid-Fahrzeug für konventionelles und elektrisches Fahren



Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

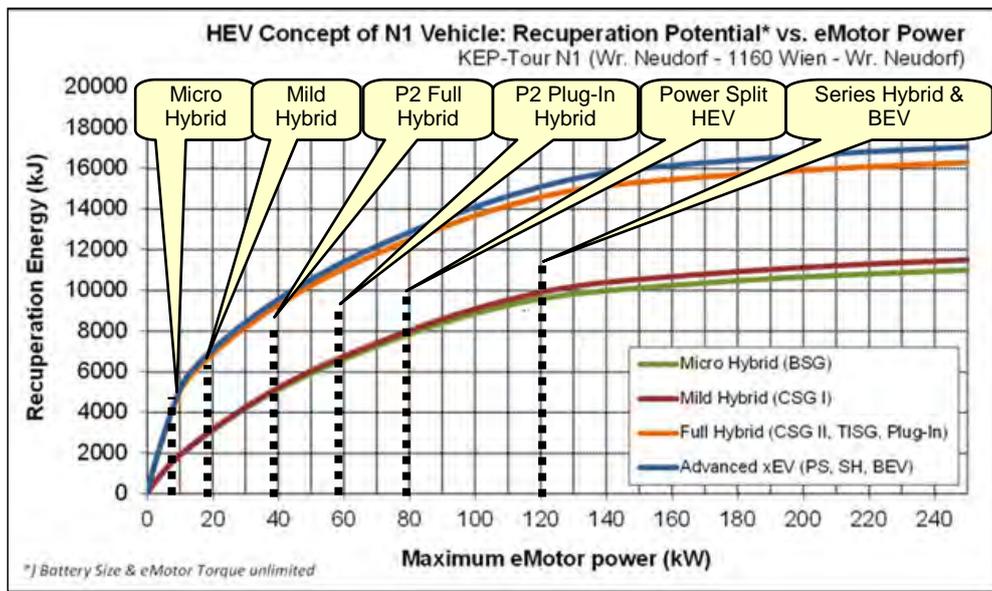
□ Rekuperationspotenziale aufgrund der verkehrslogistischen Einsatzanforderungen

In welchem Ausmaß Energie rekuperiert werden kann, hängt von der Fahrcharakteristik des Transportlaufes ab. Die Darstellung 2-13 zu den Rekuperationspotenzialen der Hybrid-Varianten von N1-Nutzfahrzeugen für die KEP-Tour macht deutlich, je leistungstärker der Elektromotor (kW) ist, desto mehr Energie kann zurückgewonnen werden, allerdings verläuft die Kurve des Energierückgewinns (kJ) degressiv und erreicht ab etwa 120 kW Motorleistungen eine asymptotische Sättigung. Damit steigen die Grenzkosten für einen nur mehr minimalen Energierückgewinn, sodass sich leistungstärkere E-Motoren kaum auszahlen. Daher wird hier eine Motorleistung bei etwa 120 kW als Obergrenze eines sinnvollen Hybrideinsatzes gesehen. Diese wurde bei den Vergleichsberechnungen als Motorleistung zugrunde gelegt.

Im ersten Schritt der Systemauslegung unterschiedlicher Hybridvarianten wurden die Rekuperationspotentiale für die Paarung Fahrzeug N1 in der KEP-Tour bestimmt: Dazu wurde ausgehend vom konventionellen Antriebsstrang des N1-Fahrzeuges für vier Grade der Hybridisierung bzw. Vollelektrifizierung und unter Variation der Leistung des zur Verfügung stehenden E-Motors im Antriebsstrang die rekuperierbare Energie entlang des Zyklus bestimmt^m (s. Darstellung 2-13). Je höher die Rekuperationsenergie, umso höher kann der Anteil elektrisch generierter Vortriebsleistung und umso geringer der Anteil konventioneller Vortriebsleistung sein. Für alle Antriebsstrangtypen zeigt sich, dass über 120 kW E-Motorleistung die rekuperierbare Energie nur mehr unwesentlich mit der zur Verfügung stehenden E-Motorleistung ansteigt. Oberhalb dieser Schwelle kann eine Erhöhung der Rekuperationsenergie also nur mehr mit überproportionaler Steigerung der E-Motorleistung erzielt werden. Sie wurde daher willkürlich als E-Motorgröße für ein rein elektrisches Antriebskonzept, sowie für ein Serienhybridkonzept festgesetzt. Die E-Motorleistungen für Micro-, Mild-, P2-Full-, P2-Plug-In, und Power-Split Hybrid Electric Vehicle wurden unter Berücksichtigung der Komponentenkosten wie folgt angenommen:

Micro HEV:	Max. E-Motorleistung = 10 kW
Mild HEV:	Max. E-Motorleistung = 20 kW
P2 Full HEV:	Max. E-Motorleistung = 40 kW
P2-Plug-In HEV:	Max. E-Motorleistung = 60 kW
Power-Split HEV:	Max. E-Motorleistung = 80 kW
SeriesHEV & BEV:	Max. E-Motorleistung = 120 kW

Darstellung 2-13: Rekuperationspotenziale (in kJ) von Hybrid-Nutzfahrzeugvarianten in Abhängigkeit von der maximalen Leistung des E-Motors für die N1-KEP-Tour



Quelle: eigene Darstellung (AVL)

^m Die Rekuperationsenergie wurde unter der Annahme unbeschränkten Drehmoments aus der E-Maschine, sowie unbeschränkter Akkumulatorkapazität errechnet.

❑ Verkehrslogistische Einsatzfähigkeit aufgrund der Systemleistungsparameter der Fahrzeugkonfigurationen

Sollen aus der Sicht des fahrzeughaltenden Logistikunternehmens die Systemleistungsparameter in der Tabelle 2-4 interpretiert werden, so interessieren als Schlüsselfaktoren die Reichweite einer Betankung und vor allem das Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis.

Neuralgischer Faktor Reichweite und Energiespeicherkapazität

Für einen Verteilerverkehr mit zahlreichen Stopps zur Zustellung verschiedener kleiner Sendungen ist die **Reichweite einer Betankung** mit Kraftstoffen angesichts der üblichen KEP-Tagestouren im Regelfall kein kritischer Faktor, denn bei Diesel ist die Reichweite mit 500 km und bei CNG mit 400 km mehr als ausreichend gegeben. Lediglich bei reinen Elektrofahrzeugen ist die Reichweite mit 100 km gegenwärtig so weit beschränkt, dass eine prognostizierbare Tourenplanung unabdingbar ist und möglichst auch außertourliche Aufladegelegenheiten in die Planung einbezogen werden sollten. Dabei sind die notwendigen E-Ladezeiten noch nicht angesprochen, die eine entsprechende risikominimierende Fuhrparkdisposition erfordern. Damit scheint vor allem die Einsatzfähigkeit für DienstleisterInnen mit kleiner Flotte und einem einzigen zentralen Betriebsstützpunkt im Regelfall derzeit nicht gegeben zu sein.

Ein kritischer Faktor für KEP-Dienste ist die Lage bzw. Distanz des Umschlagortes zum Bedienegebiet zur Verteilung der Sendungen. Da die modernen Cross-Docking-Stationen dafür an den Autobahnring im näheren Umlandgürtel der Ballungsräume angesiedelt wurden, sind die Fahrleistungen auf den Zulaufstrecken erheblich. Damit kommt nur für KEP-Dienste mit dezentralisierten innerstädtischen Standorten eine Distribution mit reinen E-Fahrzeugen in Frage. Je zentralisierter (und größer) sowie je weiter die Zulaufstrecke ins Bedienegebiet zu absolvieren ist, desto mehr wird die Reichweite des Fahrzeuges zum tragenden Verlässlichkeitsfaktor für den Logistikeinsatz.

Wie aus der Tabelle 2-4 abzulesen ist, variiert je nach Fahrzeugkonfiguration das **Nutzlastkapazitäts-Gesamtgewichtsverhältnis** zwischen dem gegenwärtigen Bestwert von 40 % für ein konventionelles N1-Diesel-Fahrzeug und nur 28 % für ein reines N1-Elektrofahrzeug. Allerdings ist relativierend anzumerken, dass die gewichtsmäßige Vollausslastung bei diesen Logistikverkehren selten auftritt, sondern meist eine volumenmäßige Auslastung im Vordergrund steht. Letztlich dominieren aber die Zahl der Sendungen und die der Zustellorte (Points of Delivery) die Tourenoptimierung.

Diese Tatsachen signalisieren dennoch Verbesserungspotenziale in Hinblick auf die *technische Transportproduktivität*. Die fahrzeugseitigen Verbesserungspotenziale zielen dann auf die Absenkung des *Transportaufwandes* (= der bewegten Fahrzeugmasse im Netz), wobei durch Leichtbauelemente eine Verbesserung im Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis, in gewissem Maße eine Verringerung im Fahrwegverschleiß, jedenfalls aber eine Reduktion der Verbrauchs- und Emissionswerte erreicht werden kann.

2.4.1.3 Simulationsergebnisse aus verkehrsökologischer Sicht

❑ Verbrauchscharakteristik in Abhängigkeit von den Verkehrszuständen (Levels of Service)

Im Vergleich der Verbrauchsdiagramme der ersten Simulation mit der starren lieferzeitunabhängigen Anwendung der drei Levels of Service, um zwischen den Extremen der Verkehrsabwicklung (optimale und

sehr ungünstige Verkehrsqualität entlang der gesamten Route) unterscheiden zu können, wurde im zweiten Simulationsdurchgang ein aus Verkehrszählungsdaten abgeleiteter, für die Bedienzeitfenster der jeweiligen Logistikverkehre repräsentativ gewichteter Mix an Levels of Service zugrunde gelegt (s. Kap. 2.2.2.3). Damit können bei Bedarf mehrere zeitverschobene Touren innerhalb des verkehrlogistischen Bedienzeitfensters an einem oder an etlichen Zustelltagen akkumuliert gerechnet werden. Das erscheint durchaus akzeptabel, weil bei mehreren Fahrten in zeitlicher Streuung, z.B. für eine Einsatzwoche, das Gesamtergebnis tendenziell sogar treffgenauer wird. Nicht zuletzt, weil im städtischen Verkehrsgeschehen eine abschnittsgenaue zeitliche Verortung der Levels of Service, außer vielleicht bei ausgesprochenen regelmäßigen Engpässen im Laufweg, ohnehin nicht vorgenommen werden kann.

Tabelle 2-5: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei Dieselfahrzeugen, Hybrid- und Elektrofahrzeugen für N1-KEP-Tour

N1 DIESEL - KEP-Tour N1: (Wr. Neudorf - 1160 Wien - Wr. Neudorf): Analyse und Auswirkungen der Verbesserungspotenziale durch neue/verbesserte Antriebstechnologien im Zeitraum bis 2020	Kraftstoff- energie Verbrauch	Kraftstoff- verbrauch	CO2- Emissionen	El. Energie Verbrauch inkl. Ladungs- verluste*	CO2- Äquivalente Emissionen**	Summe Energie- verbrauch (Fuel + Elektrisch*)	Summe CO2- Äquivalente Emissionen**	Verbesserung potential CO2 Emissionen
	MI/100km	l/100km	gCO ₂ /km	kWh/100km	gCO ₂ -Äq/km	MI/100km	gCO ₂ -Äq/km	%
N1 Diesel Konventionell ('Aktueller Stand der Technik')	598.6	17.0	446.7	---	---	598.6	446.7	Referenz
Reduktion Fahrwiderstand (cw -5% & fr -5%)	592.0	16.8	441.7	---	---	592.0	441.8	1.1
Micro Hybrid P1 (BSG)	417.5	11.9	311.5	---	---	417.5	311.5	30.3
Mild Hybrid (CSG I)	387.8	11.0	289.3	---	---	387.8	289.3	35.2
Full Hybrid P2 (CSG II / TISG)	359.6	10.2	268.3	---	---	359.6	268.3	39.9
Plug-In Hybrid P2/ Dual Energy Concept	222.1	6.3	165.7	15.1	29.7	276.4	195.4	56.3
PowerSplit Hybrid (PS)	359.9	10.2	268.6	---	---	359.9	268.6	39.9
Series Hybrid 1 ('Bestpunkt-Betrieb')	356.5	10.1	266.0	---	---	356.5	266.0	40.5
Series Hybrid 2 ('Linien-Betrieb')	387.8	11.0	289.3	---	---	387.8	289.3	35.2
Elektrofahrzeug (BEV)	---	---	---	49.0	96.5	176.4	96.5	78.4

N1 Fahrzeug mit 2.1L TDI Diesel Motor, MT6, GVW <3.5t

*) El. Energie Werte inkl. Recharging Wirkungsgrad von 85% (2020) **) Strom-Mix Österreich (inkl. Import) 197gCO₂-Äq/kWh für 2020 (Joanneum Research, Symposium Energieinnovation, 16.02.2021)

Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Fahrzeug-
maßnahmen

zusätzliche
Hybridisierung

Die Tabelle 2-5 zeigt eine Zusammenstellung aller Simulationsergebnisse des N1-Fahrzeuges mit dem Dieselmotorantrieb in Basiskonfiguration sowie mit verbessertem Fahrwiderstand: Dabei wurden sowohl der Luftwiderstandsbeiwert (c_w) als auch der Rollwiderstandskoeffizient (f_r) um 5 % abgesenkt. Gegenüber dem Basisverbrauch von 17,0 l/100km konnte mit dieser (konventionellen) Maßnahme der Verbrauch um 1,1 % auf 16,8 l/100km gesenkt werden. Höhere Verbrauchsvorteile können mit der zusätzlichen Hybridisierung auch in der einfachsten Konfiguration erzielt werden: Mit dem Micro Hybrid (BSG)ⁿ lässt sich beispielsweise der Zyklusverbrauch bereits um 30,3 % auf 11,9 l/100km reduzieren, wobei ein Großteil des Verbrauchsvorteils auf die enthaltene Start/Stopp-Einrichtung entfällt. Mit dem Full Hybrid P2 ergibt sich eine Verbrauchsreduktion von 39,9 % gegenüber der Basiskonfiguration. Mit dem Plug-In-System, also unter Verwendung eines Dual-Energy Concepts, kann diese noch weiter um 56,3 % auf nur mehr 6,3 l/100km Kraftstoffverbrauch verbessert werden, weil im Stadtstraßennetz hauptsächlich elektrisch

ⁿ BSG = Belt Starter Generator bzw. Riemen Starter Generator

gefahren wird. Die geringsten CO₂-äquivalenten^o Emissionen ergeben sich mit dem batteriebetriebenen Elektrofahrzeug (BEV), das damit ein CO₂-Verbesserungspotential von 78,4 % erzielt.

Die entscheidende Orientierung in der Tabelle 2-5 bietet die dritte Spalte von rechts „Summe Energieverbrauch (fuel + elektrisch) in MJ/100km“, weil dort die Basis für Vergleichbarkeit hergestellt wird. Sie gibt das energetische Maß für die geleistete Arbeit zur verkehrslogistischen Bedienung der KEP-Tour (39,1 km), normalisiert auf 100 km Lauflänge des Fahrweges (als im Kfz-Wesen üblicher Vergleichsmaßstab), an.

Der Energiebedarf (in der Tabelle nicht verzeichnet) ist immer derselbe, der Energieverbrauch variiert aber je nachdem, welche Wirkungsgrade die Antriebe ans Rad bringen, wieviel die Rekuperation von elektrischer Energie aufgrund der Bremsvorgänge im Gefälle bzw. der Anzahl der Stopps zum Energiebedarf der Tour beitragen kann und in welchem Ausmaß Arbeitsenergie durch Dissipation (Wärmeabgabe an die Umwelt) verschwendet wird. Letzteres kann durch das automatische Abschalten des Motors vor allem beim Anhalten an verkehrslichtsignalgeregelten Kreuzungen durch die Start/Stopp-Funktionalität der Micro-Hybrid-Variante schon deutlich gesenkt werden, sodass diese Variante als Standard angesehen werden kann. Mitzubedenken ist die ununterbrochene Energieversorgung von Hilfsbetrieben, wie zur Heizung, Klimatisierung und Kühlung.

Bei einer energieoptimalen Systemkonfiguration aus heutiger antriebstechnologischer Einschätzung erscheint gemessen am gegenwärtigen Standard der dieselbetriebenen Nutzfahrzeuge N1 eine „theoretische“ (d.h. vor allem unter Ausblendung von Wirtschaftlichkeitsfaktoren) Energieverbrauchsreduktion (fuel=Flüssigkraftstoff und elektrisch in MJ) von 100 % auf 43,7 % technologisch machbar. Diese Super-Variante eines Nutzfahrzeuges wäre ein *Plug-In-Hybrid mit einem Dual Energy Concept* und einem mittleren Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis von 35 %, das zudem eine hohe Reichweite für das elektrische Fahren von bis zu 200 km aufweisen könnte, wenn die KEP-Route, wie die Referenzstrecke, ein günstiges Ausmaß an Rekuperation zulässt. Ein reines Elektrofahrzeug würde schließlich den Energieverbrauch auf 29,5 % absinken lassen ohne allerdings die Reichweitensicherheit des Dual-Energy Fahrzeuges zu bilden.

Die Tabelle 2-6 zeigt eine Zusammenstellung aller Simulationsergebnisse des N1-Fahrzeuges im CNG-Betrieb in der Basiskonfiguration sowie mit verbessertem Fahrwiderstand: Im CNG-Betrieb können somit die CO₂-äquivalenten Emissionen um 5,9 % gesenkt werden. Mit einer 5 %igen Absenkung des Luftwiderstandsbeiwerts und des Rollwiderstandskoeffizienten kann die CO₂-Emission um 7,5 % gegenüber der Diesel-Basiskonfiguration reduziert werden. Mit dem Micro Hybrid (BSG) und mit CNG-Technologie lassen sich die CO₂-Emissionen um 42,5 % gegenüber der Diesel-Basiskonfiguration absenken, wobei auch hier ein Großteil des Vorteils auf das enthaltene Start/Stopp-System entfällt.

^o CO₂-Äquivalent inkl. Ladungsverluste basierend auf: Recharging Wirkungsgrad 85 % (2020) & Strom-Mix Österreich (inkl. Import) 197 gCO₂-Äq/kWh (2020; Quelle: Joanneum Research, Symposium Energieinnovation, 16.02.2012)

Tabelle 2-6: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei CNG-Fahrzeugen, Hybrid- und Elektrofahrzeugen für N1-KEP-Tour

N1 CNG - KEP-Tour N1: <i>(Wr. Neudorf - 1160 Wien - Wr. Neudorf):</i> <i>Analyse und Auswirkungen der Verbesserungspotenziale durch neue/verbesserte Antriebstechnologien im Zeitraum bis 2020</i>	Kraftstoff- energie Verbrauch	Kraftstoff- verbrauch	CO ₂ - Emissionen	El. Energie Verbrauch inkl. Ladungs- verluste*	CO ₂ - Äquivalente Emissionen**	Summe Energie- verbrauch (Fuel + Elektrisch*)	Summe CO ₂ - Äquivalente Emissionen**	Verbesserungs- potential CO ₂ - Emissionen
	MJ/100km	kg/100km	gCO ₂ /km	kWh/100km	gCO ₂ -Äq/km	MJ/100km	gCO ₂ -Äq/km	%
N1 Diesel Konventionell ('Aktueller Stand der Technik')	598.6	---	446.7	---	---	598.6	446.7	Referenz
N1 CNG Konventionell	747.5	16.6	420.4	---	---	747.5	420.4	5.9
Reduktion Fahrwiderstand (cw -5% & fr -5%)	734.4	16.3	413.1	---	---	734.4	413.1	7.5
Micro Hybrid P1 (BSG)	456.8	10.1	256.9	---	---	456.8	256.9	42.5
Mild Hybrid (CSG I)	422.7	9.4	237.7	---	---	422.7	237.7	46.8
Full Hybrid P2 (CSG II / TISG)	398.3	8.8	224.0	---	---	398.3	224.0	49.8

N1 Fahrzeug mit 2.1L CNG Motor, MT6, GVW <3.5t
 *) El. Energie Werte inkl. Recharging Wirkungsgrad von 85% (2020) **) Strom-Mix Österreich (inkl. Import) 197gCO₂-Äq/kWh für 2020 (Joanneum Research, Symposium Energieinnovation, 16.02.2012)

Fahrzeug-
maßnahmen

zusätzliche
Hybridisierung

Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Die mit CNG versorgte Basisvariante verbraucht wegen der geringeren volumetrischen Energiedichte gegenüber der Diesel-Basisvariante um ein Viertel mehr MJ, liegt aber bei den CO₂-Emissionen um 5,9 % günstiger, was in Einzelfällen wenig zum Klimaschutz beiträgt, bei größerer Verbreitung in Fuhrparks aber einen nennenswerten Beitrag bedeuten würde. Mit steigender Elektrifizierung (= Hybridisierungsgrad) vergrößert sich dieser Klimaeffekt, sodass die Full-Hybrid-Variante bereits günstiger liegt, als die besten Varianten bei der Diesel-Basisvariante mit Ausnahme der Plug-In-Hybrid-Variante mit zwei gleichwertigen Dual-Energie-Antrieben (s. Tabelle 2-6). Diese technisch aufwendigen Fahrzeuge machen aber bei einem kleinen Nutzfahrzeug in der CNG-Basisvariante wirtschaftlich keinen Sinn mehr.

2.4.1.4 Folgerungen für N1-Transportläufe aus verkehrslogistischer Sicht

Ob allerdings die hohen Anschaffungskosten für die antriebsseitige Doppelausstattung und die aufgrund dessen anspruchsvollere Wartung des Fahrzeuges mit dem „Groschengeschäft“ einer KEP-Dienstleistung überhaupt in Einklang gebracht werden kann, bleibt offen. Wenn allerdings die KEP-Dienste ihre Preise anheben müssten, weil die Verkehrspolitik für die Ballungsräume emissionsfreie Verkehrszonen verordnen würde, bekäme eine solche oder eine ähnliche Hybridvariante eine realistische Chance am Fahrzeugmarkt. Diese Varianten sind im Übrigen von der Einsatzfähigkeit nicht unmittelbar mit dem noch besser abschneidenden batteriebetriebenen Elektrofahrzeug zu vergleichen, weil im Gegensatz dazu keine Einschränkungen in der verkehrslogistischen Nutzung (wie Langlauffähigkeit mit Personalwechsel ohne zwingende tägliche Rückkehr in die Betriebsgarage) gegeben sind.

Hat ein KEP-Dienstleistungsunternehmen einen Betriebsmittelpunkt im Bedienraum (Auslieferbezirk), dann kommt auch eine rein elektrisch betriebene Fahrzeugflotte (BEV) von den Einsatzbedingungen in Betracht, wenn sich nicht zu viele topographische Hürden, wie Siedlungsgebiete in Hang- und Berglagen, die die Energiekapazität der Batterie zu rasch erschöpfen lassen, aufstellen. In diesem Fall des emissionsfreien Fahrens ist der Energieverbrauch für die geleistete Arbeit am Rad wegen des hohen Wirkungsgrades und der Energierückgewinnung der Elektromaschine weitaus am günstigsten (Reduktion

auf 29,5 % MJ/100km), ist aber zumindest derzeit mit betrieblichen Nachteilen und Risiken verbunden (s. Kapitel 1.1.2.6).

Die Nützlichkeit und Einsatzfähigkeit der anderen Varianten kann nur im konkreten geschäftlichen Einsatzszenario unter zusätzlicher Berücksichtigung der jeweiligen verkehrsinfrastrukturellen Rahmenbedingungen beurteilt werden. Wenn diese Beurteilung grundsätzlich positiv ausfällt, muss außerdem die betriebliche Wirtschaftlichkeit im Fuhrpark nachgewiesen sein.

❑ **Verbrauchsreduktionspotenziale durch Fahrzeugmaßnahmen und Hybridisierung**

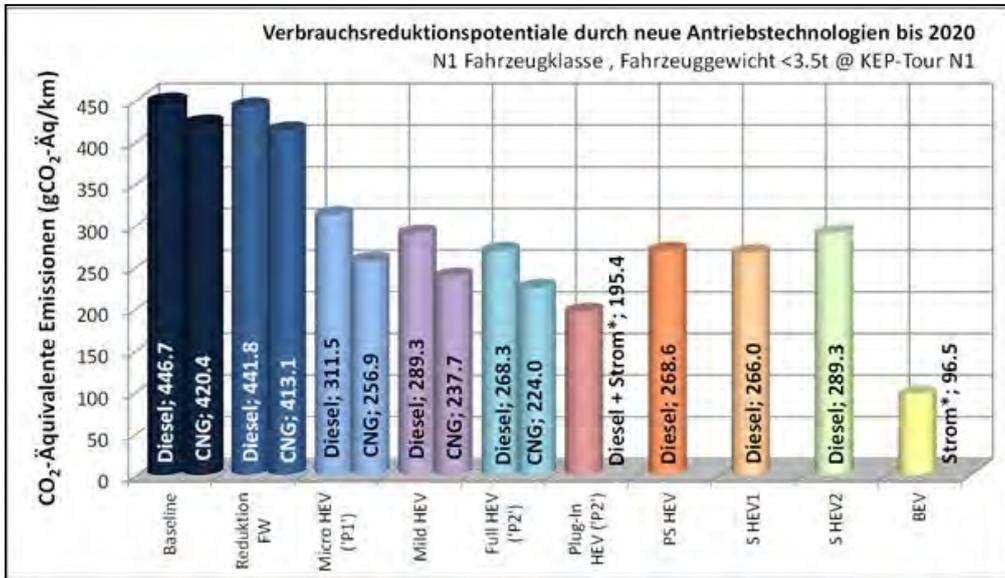
Bei der Betrachtung der Säulendiagramme zeigt sich der größte Reduktionssprung von den konventionellen Basisvarianten zum Micro-Hybrid mit seiner Start/Stop-Funktionalität, der deshalb in nächster Zeit bei allen Fahrzeugklassen seine Durchsetzung finden sollte. Zu bedenken ist jedoch, je größer die Nutzfahrzeuge und je höher die täglichen Fahrleistungen sind (wie schließlich bei N₃-Fernläufen), desto mehr ist das gesamte Energieversorgungssystem des Fahrzeuges mit seinen Hilfsbetrieben (Bordstrom für Klimatisierung etc.) in die Varianten-Betrachtung miteinzubeziehen. Sobald die Stromversorgung über Steckverbindung (Plug-In) oder – in die Zukunft gedacht – die Betankung mit Wasserstoff ins Spiel kommen, ist eine Varianten-Entscheidung nicht nur vom kommerziellen Einsatzfeld des Fuhrparkes, sondern auch von der vorzufindenden Betankungsinfrastruktur abhängig zu machen.

Bei der Stromversorgung von Fahrzeugen ist der klimagünstige österreichische Erzeugungsmix mit hohem Wasserkraftanteil zugrunde gelegt. In anderen Ländern sind der klimaneutrale Atomkraftanteil oder der Windkraftanteil zu berücksichtigen, aber auch kalorische Kraftwerke haben anderswo noch hohe Anteile, sodass Vergleichbarkeit in Hinblick auf CO₂-Emissionen in der Versorgungskette nicht so leicht hergestellt werden kann. Das gilt auch für die hier nicht explizit angeführte Wasserstoffversorgungskette für das Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug.

Andere Maßnahmen am Fahrzeug sind in den Berechnungen als Summe zur weiteren Verringerung des Fahrwiderstandes beim Rollwiderstand (Koeffizient f_r) und beim Strömungswiderstand (Koeffizient c_w) durch Verbesserung der Aerodynamik an der Fahrzeughülle (an Karosserie und Fahrwerk) und des Abrollwiderstandes am Radsatz bzw. Reifen berücksichtigt worden, bringen aber nur wenige einstellige Prozenteinsparungen. Womit wiederum auf die ungehobenen Potenziale der Verbesserung der Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnisse durch neue Leichtbau-Fahrzeugkonzepte hinzuweisen ist.

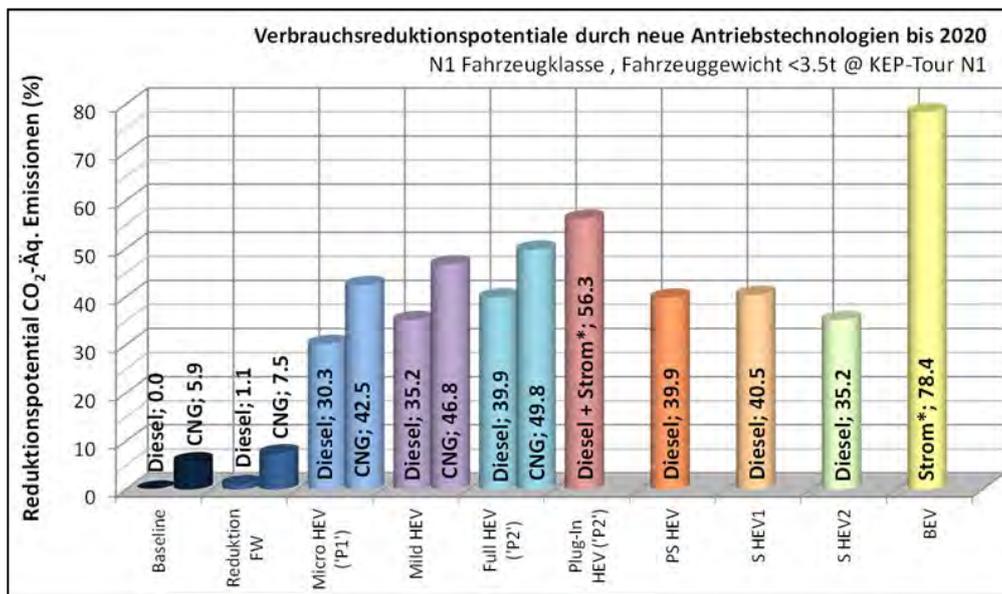
Die beiden folgenden Darstellungen (s. Darstellung 2-14 und Darstellung 2-15) zeigen die Reduktion der CO₂-äquivalenten Emissionen durch Fahrzeugmaßnahmen und Hybridisierung: Beginnend mit der Basiskonfiguration (Dieselmotor) und 447 gCO₂-Äq/km kann per Übergang auf CNG Technologie bereits eine Reduktion auf 420 gCO₂-Äq/km erzielt werden, während eine Reduktion des Fahrwiderstands um 5 % auf 441,8 gCO₂-Äq/km nur sehr geringe Vorteile bringt. Hingegen ermöglicht der Einsatz eines BSG-Systems (Micro HEV) mit seiner Start/Stop-Vorrichtung bereits eine Reduktion um ca. 30,3 % auf 311,5 gCO₂-Äq/km (Diesel) bzw. 42,5 % auf 256,9 gCO₂-Äq/km (CNG). Mit dem Plug-In-System (Diesel) im Dual-Energy System lassen sich eine Reduktion bereits um 56,3 % auf 195,4 gCO₂-Äq/km erzielen; dieses Reduktionspotential kann nur durch das vollelektrische Fahrzeug (BEV) übertroffen werden, für das sich ein Reduktionspotential von 78,4 % und damit CO₂-äquivalente Zyklus-Emissionen von 96,5 gCO₂-Äq/km ergeben.

Darstellung 2-14: Absolute Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO₂-Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N1-KEP-Tour^P



Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Darstellung 2-15: Prozentuelle Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO₂-Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N1-KEP-Tour



Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

^P FW = Fahrwiderstand

2.4.2 Nutzfahrzeugklasse 2 im Distributionsverkehr für den Lebensmittelhandel

2.4.2.1 Definition des Referenzzyklus und der Randbedingungen

□ Routenverlauf und Kantenstückelung

Diese Randbedingungen sind gegenüber der ersten Simulation in Kapitel 1.4.2.1 unverändert übernommen worden. Der Routenverlauf im Bedienraum entspricht den getroffenen Annahmen in der Darstellung 1-27 in Kapitel 1.3.5.2. Allerdings wurde das Höhenprofil des Laufweges nicht mehr angewendet, wodurch sich die Kantenstückelung anzahlmäßig verringert hat. Die Route verläuft von einem Zentrallager einer Warenhandelskette im Raum Wiener Neudorf zu Filialen (Points of Sale) im 16. Bezirk und als Leerfahrt wieder zurück.

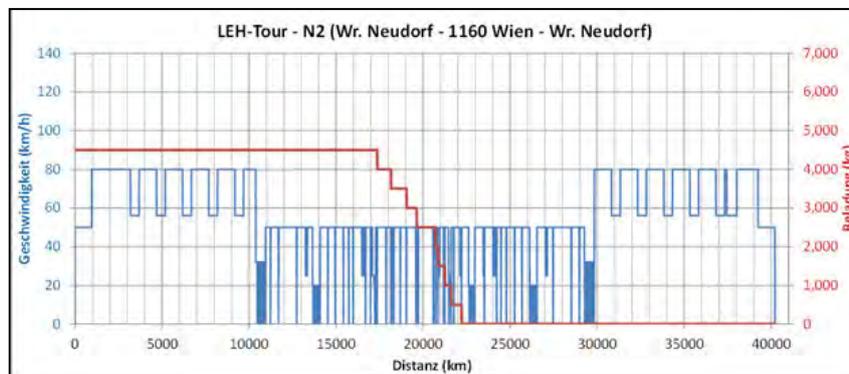
□ Fahrzeuggewicht und Beladungszustände

Das N2-Fahrzeug weist 12 t zulässiges Gesamtgewicht auf, wovon 4,5 t Eigenmasse und 7,5 t Nutzlastkapazität sind. Es wird bei dieser LEH-Tour mit einer Zuladung von 4,5 t Nutzlast = 9 Paletten à 500 kg ausgelastet, woraus sich ein maximales Fahrzeuggesamtgewicht von 9 t (+ Fahrpersonal) ergibt. Das den Antriebsvarianten zugrunde liegende Fahrzeugmuster ist mit den in Kapitel 1.4.2.2 beschriebenen technischen Daten ident. Unterschiede gegenüber dem Ausgangsmodell ergeben sich aufgrund der Hybridisierung bzw. Elektrifizierung im Antriebsstrang, deren technische Details hier nicht ausgebreitet werden, aber in Kapitel 2.3.1 ausgeführt wurden und in den Ergebnissen dargestellt sind.

□ Verkehrs- und logistikbedingte Stopps

Die logistikbedingten Halte im Bedienraum im 16. Bezirk bleiben mit neun Abschichtungen (9 x 1 Paletten je Point of Sale) und einer Haltezeit zum Ausladen von acht Minuten unverändert. In Hinblick auf die verkehrsbedingten Stopps kommt der repräsentative Mix der Verkehrszustände LoS im Bedienzeitfenster zwischen 6 h und 20 h zum Tragen. Das bedeutet, dass das Profil der maximal möglichen Geschwindigkeit im Kantenzug nunmehr in einer vierten Ausprägung (LoS-A*, LoS-C*, LoS-E* und LoS-Mix) als Dateninput wie in nachfolgender Darstellung abgebildet zur Anwendung kommt.

Darstellung 2-16: Profil der maximal möglichen Geschwindigkeiten (nach Kantenzügen) und Beladungszustand der N2-LEH-Tour bei repräsentativem Level of Service



Quelle: eigene Darstellung (arp)

2.4.2.2 Fahrzeugvarianten und Komponenten

□ Systemauslegung Hybridisierung für Antriebsleistungsbedarf N2-LEH-Tour

In der Fahrzeuggewichtsklasse über 3,5 bis 12 t kommen die in der Tabelle 2-7 aufgelisteten Basis- und Hybridisierungsvarianten des N2-Fahrzeuges für den Einsatz in der LEH-Tour in Frage. Die adäquate Motorleistung wurde mit 155 kW festgelegt und die Reichweite des Tanks erlaubt durchschnittlich 650 km bei Dieselmotorkraftstoff und 550 km bei Gaskraftstoff (CNG), aber nur 100 km bei der gewählten Batteriegröße. Zu beachten ist, dass sich die Fahrzeugeigenmasse bei der CNG-Variante um 200 kg bzw. beim reinen Elektrofahrzeug um 550 kg erhöht. Am Start ist die Beladung auf 4.500 kg festgesetzt, die sich durch neun Abschichtungen auf null reduziert. Je nach Variante können daher 6.950 kg bei reinem Elektroantrieb und bis zu 7.500 kg bei herkömmlichen Dieselfahrzeugen zugeladen werden.

Das Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnis schwankt also zwischen 58 % bei einem reinen Elektrofahrzeug und 62,5 % bei den dieselebasierten Varianten mit und ohne Start/Stop-Funktionalität. Damit wird ein deutlich günstigeres Nutzlastverhältnis als bei der N1-Fahrzeugklasse erzielt und die Spannweite ist vernachlässigbar geworden, zumal bei dieser Logistikaufgabe eine Gewichtsauslastung selten realisiert wird. Allerdings brauchen diese Fahrzeugmodelle bei Annäherung an das höchste Gesamtgewicht von 12 t aufgrund ihrer Fahrzeugabmessungen jedenfalls geplante und geregelte Ladezonen bei den Points of Sale.

Tabelle 2-7: Fahrzeugvarianten und Komponenten nach Systemleistungsparametern für die N2-LEH-Tour

Fahrzeugvarianten und Komponenten N2	Kraftstoff	Systemleistung			Reichweite		Batteriesystem		Gewicht		
		Gesamt	VKM	E-Motor Spitzenleistung	Gesamt	Emissionsfrei	Technologie	Kapazität	Eigen-gewicht	Max. Zuladung	Referenz-beladung
		kW	kW	kW	km	km	-	kWh	kg	kg	kg
Konventionell	Diesel	155	155	-	650	-	-	-	4.500	7.500	Eigen-gewicht + variabler Beladungszustand: Startbeladung 4500kg, 9 Abschichtungen, Ende 0kg
	CNG				550	-			4.700	7.300	
Start Stop	Diesel	155	155	-	650	-	-	-	4.500	7.500	
	CNG				550	-			4.500	7.500	
P2 (CSG I)	Diesel	155	155	40	650	-	Li-Ion	3	4.600	7.400	
	CNG				550	-			4.800	7.200	
P2 (TISG)	Diesel	155	155	80	650	-	Li-Ion	5	4.660	7.340	
	CNG				550	-			4.860	7.140	
Plug-In Hybrid	Diesel	155	155	155	650	220	Li-Ion	20	4.850	7.150	
Series Hybrid (Bestpunkt-Betrieb) (SH)	Diesel	155	50	MOT: 155 GEN: 50	650	80	Li-Ion	15	4.820	7.180	
Series Hybrid (Linien-Betrieb) (SH)	Diesel	155	155	MOT: 155 GEN: 155	650	80	Li-Ion	8	4.850	7.150	
Elektrofahrzeug (BEV)	Strom	155	-	155	100	100	Li-Ion	80	5.050	6.950	

Quelle: Systemauslegung AVL

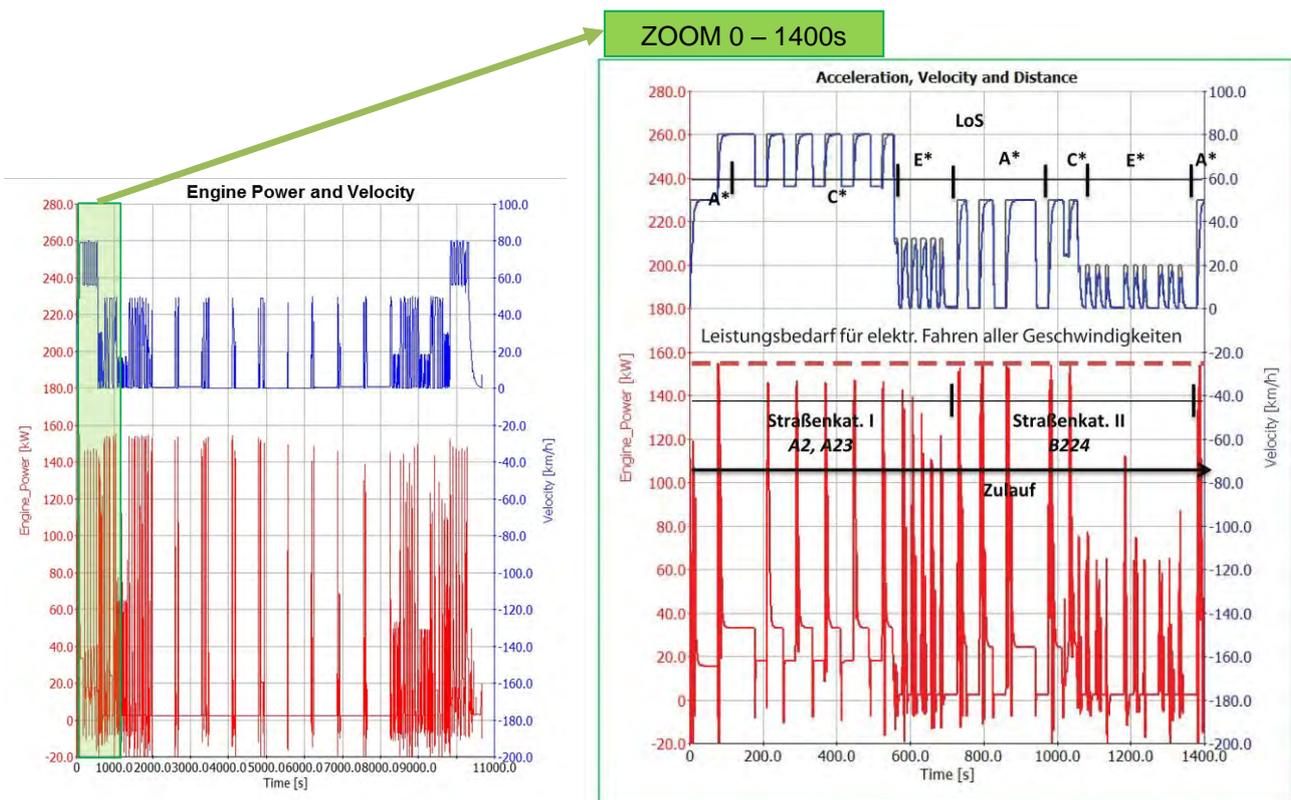
Anmerkung zur Spalte „E-Motor-Spitzenleistung“: MOT = abrufbare Motorleistung für das Fahren, GEN = maximale Rekuperationsleistung der Elektromaschine als Generator

In der nachfolgenden Darstellung 2-17 wird die Fahrdynamik aufgrund der modellierten Geschwindigkeit des N2-Fahrzeuges deutlich. Lediglich im Zu- bzw. Rücklauf erreicht das Fahrzeug die höchstzulässige Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h. Aufgrund dieser vergleichsweise hohen Geschwindigkeit befindet sich

das Fahrzeug trotz des längeren Laufweges – etwa die Hälfte der Tour wird eine Hochleistungsstraße frequentiert – nur eine sehr kurze Zeit in der Straßenkategorie I. Die Aufbereitung mit Zeitbezug zeigt auf, dass sich das Fahrzeug während der Verteiltour aufgrund der Dauer der Abschichtungen sehr häufig im Stillstand befindet.

Zusätzlich zeigt das (blau dargestellte) Zeit-Geschwindigkeitsdiagramm den (rot dargestellten) Bedarf an Antriebsleistung an. Das Fahrzeug befindet sich für einen kurzen Zeitraum auf der Straßenkategorie I (Hochleistungsstraße) und erreicht hier die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h, wobei eine Spitzenleistung von knapp 160 kW gebraucht wird. Anders als beim N1-Fahrzeug sinkt der Bedarf an Antriebsleistung bei einer reduzierten Geschwindigkeit von 50 km/h aber kaum ab und bedarf weiterhin einer Spitzenleistung von bis zu 160 kW. Die ersten 23 Minuten (1.400 Sekunden) des Fahrzyklus sind im rechten Bildteil herausgezoomt. Dadurch lässt sich der Einfluss des repräsentativen Level-of-Service-Mix mit dem freien Verkehrsfluss LoS-A*, der mit ca. 20 % anteilig an der Weglänge vertreten ist, und der Stop-and-Go-Verkehr LoS-E*, der mit ca. 5 % Weglänge vertreten ist, ablesen.

Darstellung 2-17: Motorleistung und Fahrgeschwindigkeit der N2-LEH-Tour bei repräsentativem Level of Service

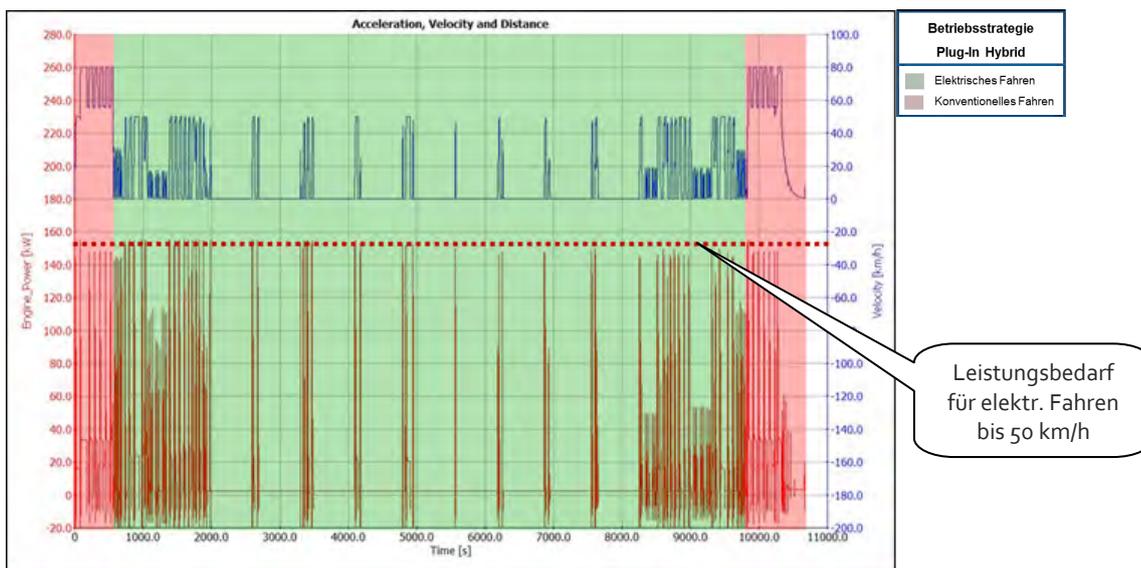


Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Entsprechend der Fahrleistung des konventionellen Fahrzeugs wurde die maximal notwendige E-Motorleistung mit ca. 160 kW festgesetzt. Aufgrund der hohen, im Stadtbetrieb häufig stark zu beschleunigenden Fahrzeugmasse ergibt sich auch bis ca. 50 km/h im Realfahrzyklus ein Leistungsbedarf

von ca. 160 kW. Dieser Leistungsbedarf entspricht damit auch der notwendigen Leistung für rein elektrisches Fahren im städtischen Bereich des Zyklus N2 bis zu einer Geschwindigkeit von max. 50 km/h. Es zeigt sich zudem, dass für (rein) elektrisches Fahren eines N2-Fahrzeugs mit rd. 9 t Gesamtgewicht am Tourenstart die Leistungsanforderungen an die elektrische Traktion auf einer solchen Hochleistungsstraße sehr hoch sind, sodass sich die Batterie für die Warenverteilung in der Stadt zu früh erschöpfen könnte. Es sei denn, an einer der ersten Anlieferstationen bestünde bereits eine Auflademöglichkeit für ein Plug-In-Fahrzeug.

Darstellung 2-18: Antriebsleistungsbedarf der N2-LEH-Tour für Plug-In-Hybrid-Fahrzeug für konventionelles und elektrisches Fahren



Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

□ Rekuperationspotenziale aufgrund der verkehrslogistischen Einsatzanforderungen

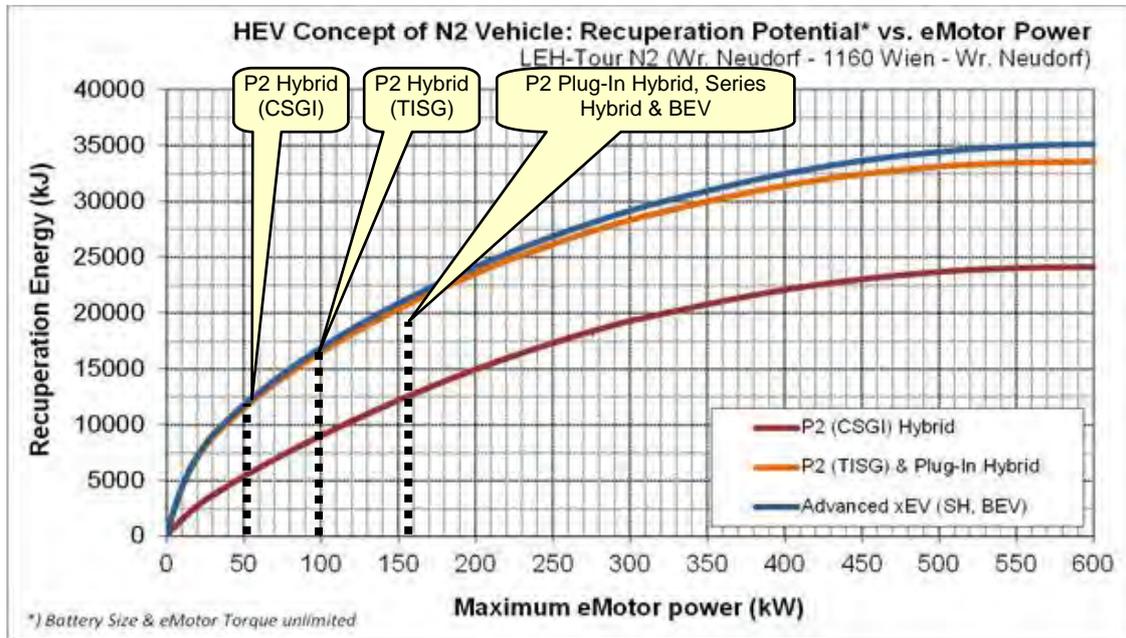
Die E-Motorleistungsniveaus für die betrachteten Hybridvarianten wurden wie folgt ausgelegt bzw. angenommen:

P ₂ HEV (CSGI) ^q :	Max. E-Motorleistung = 40 kW
P ₂ HEV (TISG) ^r :	Max. E-Motorleistung = 80 kW
P ₂ -Plug-In HEV, Series Hybrid & BEV:	Max. E-Motorleistung = 160 kW

^q CSG = Crankshaft Starter Generator bzw. Kurbelwellen Starter Generator

^r TISG = Transmission Integrated Starter Generator bzw. getriebeintegrierter Startergenerator

Darstellung 2-19: Rekuperationspotenziale (in kJ) von Hybrid-Nutzfahrzeugvarianten in Abhängigkeit von der maximalen Leistung des E-Motors für die N2-LEH-Tour



Quelle: eigene Darstellung (AVL)

Das prinzipielle Rekuperationspotenzial für die N2-Tour weist im mittleren Leistungsbereich günstigerweise nur eine leichte Degression auf. Das könnte die E-Maschine zwar leisten, aber die solchermaßen groß zu dimensionierende Batterie würde mit zunehmender Leistung hohe Kosten und eine Nutzlasteinbuße nach sich ziehen. Zu einer weiter gesteigerten Rekuperation wird es einer neuen Batteriegeneration bedürfen.

2.4.2.3 Simulationsergebnisse aus verkehrsökologischer Sicht

□ Verbrauchsreduktionspotenziale durch Fahrzeugmaßnahmen und Hybridisierung

Betrachtet man auch hier in der Tabelle 2-8 wiederum die dritte Spalte von rechts als erste, dann mag zunächst überraschen, dass das reine Elektrofahrzeug zwar bei den CO₂-Emissionen noch knapp vorne liegt, aber beim Gesamtenergieverbrauch (in MJ/100km) das Plug-In-Hybrid-Fahrzeug sogar besser abschneidet (251 MJ zu 231 MJ auf 100km). Die Deutung der Ursachen ist komplex, aber die Ausgangstatsachen, wie ein gegenüber dem N1-Fahrzeug dreimal so schweres Startgewicht von 9 t und eine reduzierte Anzahl der tourenbedingten Stopps als Rekuperationsgelegenheiten bei einer Points-of-Sale-Liefertour (aufgrund des Laufweges und der Ladungsabschichtung) von 64 auf 51, können als hauptsächliche Gründe beigetragen haben.

Bemerkenswert erscheint weiters, dass der Abstand zur nächstbesten Hybridvariante (Serien-Hybrid mit Bestpunkt-Betrieb) 225 %, also mehr als eine Verdoppelung des Energieverbrauches, beträgt. Die Plug-In-Hybrid-Variante senkt den Energieverbrauch auf der ausgewählten N2-LEH-Tour gegenüber einem herkömmlichen State-of-the-art-Dieselfahrzeug (= 100 %) auf sensationelle 24 %, gefolgt vom rein

batterie-betriebenen Fahrzeug auf 26,5 % und den Serien-Hybrid-Varianten mit einer Absenkung auf immerhin noch 55 % bzw. 59 %.

Es zeigt sich also, dass die Gruppe der „schweren“ Hybrid-Varianten, die „leichteren“ Hybridvarianten deutlich distanziert. Ist dem aber so, kommt den Wirtschaftlichkeitskalkülen im Betrieb über die Einsatzzeit sowie der Bedienfreundlichkeit der Technologie entscheidende Bedeutung zu, welcher Hybridisierungs- bzw. Elektrifizierungsgrad sich am nachfragebetonten Fahrzeugmarkt durchsetzen wird können.

Wird wegen der günstigeren Emissionswerte, v.a. bei Schadstoffen, als Basisfahrzeug eine CNG-Variante gewählt, dann halten sich die Energieverbrauchsreduktionen in engen Grenzen, weil das CNG-Basisfahrzeug eine um ein Viertel reduzierte volumetrische Energiedichte gegenüber dem Diesel-Basisfahrzeug aufweist, wenn die Fahrzeuge gewichtsmäßig – der Tankinhalt ist dabei ausschlaggebend – gleich bleiben sollen. Da der CNG-Tank aufwendig eingerichtet werden muss, kommen zweckmäßigerweise nur die leichten antriebsunterstützenden Hybrid-Varianten in Betracht. In diesem Fall reduziert sich der Energieverbrauch durch die Hybridisierung auf bis zu 84 % des Niveaus der Diesel-Basisvariante. Deutlicher fällt die CO₂-Reduktion aus, die bis auf 63 % gedrückt werden kann.

Wenn also sowohl die Luftschadstoff-Reduktion, z.B. in Immissionsschutzgebieten nach dem Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L), als auch der Klimaschutz eine Motivation darstellen, kommen CNG-Varianten durchaus in Frage, zumal die Tankinfrastruktur ausreichend verbreitet ist. Die Wirtschaftlichkeit könnte durch die Abgabepolitik positiv mitgestaltet werden.

Tabelle 2-8: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei Dieselfahrzeugen, Hybrid- und Elektrofahrzeugen für N₂-LEH-Tour

N ₂ DIESEL - LEH-Tour N ₂ : (Wr. Neudorf - 1160 Wien - Wr. Neudorf) <i>Analyse und Auswirkungen der Verbesserungspotenziale durch neue/verbesserte Antriebstechnologien im Zeitraum bis 2020</i>	Kraftstoff Energie Verbrauch	Kraftstoffverbrauch	CO ₂ -Emissionen	El. Energie Verbrauch inkl. Ladungsverluste*	CO ₂ -Äquivalente Emissionen**	Summe Energieverbrauch (Fuel + Elektrisch*)	Summe CO ₂ -Äquivalente Emissionen**	Verbesserungspotential CO ₂ Emissionen
	MJ/100km	l/100km	gCO ₂ /km	kWh/100km	gCO ₂ -Äq./km	MJ/100km	gCO ₂ -Äq./km	%
N ₂ Diesel Konventionell ('Aktueller Stand der Technik')	947.7	26.9	707.3	---	---	947.7	707.3	Referenz
Reduktion Fahrwiderstand (cw -10% & fr -5%)	930.2	26.4	694.2	---	---	930.2	694.2	1.8
Start & Stop Functionality	764.6	21.7	570.6	---	---	764.6	570.6	19.3
P2 (CSG I) Hybrid	714.0	20.3	532.9	---	---	714.0	532.9	24.7
P2 (TISG) Hybrid	665.7	18.9	496.8	---	---	665.7	496.8	29.8
Plug-In Hybrid P2 / Dual Energy Concept	137.8	3.9	102.9	25.9	50.9	230.9	153.8	78.3
Series Hybrid 1 ('Bestpunkt-Betrieb')	519.9	14.8	388.0	---	---	519.9	388.0	45.1
Series Hybrid 2 ('Linien-Betrieb')	558.6	15.9	416.9	---	---	558.6	416.9	41.1
Elektrofahrzeug (BEV)	---	---	---	69.7	137.4	251.1	137.4	80.6

N₂ Fahrzeug mit 5.1L TDI Diesel Motor, AMT6, verbrauchsorientiertes Schalten, GWW <12t
 *) El. Energie Werte inkl. Recharging Wirkungsgrad von 85% (2020) **) Strom-Mix Österreich (inkl. Import) 197gCO₂-Äq./kWh für 2020 (Joanneum Research, Symposium Energieinnovation 2016 03 2020)

Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Fahrzeugmaßnahmen

zusätzliche Hybridisierung

Die Tabelle 2-8 zeigt eine Zusammenstellung aller Simulationsergebnisse des N₂-Fahrzeuges mit dem Dieselmotorantrieb in Basiskonfiguration sowie mit verbessertem Fahrwiderstand: Gegenüber dem Basisverbrauch von 26,9 l/100 km konnte mit der Maßnahme Reduktion Fahrwiderstand der Verbrauch um 1,8 % auf 26,4 l/100 km gesenkt werden. Höhere Verbrauchsvorteile können durch zusätzliche Hybridisierung wie z.B. mit dem Start/Stop-System erzielt werden. Damit lässt sich beispielsweise der Zyklusverbrauch um 19,3 % auf 21,7 l/100 km absenken. Mit dem Hybrid P₂ ergibt sich eine

Verbrauchsreduktion von 24,7 % (CSGI) sowie 29,8 % (TISG), die mit dem Plug-In System, also unter Verwendung eines Dual-Energy Concepts, um 78,3 % oder nur mehr 3,9 l/100km Kraftstoffverbrauch verbessert werden kann, weil im Stadtstraßennetz hauptsächlich elektrisch gefahren wird. Die geringsten CO₂-äquivalenten Emissionen ergeben sich mit dem batteriebetriebenen Elektrofahrzeug (BEV), das ein CO₂-Verbesserungspotenzial um 80,6 % erzielt.

Tabelle 2-9: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei CNG-Fahrzeugen, Hybrid- und Elektrofahrzeugen für N2-LEH-Tour

N2 CNG - LEH-Tour N2: (Wr. Neudorf - 1160 Wien - Wr. Neudorf) <i>Analyse und Auswirkungen der Verbesserungspotenziale durch neue/verbesserte Antriebstechnologien im Zeitraum bis 2020</i>	Kraftstoff- energie Verbrauch	Kraftstoff- verbrauch	CO ₂ - Emissionen	El. Energie Verbrauch inkl. Ladungs- verluste*	CO ₂ - Äquivalente Emissionen**	Summe Energie- verbrauch (Fuel + Elektrisch*)	Summe CO ₂ - Äquivalente Emissionen**	Verbesserungs- potential CO ₂ Emissionen
	MJ/100km	kg/100km	gCO ₂ /km	kWh/100km	gCO ₂ -Äq/km	MJ/100km	gCO ₂ -Äq/km	%
N2 Diesel Konventionell ('Aktueller Stand der Technik')	947.7	---	707.3	---	---	947.7	707.3	Referenz
N2 CNG Konventionell	1196.3	26.5	672.8	---	---	1196.3	672.8	4.9
Reduktion Fahrwiderstand (cw -10% & fr -5%)	1179.5	26.2	663.4	---	---	1179.5	663.4	6.2
Start & Stop Functionality	926.6	20.5	521.1	---	---	926.6	521.1	26.3
P2 (CSG I) Hybrid	865.4	19.2	486.7	---	---	865.4	486.7	31.2
P2 (TISG) Hybrid	794.7	17.6	446.9	---	---	794.7	446.9	36.8

N2 Fahrzeug mit 7.8L CNG Motor, AMT6, verbrauchsorientiertes Schalten, GVW <12t
 *) El. Energie Werte inkl. Recharging Wirkungsgrad von 85% (2020) **) Strom-Mix Österreich (inkl. Import) 197gCO₂-Äq/kWh für 2020 (Joanneum Research, Symposium Energieinnovation, 16.02.2012)

Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Fahrzeugmaßnahmen

zusätzliche Hybridisierung

Für den alternativen Antrieb mit CNG im konventionellen Referenzfahrzeug ergibt sich ein mittlerer Zyklusverbrauch von 26,5 kg/100km oder 672,8 gCO₂/km (s. Tabelle 2-9). Gegenüber dem konventionellen N2-Fahrzeug mit Dieselmotor ermöglicht der CNG-Betrieb eine CO₂-Reduktion von 4,9 %.

2.4.2.4 Folgerungen für N2-Transportläufe aus verkehrslogistischer Sicht

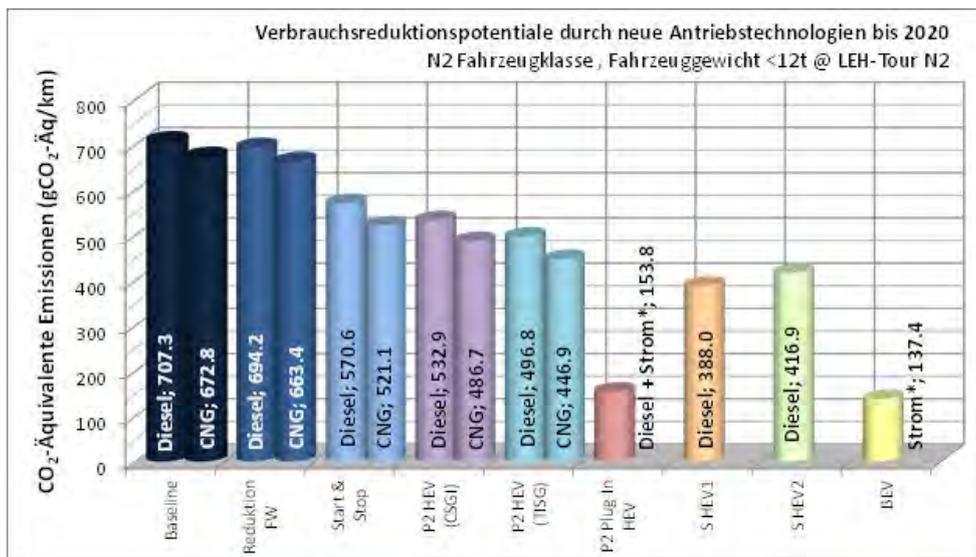
❑ Verbrauchsreduktionspotenziale durch Fahrzeugmaßnahmen und Hybridisierung

Werden die Säulendiagramme mit den absoluten Reduktionsgrößen in g CO₂-Äquivalenten pro km und den prozentuellen Reduktionspotenzialen betrachtet, so wird der überlegene verkehrsökologische Effekt durch den Einsatz eines alternativen Elektroantriebes substituierend je nach Befahrungsbedingungen im Zuge des Laufweges hervorgehoben. Dabei eliminiert die Plug-In-Hybrid-Variante mit ihrer Tankreichweite und mit ihrer Batteriekapazität jedes Ausfallrisiko und ermöglicht vielfältige Einsatzaufgaben im regionalen Einzugsbereich eines Verkehrslogistik-Unternehmens. Die seriellen Hybrid-Varianten minimieren das Ausfallrisiko ebenfalls, sind aber im freizügigen Fahrverhalten etwas gedämpfter und im Reduktionspotenzial deutlich gebremster. Das Elektrofahrzeug bedarf wie erwähnt einer berechenbaren Einsatzplanung in geeigneten Bedienräumen, die im Übrigen eine emissionsfreie Mobilität wertschätzen. Voraussetzung ist aber, dass sich die Verkehrslogistik-Unternehmen an diese Technologie in ihrem Fuhrparkmanagement und bei der Fahrzeugwartung qualifiziert anpassen können.

Darstellung 2-20 sowie Darstellung 2-21 zeigen die Reduktion der CO₂-äquivalenten Emissionen durch Fahrzeugmaßnahmen und Hybridisierung. Beginnend mit der Basiskonfiguration (Dieselmotor) und 707,3 gCO₂-Äq/km kann mit dem Übergang auf CNG-Technologie bereits eine Reduktion um 4,9 % auf 672,8 gCO₂-Äq/km erzielt werden, während für diese Anwendung eine oben beschriebene Reduktion des Fahrwiderstands nur sehr geringe Vorteile bringt. Hingegen ermöglicht der Einsatz eines Start/Stopp-

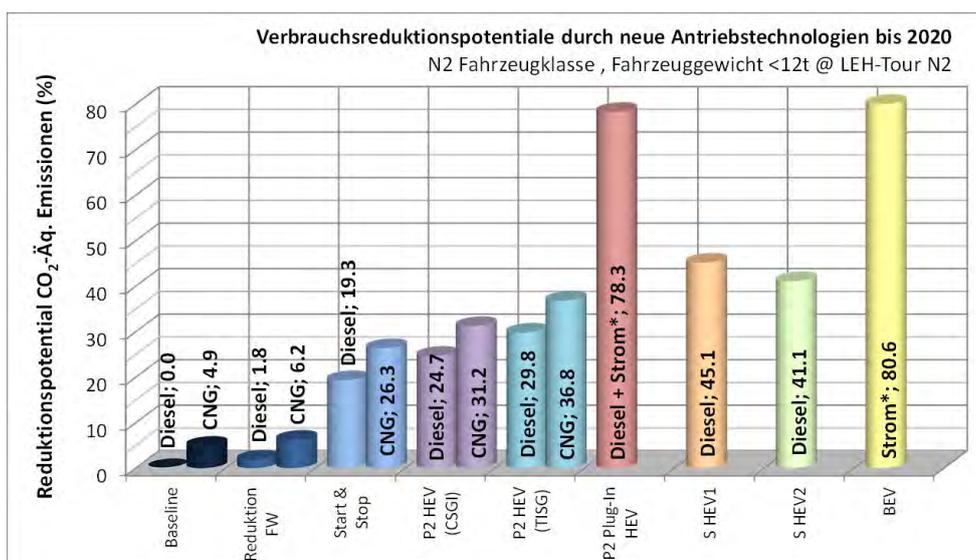
Systems bereits eine Reduktion um ca. 19 % auf 570,6 gCO₂-Äq/km (Diesel) bzw. um 26,3 % auf 521,1 gCO₂-Äq/km (CNG). Mit dem Plug-In System (Diesel) im Dual-Energy System lässt sich eine CO₂-Reduktion bereits um 78,3 % auf 153,8 gCO₂-Äq/km erzielen. Dieses Reduktionspotential kann nur durch das vollelektrische Fahrzeug (BEV) übertroffen werden, für das sich ein Reduktionspotential von 80,6 % und damit eine CO₂-äquivalente Zyklus-Emissionen von 137,4 gCO₂-Äq/km ergibt.

Darstellung 2-20: Absolute Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO₂-Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N2-LEH-Tour



Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Darstellung 2-21: Prozentuelle Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO₂-Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N2-LEH-Tour



Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

2.4.3 Nutzfahrzeugklasse 3 im Zulieferverkehr zu Großabnehmer

2.4.3.1 Definition des Referenzzyklus und der Randbedingungen

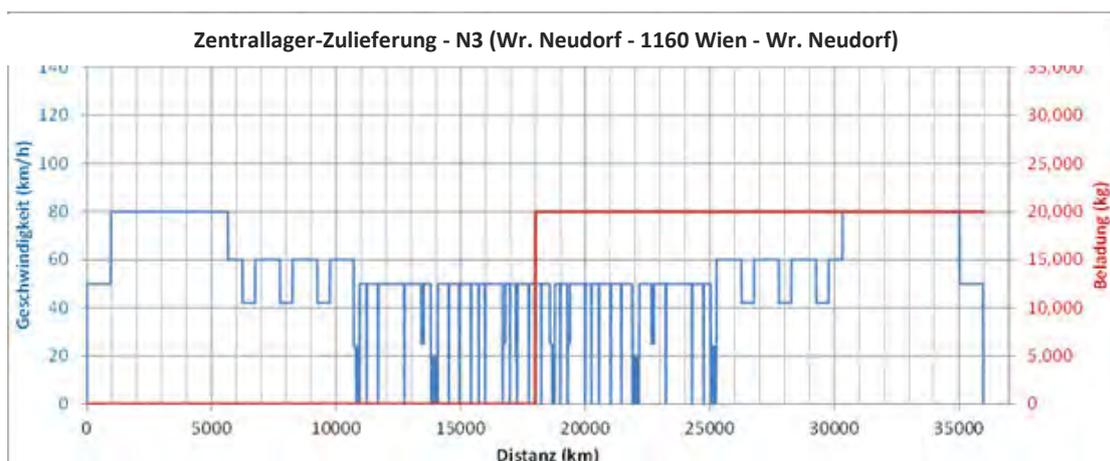
□ Routenverlauf und Kantenstückelung

Diese Randbedingungen sind gegenüber der ersten Simulation in Kapitel 1.4.2.1 unverändert übernommen worden. Der Routenverlauf mit einer Streckenlänge von 36 km entspricht den getroffenen Annahmen aus Kapitel 1.3.5.2. Allerdings wurde das Höhenprofil des Laufweges nicht mehr angewendet, wodurch sich die Kantenstückelung anzahlmäßig verringert hat. Die Route verläuft von einer industriellen Produktionsstätte im 16. Bezirk mit täglicher Warenauslieferung zu einem Zentrallager eines Großhandels- oder eines weiterverarbeitenden Unternehmens im Raum Wiener Neudorf. Es kann sich entweder um einen Abholverkehr durch den Fuhrpark des empfangenden Betriebsstandortes oder um einen Zustellverkehr durch den Fuhrpark des liefernden Betriebes handeln.

□ Fahrzeuggewicht und Beladungszustände und verkehrs- oder logistikbedingte Stopps

Das N3-Fahrzeug weist 40 t zulässiges Gesamtgewicht auf, wovon 15 t Eigenmasse und 25 t Zuladung sind, womit die Nutzlastkapazität und das Gewichtslimit für Lkw ausgeschöpft werden. Es findet nur die Beladung beim liefernden Betriebsstandort, z.B. mit 33 Paletten à 757 kg, das können beispielsweise Getränkegebilde sein, und die Abladung am Zielstandort statt, sodass abgesehen von 34 verkehrsbedingten Anhaltungen eine ununterbrochene Tour als Leerfahrt nach 1160 Wien zur Produktionsstätte und als Vollladungsfahrt retour nach Wiener Neudorf absolviert wird. Durch die Hybridisierung geht nur wenig Nutzlastkapazität (maximal eine 1/4 Palette) verloren (s. Tabelle 2-10, 2. Spalte von rechts).

Darstellung 2-22: Profil der maximal möglichen Geschwindigkeiten (nach Kantenzügen) und Beladungszustand der N3-ZZG-Tour bei repräsentativem Level of Service



Quelle: eigene Darstellung (arp)

2.4.3.2 Fahrzeugvarianten und Komponenten

□ Systemauslegung Hybridisierung für Antriebsleistungsbedarf N₃-Zulieferverkehr-Tour

Diese Fahrzeugklasse weist mit einem zulässigen Gesamtgewicht ab 12 t bis höchstens 40 t (mit Ausnahmen, z.B. im kombinierten Verkehr bis 44 t) eine große Spannweite beim Fahrzeuggewicht, welches auf die Straße gebracht wird, und bei der Nutzlastkapazität auf. Um auch den Gütertransport mit fernverkehrstauglichen Nutzfahrzeugen zu behandeln, wurde beim Beispiel der N₃-Tour das Ladungsgewicht von 20 t bei Zuladung auf Paletten, die im Punkt-zu-Punkt-Verkehr befördert werden, zugrunde gelegt. Auch wenn die Tour wiederum dieselbe Referenzstrecke im Zu- und Ablauf wie die N₁- und die N₂-Tour befährt, sind mit dieser Simulation doch alle von einem solchen Lkw-Zug (heute meist Sattelzüge) in der Regel frequentierten Straßenkategorien einbezogen worden, nur das in einem Langlauf die Kantenzüge der Hochleistungsstraßen (v.a. Autobahnen) wesentlich mehr als 50 % der Lauflänge – als in diesem hier simulierten Transportlauf – ausmachen würden.

Da ein solches Schwerfahrzeug einem breiten Einsatzzweck zgedacht ist und wahlweise für Zulieferpendelverkehre oder für spontane Transporte über kürzere (innerhalb eines Ballungsraumes) oder weitere Strecken (zwischen Ballungsräumen, in die Nachbarländer oder zu Häfen etc.) eingesetzt wird, steht die Verlässlichkeit an vorderster Stelle und schränkt die Ausstattungsvielfalt realistischerweise deutlich ein. Außerdem werden die Leistungen für die Nebenbetriebe für die Bordsysteme noch wichtiger, bei denen alternative Technologien eingesetzt werden könnten. Entsprechend der Fahrleistung des konventionellen Fahrzeugs wurde die maximal notwendige Systemleistung mit ca. 330 kW festgesetzt. Aufgrund der hohen Fahrzeugmasse von bis zu 40 t wurde rein elektrisches Fahren für die Klasse N₃ nicht mehr berücksichtigt, es wäre energetisch nicht effizient. Bei der Hybridisierung heißt das, auf unterstützende und weniger auf substituierende Elemente im Antriebsstrang zu setzen. Daher werden hier nur die leichteren Hybridisierungen berechnet. Für den alternativen Gaskraftstoff CNG als zweite Basisvariante spricht die Aussicht auf eine erhoffte Treibstoffkosteneinsparung bei hohen jährlichen Fahrleistungen und eine verbesserte Schadstoffbilanz.

Tabelle 2-10: Fahrzeugvarianten und Komponenten nach Systemleistungsparametern für die N₃-ZZG-Tour

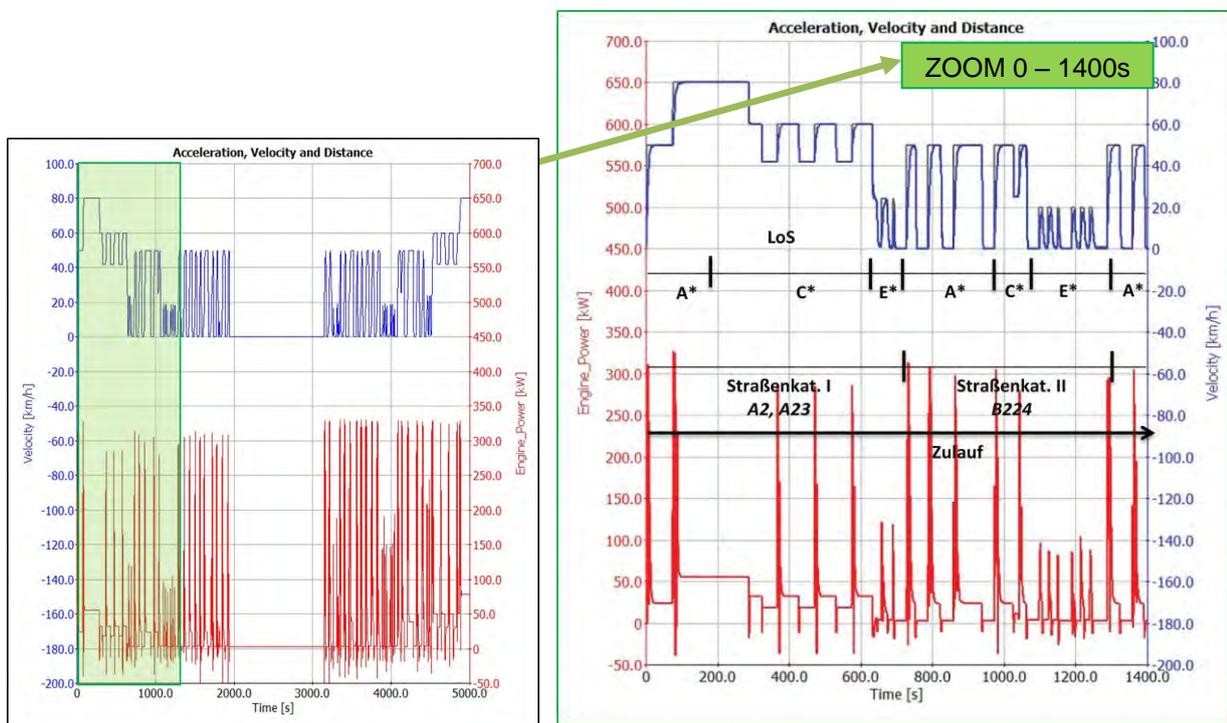
Fahrzeugvarianten und Komponenten N ₃	Kraftstoff	Systemleistung			Reichweite		Batteriesystem		Gewicht		
		Gesamt	VKM	E-Motor Spitzenleistung	Gesamt	Emissionsfrei	Technologie	Kapazität	Eigen-gewicht	Max. Zuladung	Referenz-beladung
		kW	kW	kW	km	km	-	kWh	kg	kg	kg
Konventionell	Diesel	330	330	-	2.000	-	-	-	15.000	25.000	Eigen-gewicht + variabler Beladungs-zustand: Hin-fahrt = Leer-fahrt, Rück-fahrt = Voll-ladungs-fahrt (25t)
	CNG				1.500	-			15.000	25.000	
Start Stop	Diesel	330	330	-	2.000	-	-	-	15.000	25.000	
	CNG				1.500	-			15.000	25.000	
P2 HEV (CSGI)	Diesel	330	330	60	2.000	-	Li-Ion	5	15.140	24.860	
	CNG				1.500	-			15.140	24.860	
P2 HEV (TISG)	Diesel	330	330	120	2.000	-	Li-Ion	10	15.240	24.760	
	CNG				1.500	-			15.240	24.760	

Quelle: Systemauslegung AVL

Tabelle 2-10 zeigt eine detaillierte Zusammenstellung der Systemauslegung der verschiedenen gewählten Hybridisierungsvarianten des N₃-Fahrzeuges in Bezug auf den ZZG-Tour-N₃-Fahrzyklus. Gestartet wird mit der Leermasse. Nach Erreichen des Produktionsstandortes wird das Fahrzeug mit 20 t beladen, die Retourfahrt aufgenommen und erst im Lager, am Ziel der Fahrt, wird das Fahrzeug wieder entladen. Der CNG-Tank wurde so dimensioniert, um 1500 km Reichweite zu ermöglichen. Es wurde angenommen, dass sich die Fahrzeugesamtmasse dadurch nicht erhöht.

Diese Zulieferung zu einem großabnehmenden (= „ZZG“) Unternehmen erfordert für den N₃-Transportlauf eine Umlaufzeit von rd. 80 Minuten mit einer Fahrzeit von rd. 60 Minuten auf der es zu jeweils 17 verkehrsbedingten Stopps auf der 18 km Zu- und der ebenso langen Ablaufstrecke kommt. Die Talsohle in der Mitte ist die Beladungszeit an der Produktionsstätte (s. Darstellung 2-23). Die Entladung ist nicht mehr inbegriffen, der Transportlauf endet mit der Autobahnabfahrt zum Industriezentrum NÖ-Süd. Die herausgezoomten 23 Minuten Anfahrzeit beinhalten alle drei Straßenkategorien mit dem für das Bedienungszeitfester 17-22 h typischen Mix an Levels of Service im Straßennetz, wo die Leerfahrt entgegen der Fluchtrichtung der Pendler in die Stadt hineinführt und die Vollladungsfahrt zu einer verkehrsgünstigeren Zeit stadtauswärts stattfinden kann. Daher ist die Fahrdynamik im Wesentlichen durch ein Abreißen der „grünen Welle“ bei lichtsignalgeregelten Kreuzungen und durch Abbiegemanöver in der Innenstadt beeinflusst.

Darstellung 2-23: Motorleistung und Fahrgeschwindigkeit der N₃-ZZG-Tour bei repräsentativem Level of Service



Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Ein solches Schwerfahrzeug ist für ein gleichmäßig zügiges Fahren prädestiniert. Das drückt sich in der niedrigen Motorleistungsanforderung (um die 50 kW) in der längeren Rollphase auf der Autobahn (bei

200 s auf der Zeitachse) deutlich aus, dafür schnell die Leistungsanforderung beim Beschleunigen nach oben (+/- 300 kW), selbst wenn nicht die zulässige Höchstgeschwindigkeit wegen des Verkehrszustandes zu erreichen möglich ist. Im linken Bildteil, wo der gesamte Fahrzyklus abgebildet ist, zeigen sich die sichtlich höheren Leistungsanforderungen der Vollladungsfahrt bei gleichen Geschwindigkeitsverhältnissen gegenüber der Leerfahrt, die mit nur 38 % des Gesamtgewichtes (= Fahrzeug-Eigengewicht) absolviert wird.

❑ Rekuperationspotenziale aufgrund der verkehrslogistischen Einsatzanforderungen

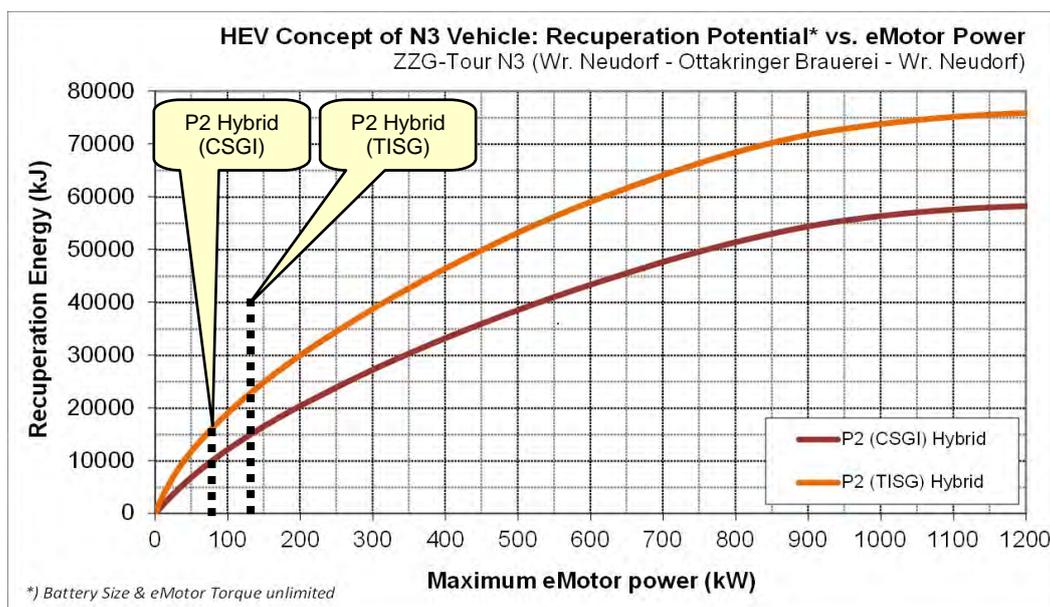
Die E-Motorleistungsniveaus für die betrachteten Hybridvarianten wurden wie folgt angenommen:

P2 HEV (CSGI): max. E-Motorleistung = 60 kW

P2 HEV (TISG): max. E-Motorleistung = 120 kW

Die in Darstellung 2-24 dargestellten Rekuperationspotenziale würden theoretisch deutlich größere Energiemengen bei Verwendung leistungsstärkerer E-Maschinen ermöglichen. Jedoch sind die hier angegebenen Leistungslimits ein Kompromiss zwischen den Energie-Potentialen einerseits, sowie den Kosten bzw. dem Einbauraum für die E-Maschinen sowie die zugehörige Batterie andererseits.

Darstellung 2-24: Rekuperationspotenziale (in kJ) von Hybrid-Nutzfahrzeugvarianten in Abhängigkeit von der maximalen Leistung des E-Motors für die N3-ZZG-Tour



Quelle: eigene Darstellung (AVL)

Die Energierückgewinnung bleibt bei den leichteren Hybridisierungsvarianten auf relativ niedrigem Niveau, weil zwar die Potenzialkurven auch bei der ausgewählten städtischen N3-Tour vielversprechend ansteigen, aber ein Leistungsniveau der Elektromaschine und vor allem der Batteriekapazität erfordern würde, die in der gewohnten Fahrzeugkonfiguration eines Lkw- oder Sattelzuges nur schwer unterzubringen sind. Im Übrigen ist diese Fahrzeugklasse für Fernläufe konzipiert, deren Fahrwege sich durch eine sanfte Trassierung und planfreie Knoten auszeichnen, sodass die Rekuperation vermutlich nicht so sehr ins Gewicht fallen würde, wie es vielleicht andere Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrdynamik tun.

2.4.3.3 Simulationsergebnisse aus verkehrsökologischer Sicht

❑ Angriffspunkte für Verbrauchsreduktionspotenziale durch Fahrzeugmaßnahmen und Hybridisierung

Die N₃-Tour unterscheidet sich von den Randbedingungen zu den anderen Touren grundlegend, sodass auch die Ergebnisse kaum einen Vergleich erlauben. Die Beladung beträgt das 5,5-fache der N₂-Tour und beschreibt mit 50 % im Nutzlast-/Gesamtgewichtsverhältnis das Maximum der Ausnutzung der Nutzlastkapazität dem Volumen nach, wenn man von der Leerfahrt retour absieht. Außerdem handelt es sich um eine relativ kurze Punkt-zu-Punkt-Fahrt in dieser Fahrzyklen-Simulation.

Damit verschieben sich die **Angriffspunkte für eine verkehrsökologische Optimierung** vom Fahrzeug zum *Auslastungsmanagement*, etwa was eine Rückbefrachtung anbelangt, je länger der Laufweg retour ausfällt, und zum *betrieblichen Routenmanagement*, z.B. Rundtouren, um Engpässen auszuweichen. Noch weiter in Richtung *öffentliches Verkehrsmanagement* gedacht, sind es ein *regionales Lkw-Führungskonzept* oder *zeitnahe Verkehrsregulierungen* in Starklastzeiten des Verkehrsgeschehens, um die Verkehrsabwicklung flüssiger zu gestalten und Umweltbelastung zu kappen.

❑ Hybridisierung des Diesel-Fahrzeuges

Anhand der nachfolgenden Tabelle-11, wiederum in der dritten Spalte von rechts, zeigt sich, dass sich der Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen bzw. -Äquivalente durch ein Maßnahmenbündel am Fahrzeug nur auf 82 % herunterdrücken lassen, wenn man der Argumentation folgt, dass „schwere“ Hybridisierungsvarianten derzeit und mittelfristig bei diesem Fahrzeugmuster nicht zweckmäßig machbar sind.

Auch innerhalb des Maßnahmenbündels verschieben sich der Schwerpunkt und der Wirkungsgrad in Richtung zum **Fahrwiderstand** aufgrund des hohen Gewichtes und der größeren Angriffsfläche für den Luft-(Wind)-Widerstand. So kann „Windschlüpfrigkeit“ (u.a. Verringerung von Verwirbelungen über die Länge des Lastzuges) im Fahrzeugdesign ein Thema sein, welches im Kreis betroffener Stakeholder des Öfteren mit der Diskussion über die zulässigen Fahrzeugabmessungen verknüpft wird. Angesichts der hohen Motorleistungen gewinnt der Aspekt der Abwärme-Rückführung zur energetischen Weiterverwertung Bedeutung, wobei die abgestrahlte Abwärme und die heißen Abgase Angriffspunkte für eine Optimierung darstellen. Im hier gerechneten Beispiel einer relativ kurzen Tour in städtischer Umgebung fällt der Effekt (Zeile WHRS = Waste Heat Recovery System) freilich eher bescheiden aus.

Die Tabelle 2-11 zeigt eine Zusammenstellung aller Simulationsergebnisse des N₃-Fahrzeuges mit dem Dieselmotorantrieb in Basiskonfiguration. Gegenüber dem Basisverbrauch von 43,6 l/100km konnte mit der Maßnahme Reduktion Fahrwiderstand der Verbrauch um 2,5 % auf 42,5 l/100km gesenkt werden. Geringfügig höhere Verbrauchsvorteile können mit der zusätzlichen Einführung des WHRS-Systems erzielt werden. Damit lässt sich beispielsweise der Zyklusverbrauch um 3,5 % absenken, während ein zusätzliches Start/Stopp-System etwa 10,8 % Verbrauchsvorteil ermöglicht. Mit dem Hybrid P₂ ergibt sich schließlich eine gesamte Verbrauchsreduktion um 14,5 % auf 37,3 l/100km (CSGI) bzw. 18,3 % auf 35,6 l/100km (TISG).

Tabelle 2-11: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei Dieselfahrzeugen und Hybrid-Varianten für N3-ZZG-Tour

N3 DIESEL - ZZG-Tour N3: <i>(Wr. Neudorf - Ottakringer Brauerei - Wr. Neudorf)</i> Analyse und Auswirkungen der Verbesserungspotenziale durch neue/verbesserte Antriebstechnologien im Zeitraum bis 2020	Kraftstoff Energie Verbrauch	Kraftstoffverbrauch	CO ₂ -Emissionen	El. Energie Verbrauch inkl. Ladungsverluste*	CO ₂ -Äquivalente Emissionen**	Summe Energieverbrauch (Fuel + Elektrisch*)	Summe CO ₂ -Äquivalente Emissionen**	Verbesserungspotential CO ₂ -Emissionen
	MJ/100km	l/100km	gCO ₂ /km	kWh/100km	gCO ₂ -Äq/km	MJ/100km	gCO ₂ -Äq/km	%
N3 Diesel Konventionell ('Aktueller Stand der Technik')	1534.4	43.6	1145.2	---	---	1534.4	1145.2	Referenz
Reduktion Fahrwiderstand (cw -15% & fr -5%)	1495.4	42.5	1116.0	---	---	1495.4	1116.1	2.5
WHRS	1480.5	42.1	1104.9	---	---	1480.5	1104.9	3.5
Start & Stop Functionality	1369.1	38.9	1021.8	---	---	1369.1	1021.8	10.8
P2 (CSG I) Hybrid	1311.8	37.3	979.0	---	---	1311.8	979.0	14.5
P2 (TISG) Hybrid	1253.7	35.6	935.7	---	---	1253.7	935.7	18.3

N3 Fahrzeug mit 11.9L R6 TDI Diesel Motor, AMT12, verbrauchsorientiertes Schalten, GVW <40t
 *) El. Energie Werte inkl. Recharging Wirkungsgrad von 85% (2020) **) Strom-Mix Österreich (inkl. Import) 197gCO₂-Äq/kWh für 2020 (Joanneum Research, Symposium Energieinnovation, 16.02.2012)

Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Fahrzeug- und Motormaßnahmen

zusätzliche Hybridisierung

Hybridisierung des CNG-Fahrzeuges

Wird ein mit CNG versorgter Lkw als Basisvariante für optimierende Maßnahmen zugrunde gelegt, so lässt sich in Hinblick auf den Energieverbrauch bei den berechneten Varianten gegenüber einem herkömmlichen Diesel-Fahrzeug bestenfalls eine Reduktion von 100 % auf 92 % erzielen. Der ausschlaggebende Effekt äußert sich dagegen bei den Emissionen der CO₂-Äquivalente, die sich auf 69 % oder um knapp -31 % verringern lassen. Das liegt darin begründet, dass die Gasverbrennung von vorneherein um -10 % weniger relevante Emissionen verursacht als der Diesel-Brennstoff und die Hybridisierung hilft bei der weiteren Absenkung. Allerdings ist dieser Effekt mit der Charakteristik der angenommenen N3-Tour im Straßennetz eines Ballungsraumes verbunden und kann nicht ohne weiteres für einen Fernlauf gelten.

Wird der Energieverbrauch näher betrachtet, dann ist ersichtlich, dass die hier als fahrzeugbezogene Maßnahmen benannten Varianten, wie die Fahrwiderstandsreduzierungen (Luftwiderstand c_w und Rollwiderstand f_r) und die Wärmerückführung (WHRS), mit einer Reduktion auf 89 % insgesamt mehr beitragen als die Hybridisierung. Selbst mit der Ausstattung für die Start/Stopp-Funktionalität wird noch nicht einmal das Niveau der konventionellen Diesel-Basisvariante erreicht.

Tabelle 2-12: Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche bei CNG-Fahrzeugen und Hybridfahrzeugen für N3-ZZG-Tour

N3 CNG - ZZG-Tour N3: <i>(Wr. Neudorf - Ottakringer Brauerei - Wr. Neudorf)</i> Analyse und Auswirkungen der Verbesserungspotenziale durch neue/verbesserte Antriebstechnologien im Zeitraum bis 2020	Kraftstoffenergie Verbrauch	Kraftstoffverbrauch	CO ₂ -Emissionen	El. Energie Verbrauch inkl. Ladungsverluste*	CO ₂ -Äquivalente Emissionen**	Summe Energieverbrauch (Fuel + Elektrisch*)	Summe CO ₂ -Äquivalente Emissionen**	Verbesserungspotential CO ₂ -Emissionen
	MJ/100km	kg/100km	gCO ₂ /km	kWh/100km	gCO ₂ -Äq/km	MJ/100km	gCO ₂ -Äq/km	%
N3 Diesel Konventionell ('Aktueller Stand der Technik')	1534.4	---	1145.2	---	---	1534.4	1145.2	Referenz
N3 CNG Konventionell	1830.0	40.6	1029.27	---	---	1830.0	1029.3	10.1
Reduktion Fahrwiderstand (cw -15% & fr -5%)	1790.1	39.7	1006.79	---	---	1790.1	1006.8	12.1
WHRS	1763.3	39.1	991.7	---	---	1763.3	991.7	13.4
Start & Stop Functionality	1544.2	34.2	868.5	---	---	1544.2	868.5	24.2
P2 (CSG I) Hybrid	1480.5	32.8	832.7	---	---	1480.5	832.7	27.3
P2 (TISG) Hybrid	1407.1	31.2	791.4	---	---	1407.1	791.4	30.9

N3 Fahrzeug mit 11.2L CNG Motor, AMT12, verbrauchsorientiertes Schalten, GVW <40t
 *) El. Energie Werte inkl. Recharging Wirkungsgrad von 85% (2020) **) Strom-Mix Österreich (inkl. Import) 197gCO₂-Äq/kWh für 2020 (Joanneum Research, Symposium Energieinnovation, 16.02.2012)

Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Fahrzeug- und Motormaßnahmen

zusätzliche Hybridisierung

Für den alternativen Antrieb mit CNG im konventionellen Referenzfahrzeug ergibt sich ein mittlerer Zyklusverbrauch von 40,6 kg/100km oder 1.029,3 gCO₂/km (s. Tabelle 2-12). Gegenüber dem konventionellen N₃-Fahrzeug mit Dieselmotor ermöglicht der CNG-Betrieb also eine deutliche CO₂-Reduktion von 10,1 %. Mit einer oben beschriebenen Absenkung des Fahrwiderstands kann die CO₂-Emission um 12,1 % gegenüber der Diesel-Basiskonfiguration verbessert werden. Mit dem zusätzlichen Start/Stopp-System und dem CNG Konzept lässt sich der Zyklusverbrauch um 24,2 % auf 34,2 kg/100km gegenüber der Diesel-Basiskonfiguration absenken. Mit dem Hybrid P₂ im CNG Betrieb ergibt sich schließlich eine Verbrauchsreduktion um 27,3 % auf 32,8 kg/100km in der CSGI-Ausführung sowie um 30,9 % auf 31,2 kg/100km in der TISG-Ausführung (s. Tabelle 2-12).

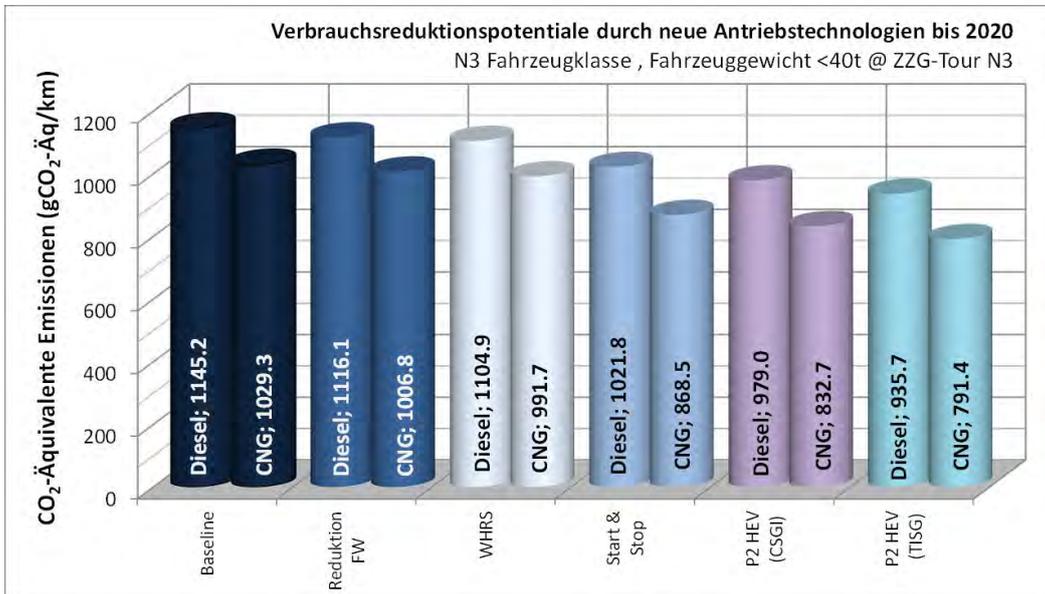
2.4.3.4 Folgerungen für N₃-Transportläufe aus verkehrslogistischer Sicht

□ Verbrauchsreduktionspotenziale durch Fahrzeugmaßnahmen und Hybridisierung

Werden die Säulendiagramme in den beiden folgenden Darstellungen (s. Darstellung 2-25 und Darstellung 2-26) mit den absoluten Reduktionsgrößen in g CO₂-Äquivalenten pro km und den prozentuellen Reduktionspotenzialen betrachtet, so stellen sich die Verbesserungen aufgrund der eingeschränkten Hybridisierungsgrade gegenüber den N₁- und N₂-Transportläufen auf den ersten Blick zwar bescheiden dar. Es darf aber nicht übersehen werden, dass aufgrund der hohen Nutzgewichtsauslastung der Effekt je Tonne Nutzlast bzw. je Tonnenkilometer vergleichsweise am höchsten ausfällt. Damit kommen die verkehrslogistische Sichtweise und Erfolgsmessung mit ins Spiel, die die Transportleistung (Tonnenkilometer beförderter Nutzlast = Zuladung) und den dafür nötigen Transportaufwand (Tonnenkilometer bewegter Fahrzeugmasse zur Bedienung des verkehrslogistischen Auftrages) als Maßstäbe anlegen.

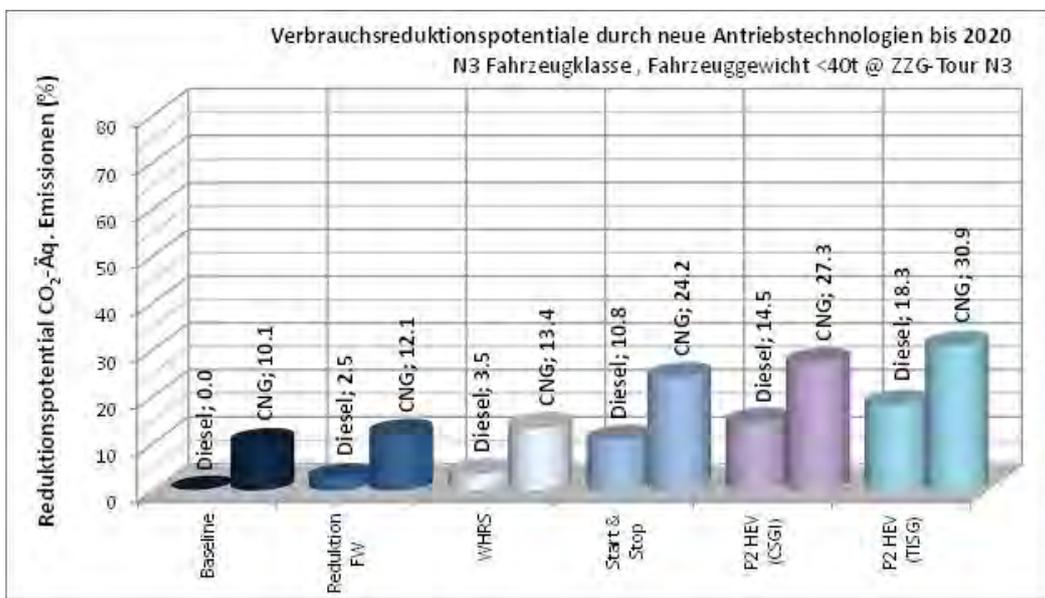
Die beiden folgenden Darstellungen zeigen die Reduktion der CO₂-äquivalenten Emissionen durch Fahrzeugmaßnahmen und Hybridisierung. Beginnend mit der Basiskonfiguration (Dieselmotor) mit 1.145 gCO₂-Äq/km kann mit dem Übergang auf CNG-Technologie bereits eine Reduktion auf 1.029 gCO₂-Äq/km erzielt werden, während für diese Version die oben beschriebene Reduktion des Fahrwiderstands nur sehr geringe Vorteile bringt. Hingegen ermöglicht der zusätzliche Einsatz eines Start/Stopp-Systems bereits eine Reduktion um ca. 10,8 % auf 1.021,8 gCO₂-Äq/km (Diesel) bzw. um 24,2 % auf 868,5 gCO₂-Äq/km (CNG). Mit dem P₂ HEV (CSGI) System (Diesel) lässt sich eine Reduktion um 14,5 % auf 979 gCO₂-Äq/km erzielen. Diese wird im Fall des CNG-Systems mit einer Reduktion um 27,3 % auf 832,7 gCO₂-Äq/km wesentlich übertroffen. Dieses Reduktionspotential ist für das P₂ HEV (TISG) System für die Dieselvariante geringer mit 18,3 % und bei der CNG-Variante mit 30,9 % größer. Das entspricht CO₂-äquivalenten Zyklus-Emissionen von 936 gCO₂-Äq/km (Diesel) bzw. 791 gCO₂-Äq/km (CNG).

Darstellung 2-25: Absolute Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO₂-Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N₃-ZZG-Tour



Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

Darstellung 2-26: Prozentuelle Verbrauchsreduktionspotenziale in g CO₂-Äquivalenten pro km durch neue Antriebstechnologien im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben für N₃-ZZG-Tour



Quelle: berechnet mit AVL-Cruise

2.4.4 Resümee zur zweiten Fahrzyklen-Simulation von Mustertransportläufen mit alternativen Antriebsformen

2.4.4.1 Verkehrslogistisches Daten-Input-Modell und Ergebniszielsetzung

Zweck der Fahrzyklen-Simulation war es, direkt vergleichbare Ergebnisse über den Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch und den Emissionsausstoß (CO₂) über alle Antriebsarten für werktägliche logistische Einsatzformen zu ermitteln und daraus Erkenntnisse für die Innovationsstrategie zu gewinnen. Dabei wurden mit dem Zeithorizont bis 2020 die voraussichtlich technisch einsatzfähigen Antriebsvarianten hinsichtlich ihrer Energieeinsparungs- und Emissionsentlastungseffekte berechnet. Die vollständigen Ergebnisse sind in Tabelle 2-13. im Anhang wiedergegeben. Ein Auszug der Herleitung ist anhand der Tabelle 1-14 und ein Vergleich der State-of-the-art-Variante (konventionell angetriebenes Diesel-Nutzfahrzeug) mit den Best-Varianten (hybride oder rein elektrische Fahrzeugvarianten) ist in den Tabelle 1-16 und Tabelle 1-18 abzulesen.

Tabelle 2-13: Indikatorentafel zu den Effekten auf Energieverbrauch und Emissionsmenge für die Mustertransportläufe

siehe angehängte Datei

Quelle: berechnet mit AVL-Cruise; Darstellung arp

An **verkehrslogistischen Randbedingungen** wurden folgende Annahmen als **Daten-Input** für die Fahrzyklen-Simulationen modelliert:

- 3 Klassen von Nutzfahrzeugen N₁ (bis 3,5 t), N₂ (bis 12 t), N₃ (über 12 t) korreliert mit
- 3 typischen logistischen Einsatzformen N₁-KEP-Tour, N₂-LEH-Tour, N₃-industrielle Zuliefertour in jeweils branchenspezifischen 3 Lieferzeitfenstern, in denen die Touren im Straßennetz eine repräsentative Referenzstrecke mit
- 3 Straßenkategorien unterschiedlicher Leistungsfähigkeit befahren, die tageszeitabhängig auf
- 3 Levels of Service (A*, C* und E*) treffen, die in einem repräsentativen Mix dieser Verkehrszustände in die Fahrdynamik eingeflossen sind.

Mit dem Simulationsmodell AVL-Cruise wurden sodann die **Verbrauchs- und Emissionseffekte für folgende Antriebsvarianten** berechnet:

- 2 konventionelle Antriebe mit Diesel oder CNG bei allen Fahrzeugklassen als Basisvarianten, die als Maßstäbe für die Reduktionspotenziale dienen
- Reine Elektrofahrzeuge bei N₁ und N₂ (bis 12 t Gesamt- und 7,5 t Nutzlastgewicht)
- 3 typische Fahrzeugmuster, die für N₁-KEP-Dienste, N₂-LEH-Touren und im N₃-industriellen Zulieferverkehr konventionell breit eingesetzt werden.
- 13 Antriebsvarianten für das N₁-Fahrzeug: 2 konventionell (mit Diesel oder Gas) angetriebene Fahrzeuge, 7 Diesel-Hybride, 3 CNG-Hybride und 1 Elektrofahrzeug
- 12 Antriebsvarianten für das N₂-Fahrzeug: 2 konventionell (Diesel oder Gas) angetriebene Fahrzeuge sowie 6 Diesel-Hybride, 3 CNG-Hybride und 1 Elektrofahrzeug

-
- 8 Antriebsvarianten für das N₃-Fahrzeug: 2 konventionell (Diesel oder Gas) angetriebene Fahrzeuge sowie 3 Diesel- und 3 CNG-Hybride

2.4.4.2 Grundsätzliche Wirkungspotenziale von alternativen Antriebsformen für Güterverkehre (fahrzeugseitige Verkehrsqualität)

Wirkungspotenziale, wie sie im Kontext der EFLOG-F&E-Dienstleistung verstanden werden, sind verkehrsökonomische und verkehrsökologische Effekte, die auf die „Reduktion des Energieverbrauches“ und „Reduktion der CO₂-Äquivalenten-Emissionen“ abzielen. Diese Effekte sind ein Produkt aus komplexen Wechselwirkungen von logistischer Einsatzplanung, von typischen Befahrungsbedingungen der frequentierten Straßen sowie den technologischen und kapazitiven Eigenschaften der berechneten Nutzfahrzeugklassen bezogen auf Mustertransportläufe, wie sie als Güterverkehre regelmäßig und in großer Zahl stattfinden, sodass die Effekte mit ihren Quantitäten unter bestimmten Voraussetzungen auch aggregiert werden können.

In der Darstellung 2-27 werden die Ergebnisse zu diesen Effekten zu einem Ranking gereiht, wobei die Tatsache, dass mit dem Hybridisierungsgrad bis zur Vollelektrifizierung die Effekte ansteigen, zu erwarten war, aber das Ausmaß mancher Potenziale hat doch überrascht.

- ❑ Eine **Hybridisierung** ist sowohl von konventionell mit Diesel angetriebenen als auch von CNG-angetriebenen Fahrzeugen kombiniert mit unterschiedlich dimensionierten Elektroantrieben möglich. Am Anfang der Hybridisierungsskala („null“) steht der herkömmliche Diesel-Antrieb, am anderen Ende der ausschließliche Elektroantrieb („hundert“) (vgl. Abbildung 1-17).
- ❑ Beim **Hybridisierungsgrad** lassen sich grob die Gruppe der „leichten“ (milden) Hybridvarianten, die unterstützend auf die Fahrdynamik wirken, und die Gruppe der „schweren“ Hybridvarianten, die über kürzere oder mittlere Lauflängen substituierend anstelle des herkömmlichen Motors wirksam werden, unterscheiden (siehe z.B. die Abfolge in Tabelle 2-4).
- ❑ Die „**leichteren**“ **Hybrid-Varianten** vermindern die Kraftstoffverschwendung und verbessern die Emissionsbilanz bei vorgegebenen Fahrzeugeinsätzen.

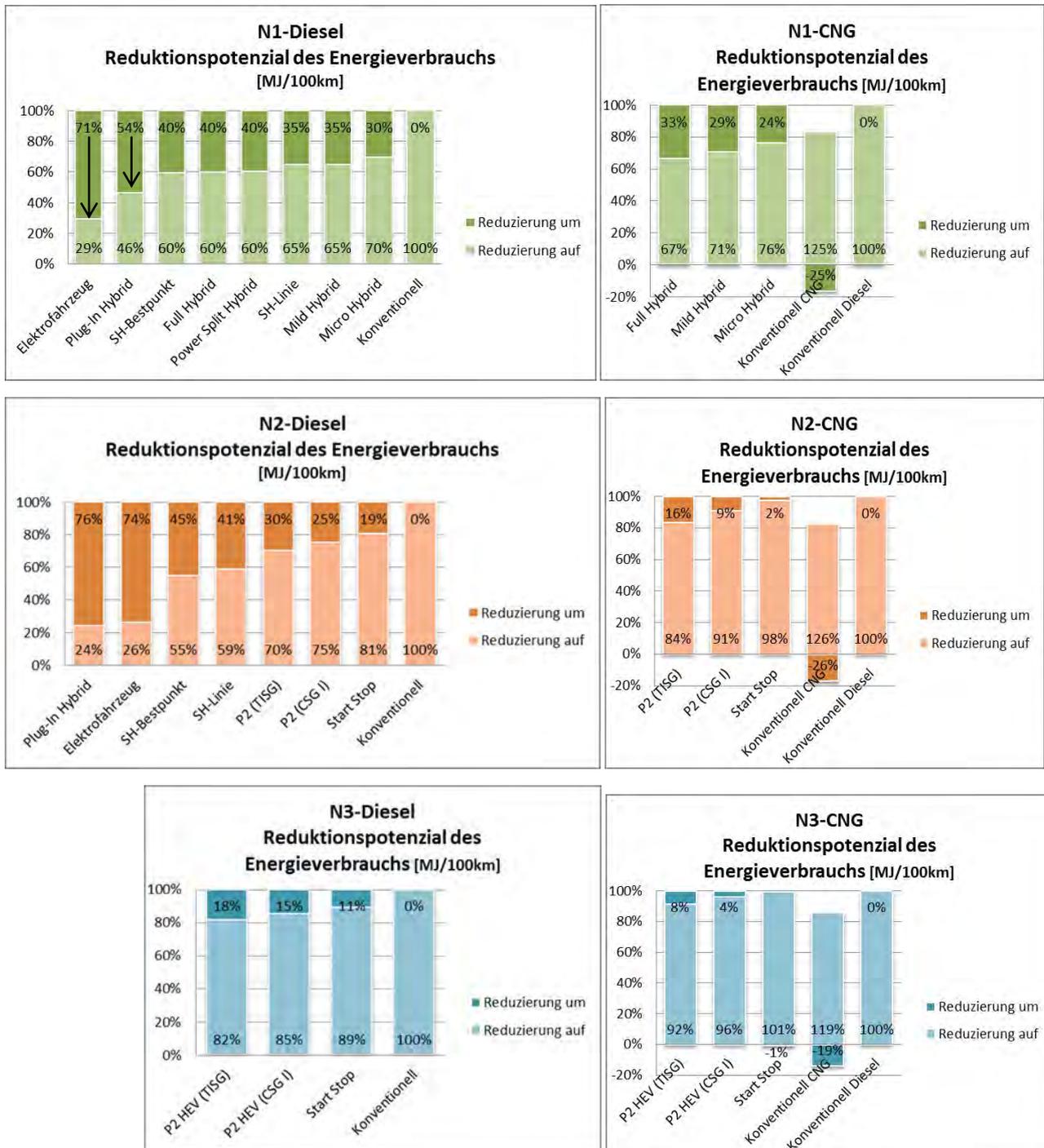
Die „**schweren**“ **Hybrid-Varianten** erlauben einerseits emissionsfreies Fahren in besonders sensiblen Zonen und/oder zu besonders belasteten Zeiten (z.B. bei Überschreitung von Immissionsgrenzwerten) in Abhängigkeit von der Energie-speicherkapazität der Batterie.

- ❑ Die **Mikro-Hybrid-Varianten mit der Start/Stop-Funktionalität** bringen gemessen am technischen Aufwand und den Zusatzkosten bei der Fahrzeuganschaffung den größten Effekt bei der Einsparung von CO₂-Äquivalenten. Bevorzugt sind es die Fahrzeuge bis zur N₂-Klasse, deren Einsatzspektrum ist durch die gerechneten Mustertransportläufe mit den zahlreichen verkehrsbedingten und logistikbedingten Stopps zu einem Gutteil abgedeckt.
- ❑ Die **Plug-In-Hybrid-Varianten** Dual Energy erscheinen bei den verkehrsökologischen Effekten unter den Hybridvarianten als Testsiegerinnen und damit als „Vorzeigantriebskombination“, aber diese müssten im konkreten Fall auf eine entsprechende Stromladeinfrastruktur zugreifen können und in der wirtschaftlichen Realität überhaupt erst am Fahrzeugmarkt nachgefragt werden.
- ❑ Das **reine batteriegestützte Elektrofahrzeug** punktet bei den mittleren und kleineren Nutzfahrzeugen bis 12 t Gesamtgewicht bestenfalls im Stadtverkehr, solange die Batterie als

kostenintensiver, reichweitenlimitierender und nutzlastreduzierenden Faktor eine kritische Komponente für die Einsatzfähigkeit darstellt.

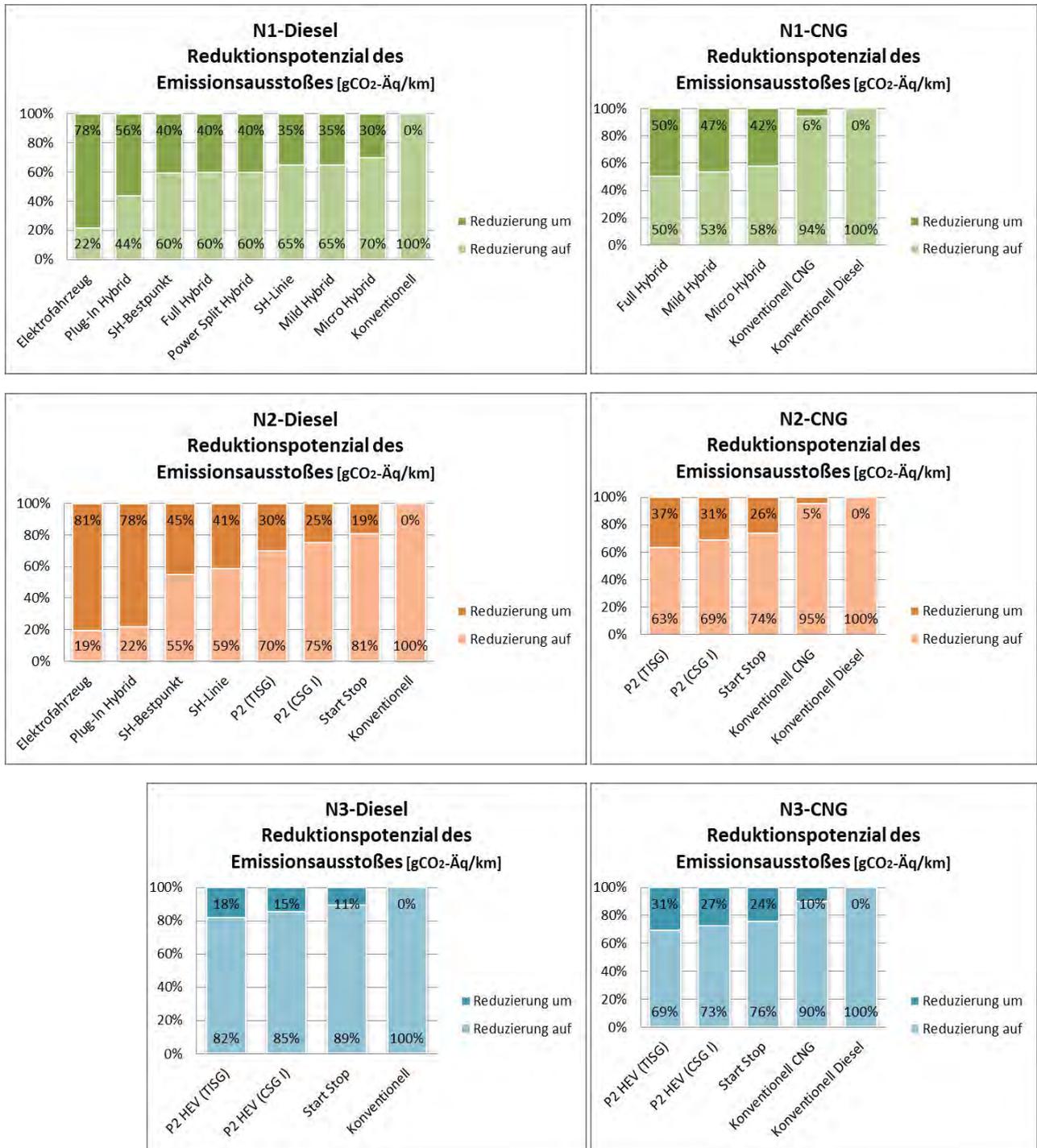
- ❑ Während die hybriden Antriebsformen durchaus einen proprietären (unternehmensspezifischen und selektiven) Einsatz erlauben, ist das elektrische Nutzfahrzeug viel stärker auf Gelegenheiten der Ladeinfrastruktur und (damit auch) auf Bevorzugungen in der Verkehrsorganisation angewiesen, was die Freizügigkeit des Einsatzes auf absehbare Zeit für Güterverkehre deutlich einschränkt.
- ❑ Die Durchsetzung elektrischer Gütermobilität ist daher als ein auch verkehrsträgerübergreifendes System (in Kombination mit der Bahn) anzusehen. Hybride Antriebsformen können dabei in gewisser Weise eine Zeit lang als Brückentechnologie fungieren, bis die weitere Systementwicklung der Elektromobilität auch für bestimmte Arten der straßengestützten Güterversorgung in eine realistische Sphäre eintritt.
- ❑ Die **Nutzung der Abwärme** bzw. die Energieeinsparung durch eine **Verringerung des Luft- und Rollwiderstandes** waren bei den berechneten Mustertransportläufen im Ballungsraumverkehr mit pauschalen Reduktionswerten eingesetzt und erschienen im Effekt eher gering. Im Fernverkehr sind diese Maßnahmen sehr wohl relevant, weil dabei die leistungsstärkeren und voluminöseren Nutzfahrzeuge zum Einsatz kommen. Im Übrigen ist die Fahrwiderstandskomponente Wind auf exponierten Freilandstrecken ein nicht zu unterschätzender Faktor.
- ❑ Die Betrachtung und der Vergleich von technologischen Effekten bezogen auf Transportläufe, wie hier für den Straßengüterverkehr ausgeführt wurde, dürfen für den Fall der **verkehrslogistischen Kombinierbarkeit mit anderen Güterverkehrsträgern** im Landverkehr (Schiene, Binnenschifffahrt, Produktpipeline) oder für den Fall der **Substituierbarkeit** von Transportläufen **durch alternative Güterverkehrsträger**, weil die Multimodalität der Verladestandorte und der Verkehrsinfrastruktur das ermöglicht, nicht aus dem Blickfeld verloren werden. Die diesbezügliche Modellierung für die jeweiligen Verkehrsträgersysteme steht noch am Beginn und wird im Systemabgleich eine noch höhere Komplexität erreichen.
- ❑ Die Entscheidung eines fuhrparkhaltenden Unternehmens bei einer in Aussicht genommenen **Hybridisierung der Fahrzeugflotte** entweder auf eine **dieselbasierte Variante** oder auf eine **gasbasierte (mit CNG) Variante** zu setzen, hängt von der Zielgewichtung zwischen Kraftstoffeinsparung und Emissionsreduktion (beides ist erreichbar) ab. Wird die Kraftstoffeinsparung präferiert ist der hochentwickelte Dieselantrieb voran. Wenn jedoch eine höchstmögliche Emissionsreduktion, aus welchen Beweggründen auch immer, unerlässlich sein sollte, dann wird dem CNG-Antrieb wegen seiner günstigeren Verbrennungscharakteristik der Vorzug zu geben sein, was durch eine Kraftstoffpreis- und Abgabepolitik noch unterstützt werden kann.
- ❑ In der Darstellung 2-27 sind die Reduktionspotenziale beim Energieverbrauch bezogen auf Megajoule pro 100 km Laufweg unter den Bedingungen der Mustertransportläufe in der Reihenfolge ihres Reduktionseffektes wiedergegeben, wenn der Energieverbrauch das vorrangige Optimierungsziel sein sollte. In Darstellung 2-28 sind in gleicher Weise die Reduktionspotenziale bei Präferenz für die Emissionsabsenkung bezogen auf Menge in Gramm CO₂-Äquivalente pro 100 km wiedergegeben.

Darstellung 2-27: Energie-Reduktionspotenziale im Ranking nach Ausgangsvarianten (Antrieb mit Diesel oder CNG) und nach Mustertransportläufen N1, N2 und N3



Quelle: eigene Darstellung (AVL und arp)

Darstellung 2-28: Emissions-Reduktionspotenziale im Ranking nach Ausgangsvarianten (Antrieb mit Diesel oder CNG) und nach Mustertransportläufen N1, N2 und N3



Quelle: eigene Darstellung (AVL und arp)

2.4.4.3 Methodische Schlussfolgerungen zur Erfassung der Gütermobilität

❑ Reduktionspotenziale als Hinweise auf diskrete Handlungsoptionen

Die Balkendiagramme in der Darstellung 2-27 und der Darstellung 2-28 geben zwar Hinweise auf einzelne „Schrauben“, an denen bei der Auswahl der **Fahrzeugtechnologie und anwendungsseitig** gedreht werden kann, wenn die Vorteile der Nutzanwendung der Hybridisierung und die Nachteile der Aufrüstung im Fahrzeugpark gegeneinander vom Fuhrpark betreibenden Unternehmen abgewogen werden. Aber diese isolierte Betrachtung kann nur bedingt systemrelevant sein.

❑ Herstellung der Vergleichbarkeit von Effekten unterschiedlicher verkehrslogistischer Aufgaben

Die Simulationsergebnisse der Fahrzyklen der drei Mustertransportläufe nach Verbrauchswerten sind nicht unmittelbar untereinander vergleichbar, weil sich die Größendimensionen der Fahrzeuge und der Transporte um ein Vielfaches unterscheiden. Daher erscheint es für die verkehrslogistische Betrachtung zweckmäßig, die üblicherweise verwendeten Indikatoren zum Energieverbrauch (wie Liter Kraftstoff/100km) und zu den Emissionen (wie g/km) mit den Gewichtsverhältnissen des Fahrzeuges je nach Beladungszustand anhand der Mustertransportläufe in Beziehungen zu setzen. Damit können die berechneten Effekte von der mikroskopischen Ebene einer selektiven Lupenbetrachtung auf die Ebene der speziellen Beiträge zu Veränderungsbilanzen und damit auf eine allgemeinere **Handlungsebene zur Gestaltung verkehrslogistischer Prozesse**, etwa in Hinblick auf die Bedienung von Gütersenken mit spezifischen raum- und infrastrukturellen Rahmenbedingungen oder in Hinblick auf Branchenverkehre, gehoben werden.

Aus dem verkehrslogistischen Daten-Input sind dafür jene Prozessdaten herauszuziehen, die die Energieverbräuche und den Emissionsausstoß verursachen. Es ist die für den verkehrslogistischen Zweck **bewegte Fahrzeugmasse** mit dem **Basisparameter Tonnen-Kilometer (tkm_{FZM})**, der es erlaubt den **Transportaufwand** (in tkm Fahrleistung) mit der **Transportleistung** (in tkm beförderte Nutzlast) als **Indikator der Transportproduktivität** ins Verhältnis zu setzen. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf Angriffspunkte ziehen, um die Reduktionspotenziale zu aktivieren. Etwa, wenn das Verhältnis von Transportleistung zum erforderlichen Transportaufwand ungünstig erscheint, wie es bei der N1-KEP-Tour offensichtlich der Fall zu sein scheint (s. Tabelle 2-14, Spalte ganz rechts).

Tabelle 2-14: Basisdaten für den verkehrslogistischen Vergleich der Fahrzyklus-Simulationen

Tour	Laufweg		Fahrzeuggewichte			Verkehrslogistische Parameter		
	Lauf-länge der Tour	davon mittlere Voll-ladungs-fahrt	Eigen-masse	Nutzlast (NL) bei zulässigem Gesamt-gewicht (zGG)	Startgewicht des Fahrzeuges mit Zuladung (Ladefaktor in % der NL-Kapazität)	Transportleistung in t Nutzlast x km Laufweg der Zuladung	Transport-aufwand in tkm bewegter Fahrzeug-masse	Transport-leistung in % des Transport-aufwandes
N1-KEP	39,1 km	27,4 km	2,1 t	1,4 t NL von 3,5 t zGG	2,1 t + 0,5 t = 2,6 t (36 %)	13,7 tkm	95,8 tkm	14,3 %
N2-LEH	40,2 km	20,1 km	4,5 t	7,5 t NL von 12,0 t zGG	4,5 t + 4,5 t = 9,0 t (60 %)	90,5 tkm	271,4 tkm	33,3 %
N3-ZZG	36,0 km	18,0 km	15,0 t	25,0 t NL von 40,0 t zGG	15,0 t + 20,0 t = 35,0 t (88 %)	360 tkm	900,0 tkm	40,0 %

Quelle: eigene Darstellung (arp)

Tabelle 2-15: Verkehrslogistischer Energieverbrauchsindikator zum Vergleich der Fahrzyklus-Simulationen am Beispiel der Diesel-Basisvariante (ohne Reduktionsmaßnahmen und ohne Hybridisierung)

Tour	Energierrelevanter Transportaufwand in Tonnenkilometer (tkm)				Simulierter Energieverbrauch in Mega-Joule (MJ)	
	Lauf­länge der Tour	Vollladungs-äquivalente Fahrleistung mit Startgewicht	Leerfahrt-äquivalente Fahrleistung mit Eigenmasse	Transportaufwand zur Bedienung der Tour	Energieverbrauch je Tour (Kontrollrechnung)	Verkehrslogistischer Energieverbrauch in MJ pro tkm tourenspezifisches Fahrzeuggewicht
N1-KEP-Tour	39,1 km	27,4 km mit 2,6 t = 71,24 tkm	11,7 km mit 2,1 t = 24,57 tkm	95,8 tkm	234,05 MJ/39,1 km der Tour = 5,986 MJ/km	234,05 MJ je Tour : 95,8 tkm je Tour = 2,443 MJ/tkm FzG
N2-LEH-Tour	40,2 km	20,1 km mit 9,0 t = 180,9 tkm	20,1 km mit 4,5 t = 90,45 tkm	271,4 tkm	380,98 MJ/40,2 km der Tour = 9,477 MJ/km	380,98 MJ je Tour : 271,4 tkm je Tour = 1,404 MJ/tkm FzG
N3-ZZG-Tour	36,0 km	18,0 km mit 35,0 t = 630 tkm	18,0 km mit 15,0 t = 270,0 tkm	900,0 tkm	552,38 MJ/36,0 km der Tour = 15,34 MJ/km	552,38 MJ je Tour: 900,0 tkm je Tour = 0,614 MJ/tkm FzG

Quelle: Berechnung mit AVL-Cruise; weiterbearbeitet von arp

Tabelle 2-16: Verkehrslogistischer Energieverbrauchsindikator zum Vergleich der Fahrzyklus-Simulationen am Beispiel des geringsten Energieverbrauchs je Nutzfahrzeugkategorie (Best-Varianten)

Tour	Energierrelevanter Transportaufwand in Tonnenkilometer (tkm)				Simulierter Energieverbrauch in Mega-Joule (MJ)	
	Lauf­länge der Tour	Vollladungs-äquivalente Fahrleistung mit Startgewicht	Leerfahrt-äquivalente Fahrleistung mit Eigenmasse	Transportaufwand zur Bedienung der Tour	Energieverbrauch je Tour (Kontrollrechnung)	Verkehrslogistischer Energieverbrauch in MJ pro tkm tourenspezifisches Fahrzeuggewicht
N1-KEP-Tour mit Elektrofahrzeug (BEV)	39,1 km	27,4 km mit 3,0 t = 82,20 tkm	11,7 km mit 2,5 t = 29,25 tkm	111,45 tkm	68,97 MJ/39,1 km der Tour = 1,764 MJ/km	68,97 MJ je Tour : 111,45 tkm je Tour = 0,619 MJ/tkm FzG
N2-LEH-Tour mit Diesel/Plug-In-Hybrid P2/Dual Energy Concept	40,2 km	20,1 km mit 9,35 t = 187,94 tkm	20,1 km mit 4,85 t = 97,49 tkm	285,42 tkm	92,82 MJ/40,2 km der Tour = 2,309 MJ/km	92,82 MJ je Tour : 285,42 tkm je Tour = 0,325 MJ/tkm FzG
N3-ZZG-Tour mit Diesel/P2 (TISG) Hybrid	36,0 km	18,0 km mit 35,24 t = 634,32 tkm	18,0 km mit 15,24 t = 274,32 tkm	908,64 tkm	451,33 MJ/36,0 km der Tour = 12,537 MJ/km	451,33 MJ je Tour: 908,64 tkm je Tour = 0,497 MJ/tkm FzG

Quelle: Berechnung mit AVL-Cruise; weiterbearbeitet von arp

Solche Indikatoren stellen keine der gewohnten Normwerte dar, sondern beschreiben die Qualitäten der Transportläufe und können als strategische Orientierungshilfen verstanden werden. Das Gesamtergebnis der zweiten Fahrzyklen-Simulation ist in einer *Indikatorentafel* (s. Tabelle 2-13) aufgelistet und zusammengefasst. Darin lässt sich das Ausmaß der Effekte je nach Hybridisierungsgrad zwischen den technologischen Polen konventioneller Dieselantrieb als Bestvariante heute und den elektrifizierten Antrieben zukünftig ablesen.

Zur Verdeutlichung dieser Zukunftspotenziale sind in der Tabelle 2-16 und der Tabelle 2-18 die Bestvarianten zu den Effekten der Mustertransportläufe auf Energieverbrauch und CO₂-äquivalente Emissionsmengen herausgehoben. Vorweg muss angemerkt werden, dass die Basisvarianten dem gegenwärtigen Stand der Technik und der Abgasvorschriften (EURO VI) entsprechen.

Dabei könnte der Energieverbrauch bei der N₁-KEP-Tour (ohne Veränderung des Logistikprozesses) von 2,44 MJ/tkmFzG auf 0,62 MJ/tkmFzG und die Emissionsmenge von 182 g/tkmFzG auf 34 g/tkmFzG abgesenkt werden. Bei der N₂-LEH-Tour (ohne Veränderung der geographischen Verteilung der Points of Sale) könnte der Energieverbrauch von 1,40 MJ/tkmFzG auf 0,33 MJ/tkmFzG und die Emissionsmenge von 105 g/tkmFzG auf 19 g/tkmFzG sinken. Schließlich ließe sich der Energieverbrauch der N₃-Zuliefer-Tour von 0,61 MJ/tkmFzG auf 0,50 MJ/tkmFzG und die Emissionsmenge von 46 g/tkmFzG auf 31 g/tkmFzG verbessern, wenn man davon ausgeht, dass eine weitgehende Elektrifizierung des Antriebes bei diesen Schwerfahrzeugen noch in fernerer Zukunft liegt.

Tabelle 2-17: Verkehrslogistischer CO₂-äquivalenter Emissionsindikator zum Vergleich der Fahrzyklus-Simulationen am Beispiel der Diesel- und der CNG-Basisvarianten

Tour	Energierrelevanter Transportaufwand in Tonnenkilometer (tkm)				Simulierte Emissionsmenge CO ₂ -Äquivalente in g/tkm Fahrzeuggewicht (FzG)	
	Lauf-länge der Tour	Vollladungs-äquivalente Fahrleistung mit Startgewicht	Leerfahrt-äquivalente Fahrleistung mit Eigenmasse	Transport-aufwand zur Bedienung der Tour	Emissionsmenge je Tour (Kontroll-rechnung)	Emissionsmenge in Gramm pro tkm tourenspezifisches Fahrzeuggewicht
N₁-KEP-Tour mit Dieselfahrzeug	39,1 km	27,4 km mit 2,6 t = 71,24 tkm	11,7 km mit 2,1 t = 24,57 tkm	95,81 tkm	17.465,97 gCO ₂ -Äq /39,1 km der Tour = 446,7 gCO ₂ -Äq/km	17.465,97 gCO ₂ -Äq je Tour : 95,81 tkm je Tour = 182,30 gCO₂-Äq/tkm FzG
N₁-KEP-Tour mit CNG-Fahrzeug		27,4 km mit 2,65 t = 72,61 tkm	11,7 km mit 2,15 t = 25,16 tkm	97,77 tkm	16.437,64 gCO ₂ -Äq /39,1 km der Tour = 420,4 gCO ₂ -Äq/km	16.437,64 gCO ₂ -Äq je Tour : 97,77 tkm = 168,13 gCO₂-Äq/tkm FzG
N₂-LEH-Tour mit Dieselfahrzeug	40,2 km	20,1 km mit 9,0 t = 180,9 tkm	20,1 km mit 4,5 t = 90,45 tkm	271,35 tkm	28.433,46 gCO ₂ -Äq /40,2 km der Tour = 707,30 gCO ₂ -Äq/km	28.433,46 gCO ₂ -Äq je Tour : 271,35 tkm je Tour = 104,79 gCO₂-Äq/tkm FzG
N₂-LEH-Tour mit CNG-Fahrzeug		20,1 km mit 9,2 t = 184,92 tkm	20,1 km mit 4,7 t = 94,47 tkm	279,39 tkm	27.046,56 gCO ₂ -Äq /40,2 km der Tour = 672,80 gCO ₂ -Äq/km	27.046,56 gCO ₂ -Äq je Tour : 279,39 tkm je Tour = 96,81 gCO₂-Äq/tkm FzG
N₃-ZZG-Tour mit Dieselfahrzeug	36,0 km	18,0 km mit 35,00 t = 630,0 tkm	18,0 km mit 15,00 t = 270,0 tkm	900,0 tkm	41.227,20 gCO ₂ -Äq /36,0 km der Tour = 1.145,20 gCO ₂ -Äq/km	41.227,20 gCO ₂ -Äq je Tour: 900,0 tkm je Tour = 45,81 gCO₂-Äq/tkm FzG
N₃-ZZG-Tour mit CNG-Fahrzeug		18,0 km mit 35,00 t = 630,0 km	18,0 km mit 15,00 t = 270,0 tkm	900,0 tkm	37.054,80 gCO ₂ -Äq/ 36,0 km der Tour = 1.029,30 gCO ₂ -Äq/km	37.054,80 gCO ₂ -Äq je Tour: 900,0 tkm je Tour = 41,17 gCO₂-Äq/tkm FzG

Quelle: Berechnung mit AVL-Cruise; weiterbearbeitet von arp

Tabelle 2-18: Verkehrslogistischer CO₂-äquivalenter Emissionsindikator zum Vergleich der Fahrzyklus-Simulationen am Beispiel der geringsten CO₂-äquivalenten Emissionen je Nutzfahrzeugkategorie (Bestvarianten)

Tour	Energierrelevanter Transportaufwand in Tonnenkilometer (tkm)				Simulierte Emissionsmenge CO ₂ -Äquivalente in g/tkm Fahrzeuggewicht (FzG)	
	Lauf-länge der Tour	Vollladungs-äquivalente Fahrleistung mit Startgewicht	Leerfahrt-äquivalente Fahrleistung mit Eigenmasse	Transport-aufwand zur Bedienung der Tour	Emissionsmenge je Tour (Kontroll-rechnung)	Emissionsmenge in Gramm pro tkm tourenspezifisches Fahrzeuggewicht
N₁-KEP-Tour mit Elektro-fahrzeug (BEV)	39,1 km	27,4 km mit 3,0 t = 82,20 tkm	11,7 km mit 2,5 t = 29,25 tkm	111,45 tkm	3.773,15 gCO ₂ -Äq /39,1 km der Tour = 96,50 gCO ₂ -Äq/km	3.773,15 gCO ₂ -Äq je Tour : 111,45 tkm je Tour = 33,86 gCO₂-Äq/tkm FzG
N₂-LEH-Tour mit Elektro-fahrzeug (BEV)	40,2 km	20,1 km mit 9,55 t = 191,96 tkm	20,1 km mit 5,05 t = 101,51 tkm	293,46 tkm	5.523,48 gCO ₂ -Äq /40,2 km der Tour = 137,4 gCO ₂ -Äq/km	5.523,48 gCO ₂ -Äq je Tour : 293,46 tkm je Tour = 18,82 gCO₂-Äq/tkm FzG
N₃-ZZG-Tour mit CNG-Hybrid P₂ (TISG)	36,0 km	18,0 km mit 35,24 t = 634,32 tkm	18,0 km mit 15,24 t = 274,32 tkm	908,64 tkm	28.490,40 gCO ₂ -Äq /36,0 km der Tour = 791,40 gCO ₂ -Äq/km	28.490,40 gCO ₂ -Äq je Tour: 908,64 tkm je Tour = 31,35 gCO₂-Äq/tkm FzG

Quelle: Berechnung mit AVL-Cruise; weiterbearbeitet von arp

❑ Ableitung von systemischen Reduktionspotenzialen durch Konzertierung von Maßnahmen

Die wirkungsvolle Verknüpfung von „konzertierten“ Maßnahmen erstens *am Fahrzeug*, zweitens *im Logistikprozess*, drittens *bei der Infrastrukturausstattung* und viertens *im Bereich von Verkehrsregelungen* mag an der folgenden Überlegung beispielhaft verdeutlicht werden:

Die N₁-Tour eines Kurier-, Express- und Paket-Dienstes ist in der Fahrzyklus-Simulation durch zwei Extremwerte hervorstechend, einerseits wurde das höchste Reduktionspotenzial beim Energieverbrauch (von 100 % der Basisvariante) um 70,5 % auf 29,5 % festgestellt, andererseits ist logistikbedingt für die Frachtbeförderung ein unverhältnismäßig hoher Transportaufwand erforderlich, der sich unter den getroffenen Annahmen mit 14 % Transportleistung gemessen am Transportaufwand ausdrückt.

Daher spricht das sehr hohe energetische Reduktionspotenzial klar für den Einsatz eines reinen Elektrofahrzeuges. Wegen der geringen Transportproduktivität wird angestrebt, die schlechten Gewichtsverhältnisse beim N₁-Fahrzeug durch eine Leichtbaukonstruktion des Lieferfahrzeuges zu verbessern. Dies heißt sich jedoch möglicherweise mit dem notwendigen Batteriegewicht, damit ein klagloser elektrischer Fahrbetrieb gewährleistet wird.

Dieser Konflikt könnte - modellhaft weitergedacht - durch Batterieladestationen im Zuge der Tour im zu bedienenden Gebiet gelöst werden. Dazu könnte als technische Lösung z.B. die Aufladung über einen Pantographen am Fahrzeugdach in Frage kommen, weil in Geschäftsstraßen ohnehin eine Fahrleitung für die Straßenbahn gespannt ist, die neben der markierten Ladezone vorbeiläuft (Beispiel City-Bus der Wiener Linien, Kapitel 1.1.2.4). Solche nicht allzu aufwändigen infrastrukturellen Aufrüstungen sollten dann aber praktischerweise mit entsprechenden Verkehrsregulierungen, wie einer Zero-Emission-Zone, verknüpft sein.

2.4.4.4 Vorgangsweise für die Interpretation und Schlussfolgerung der Simulationsergebnisse

Mit dem Bezug auf den Indikator Energieverbrauch pro Tonnenkilometer Fahrzeuggewicht (gemittelt über die Tour) in $\text{MJ}/\text{tkm}_{\text{FzG}}$ liegt eine Vergleichsgröße vor, die gewisse Interpretationen auch zwischen den unterschiedlichen verkehrslogistischen Mustertransportläufen N1-KEP, N2-LEH und N3-ZZG ermöglicht, wenn vorweg einerseits die Gemeinsamkeiten (wie gleiche Zulaufstrecke) und andererseits die Unvereinbarkeiten (wie keine Paketzustellung mit N3-Fahrzeug im Siedlungsgebiet) dargelegt werden.

Mit dem „verwandten“ verkehrslogistischen Emissionsindikator in $(\text{k})\text{g CO}_2\text{-Äquivalente}/\text{tkm}_{\text{FzG}}$ wird es für Stakeholder zudem möglich, eine Zielabwägung bzw. -gewichtung zwischen den Reduktionszielen Energieverbrauch und Emissionsentlastung vorzunehmen, je nachdem wie sich das hauptsächliche Einsatzfeld (wie Tourenlänge, Sensitivität der Verkehrskorridore/Bedienräume) eines Fuhrparks darbietet.

□ Präjudiz

Ident ist bei allen berechneten Touren die Referenzstrecke im Zu- und Rücklauf und sehr ähnlich die lokalen Bedienläufe, die somit die Laufwege des Gütermix über nahezu alle Logistikprozesse umfassen. Nimmt man dieses als Präjudiz her, kann ein Vergleich darüber angestellt werden, welche Varianten im Güterverkehr für die Referenzstrecke in Bezug auf die Effekte Energieverbrauch und Emissionen besser oder schlechter abschneiden, und daraufhin kann gefolgert werden, welche Angriffspunkte für Reduktionen sich aus diesem Vergleich ergeben könnten.

□ Ausgangspunkte der Interpretation

Nimmt man zunächst die Extremwerte heran, so verbraucht die CNG-Basisvariante der N1-Tour mit $2,99 \text{ MJ}/\text{tkm}_{\text{FzG}}$ am meisten Energie und die Plug-In-Diesel-Hybrid-Variante mit $0,34 \text{ MJ}/\text{tkm}_{\text{FzG}}$ bei der N2-Tour am wenigsten. Das erscheint doch als eine erstaunliche Spannweite von rund $9 : 1$ angesichts des nahezu selben Laufweges, nur dass die N2-Tour einige Lieferstopps weniger aufweist. Bleibt man beim Plug-In-Hybrid (PHEV ⁵) als Variante beider Touren N1 und N2, dann erzielt diese bei beiden Touren das beste Ergebnis mit $1,13 \text{ MJ}/\text{tkm}_{\text{FzG}}$ bei der N1-KEP-Tour und mit nur $0,34 \text{ MJ}/\text{tkm}_{\text{FzG}}$ bei der N2-LEH-Tour. Aber der Unterschied im Verhältnis ist immer noch hoch mit ca. $3,3 : 1$ für dieselbe Antriebsvariante.

□ Erkenntnisse und Angriffspunkte

Das spricht für eine bessere Bündelung der Anlieferstationen durch Paketabholstationen und für eine dadurch ermöglichte bessere Nutzlastauslastung der Fahrzeuge und des Weiteren für eine getrennte Abholung von Retoursendungen, die dann auch besser gebündelt werden könnten. Für die CNG-Varianten kann indes trotz des um ca. ein Fünftel ungünstigeren Energieverbrauches gegenüber den Dieselvarianten der um ein Zehntel günstigere Emissionseffekt sprechen, je nachdem, ob die Verteiltour in einem immissionsgefährdeten Bedienraum oder in einem diesbezüglich regional unbedenklichen Gebiet stattfindet. Der Klimaeffekt ist natürlich immer gleichermaßen gegeben. Eine CNG-Variante wird aber voraussichtlich dann eine Chance bekommen, wenn der höhere Energieverbrauch kostenmäßig durch einen deutlich günstigeren Kraftstoffpreis kompensiert werden kann, denn dieses Verhältnis ist zunächst weitgehend unabhängig von Beladungszuständen und Lieferstopps.

⁵ PHEV = Plug-In Hybrid Vehicle bzw. Hybridfahrzeug mit externer Lademöglichkeit der Batterie

Quellenhinweise zu Kapitel 2:

KÄFER (2011): Straßenverkehrszählung Wien 2010 – Auswertung Gemeindestraßen A + B. Wien: MA 18.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Köln

DÖRR et al. (2010): Friendly Supply Chains. Indikatorenkonzept für die verkehrsträgerübergreifende Bewertung von Transportketten am Beispiel der Supply Chains zu den NST/R-Gütergruppen Wein, Bier, Fruchtsaft und Milchprodukte. Endbericht zur Studie im Rahmen des izv-Forschungsprogrammes des BMVIT. IVS-Schriften Band 35. Wien

3. ANTIZIPATIONSANALYSE

Im abschließenden Teil dieser F&E-Dienstleistung EFLOG werden die Schlussfolgerungen aus der Status-Quo-Analyse und der Feasibility-Analyse zusammengefasst. Es hatte sich herausgestellt, dass der Stand der technologischen Entwicklungen in Hinblick auf eine emissionsreduzierte Gütermobilität und deren Marktmigration noch deutlich auseinanderklaffen, nicht zuletzt, weil das Risiko für eine Frühانwendung in einem extrem kompetitiven Transport- und Logistikgeschäft sehr hoch erscheint. Deshalb sind Prognosen vorläufig fehl am Platz und auch die Konstruktion von Szenarien, wie vergangene Studien gezeigt haben, bleiben wenig hilfreich. Vielmehr soll der Blick vorausschauend auf die Systemvoraussetzungen und die Systemzusammenhänge gelenkt werden.

3.1 Perspektiven der Energiemärkte

3.1.1 Fragestellung und Arbeitsprogramm

Wie geht es weiter mit der Mobilität? Wie gelingt der politisch, gesellschaftlich, zunehmend auch ökonomisch gewünschte, **Übergang zu einer postfossilen Mobilität?**

Das Gesamtprojekt EFLOG strukturiert und definiert zukünftige Fragen dieses Übergangs für den rasch wachsenden Straßengüterverkehr. Ziel ist dabei insbesondere die Verschränkung der Leistungsangebote der diversen Angebote von Antriebstechnologien mit den Bedienungsangeboten der Logistik- und Fuhrunternehmen.

Mit der technologischen Machbarkeit und ökologischen Verträglichkeit einer neuen Antriebstechnologie ist es noch nicht getan. Sie muss ebenso auf der Kostenseite attraktiv genug sein, um im Wettbewerb mit konkurrierenden Technologieangeboten zu bestehen und den logistischen Ansprüchen der verladenden Wirtschaft zu genügen.

Eine wichtige Kostenvariable der alternativen Antriebstechnologien sind neben den Fahrzeugkosten die Energiekosten (z.B. Strom) bzw. Kraftstoffkosten (z.B. Dieseldieselkraftstoff). Diese Kosten, im weiteren Sinne des Wortes, sind das zentrale Thema dieses Teilberichts.

Jede antriebstechnologische Innovation, die nicht nur zu Demonstrationszwecken in staatlich subventionierten Marktnischen überleben soll, ist ein langfristiges Projekt, das vielerlei Hindernisse überwinden muss: politisch, ökonomisch, psychologisch, organisatorisch etc. Daher reicht eine Momentaufnahme der Kosten nicht aus.

Trotz der unvermeidlichen Unsicherheiten bei längerfristigen Prognosen oder auch nur Szenarien, muss ein gut begründeter Blick in die Zukunft gewagt werden: Wie entwickeln sich aus heutiger Sicht die marginalen Kosten der Energieträger, wie hoch wird die Preisvolatilität sein, wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit von Versorgungskrisen oder Preiskrisen? Wie stark korrelieren die Energieträgerkosten untereinander?

3.1.2 Methodische Kritik und Anmerkungen

Kostentrends von Kraftstoffpreisen bzw. von internationalen Energiepreisen fristen in fast allen Studien zum Thema Verkehr, Infrastruktur und Fahrzeugtechnologie ein Schattendasein. Da die beteiligten Institute im allgemeinen über keine In-House-Expertise zu internationalen Energiemärkten verfügen, werden lediglich Daten aus Sekundär- oder Tertiärliteratur ausgewertet oder Trends der Vergangenheit ohne nähere Begründung fortgeschrieben.

Energiepreistrends werden dadurch trotz ihrer Relevanz zum externen Einflussfaktor, der kein Untersuchungsgegenstand ist und nicht weiter diskutiert wird. Das hat mehrere bedenkliche Konsequenzen für die Aussagekraft der Studien:

- Nicht selten werden starre, nicht weiter begründete und daher recht willkürliche Trends unterstellt („Preisanstieg +3 % pro Jahr“), oder es wird auf Tertiärliteratur zurückgegriffen, wodurch veraltete oder methodisch unpassende Daten oder Prognosen als „Stand der Forschung“ in die Berichte einfließen. In manchen Studien wird der Einfachheit halber auf eigene frühere Studien verwiesen und damit die mangelnde Auseinandersetzung mit dem Thema verschleiert.
- Die fossilen Energieträger wie Öl, Gas und Kohle werden nicht differenziert betrachtet. Es wird ein paralleler Preisverlauf angenommen, obwohl sich die drei Märkte sehr unterschiedlich entwickeln.
- Kurzfristige Stimmungsänderungen werden mangels Expertise überbewertet: Aktuell ist zu beobachten, dass ein Schwenk vom Paradigma der Ölknappheit (Peak Oil) zum fossilem Überfluss stattfindet (Shale Gas/Shale Oil-Euphorie).
- Im deutschsprachigen Raum wird in den größeren Studien direkt oder indirekt oftmals auf Publikationen der **IEA** zurückgegriffen, wenn es um langfristige Einschätzungen zur Energiepreisentwicklung geht. Die IEA, die Internationale Energieagentur mit Sitz in Paris, beobachtet seit den 70er Jahren im Auftrag der Industrieländer regelmäßig die internationalen Energiemärkte.

Dabei steht der jährlich erscheinende **World Energy Outlook (WEO)** der IEA im Zentrum. Die dort eher nebenbei erwähnten Preiserwartungen finden sich in fast allen großen Studien der deutschsprachigen Verkehrsprognosen, Verkehrsinfrastrukturplanungen oder auch Technologiestudien wieder.

Dieser Ansatz erscheint aus drei Gründen problematisch:

- Zum einen sind die Preisdaten szenariogebunden: Current Policies Scenario (CPS), New Policies Scenario (NPS), 450 ppm-Szenario. Die IEA hebt das NPS besonders hervor, das eine Fortsetzung der klimapolitischen Anstrengungen unterstellt, obwohl die tatsächliche Energiemarktentwicklung in vielerlei Hinsicht seit Jahren stärker dem pessimistischeren CPS entspricht (v.a. durch die Attraktivität der billigen Kohle). Die deutschsprachigen Studien verwenden nun jedoch die Preisdaten des NPS, ohne die zugrundeliegenden Szenarioannahmen explizit zu machen und ohne auf die Erwartungen des CPS näher einzugehen.
- Noch gravierender ist ein Problem, auf das die IEA nur in Fußnoten und in ihrem WEM (World Energy Model) verweist. Die veröffentlichten Energiepreiserwartungen spiegeln nicht die Erwartungen der IEA zu den tatsächlichen Marktpreisen für Öl, Gas oder Kohle wider, sondern

werden aus dem hauseigenen World Energy Model abgeleitet: Welche Preise sind mindestens notwendig, um die nötigen Investitionsanreize zur Deckung der erwarteten Energienachfrage in 2020, 2030 etc. zu erzeugen? Sie zeigen also in erster Linie die marginalen Kostenerwartungen. Nun sind aber gerade die Öl-, Gas- und Strommärkte weit davon entfernt, wie perfekte Wettbewerbsmärkte zu funktionieren. Man denke nur an das OPEC-Kartell, geopolitische Risikoprämien, politisch motivierte Gaspreise oder starke Eingriffe in die Strommärkte zur Förderung regenerativer Energieträger.

- Es kann daher nicht verwundern, dass die als Preisprognosen missverstandenen Kosten- und Nachfrageszenarien der IEA mit großer Regelmäßigkeit weit von der tatsächlichen Marktpreisentwicklung entfernt liegen. Die IEA verweist leider nur in Fußnoten auf diese Problematik, macht jedoch immerhin explizit, dass sie gerade wegen der permanenten Risiken der internationalen Energieversorgung mit höheren Marktpreisen rechnet, als sie in ihren Preistabellen ausweist.

3.1.3 Bandbreite von Energieträgern und Kraftstoffen

Die Antriebstechnologie der Zukunft kann auf eine ganze Palette von Optionen zurückgreifen. Die folgende Übersicht zeigt die Energieträger sowie ihre Konversion bzw. Bereitstellung als Kraftstoff oder Strom für das Fahrzeug. Die Primärenergie kann entweder fossiler (Öl, Gas, Kohle) oder regenerativer (Windkraft, Solarenergie, Biomasse etc.) Natur sein.

Abbildung 3-1: Energieträger und ihre Verarbeitungsschritte



Quelle: BMVBS 2013

Ihre Umwandlung hat unterschiedliche Komplexitätsgrade, die für die Kostenbetrachtung nicht unwesentlich ist. Während Erdgas in komprimierter Form (CNG) schon nach einer relativ einfachen Aufbereitung als Kraftstoff verwendet werden kann, muss Rohöl einen aufwendigen Entschwefelungs-, Raffinerungs- und Konversionsprozess durchlaufen, bevor es als Dieselkraftstoff oder Benzin dem Markt angeboten werden kann. Dasselbe gilt für Biomasse, die einen komplizierten und nur in Ansätzen standardisierbaren Konversionsprozess erfordert, um als Biokraftstoff zur Verfügung stehen zu können.

Die diversen Kraftstoffe lassen sich energetisch vergleichen, wie die nächste Übersicht zeigt. Die Energiedichte je Gewichts- oder Volumeneinheit variiert deutlich, so z.B. zwischen der hohen Energiedichte von Wasserstoff und Diesel, und der vergleichsweise geringen Energiedichte von Biokraftstoffen, Erdgas sowie von Batterien.

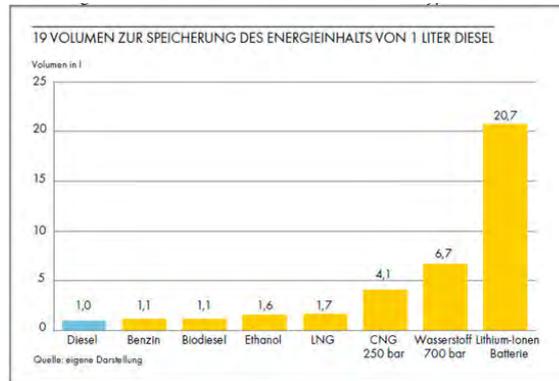
Abbildung 3-2: Energetischer Vergleich diverser Kraftstoffe

Energetischer Vergleich										
	Gasoline	Diesel (No. 2)	Biodiesel	Propane (LPG)	Compressed Natural Gas (CNG)	Liquefied Natural Gas (LNG)	Ethanol	Methanol	Hydrogen	Electricity
Chemical Structure	C ₄ to C ₁₂	C ₈ to C ₂₅	Methyl esters of C ₁₂ to C ₂₂ fatty acids	C ₃ H ₈ (majority) and C ₄ H ₁₀ (minority)	CH ₄ (83-99%), C ₂ H ₆ (1-13%)	CH ₄	CH ₃ CH ₂ OH	CH ₃ OH	H ₂	N/A
Fuel Material (feedstocks)	Crude Oil	Crude Oil	Fats and oils from sources such as soy beans, waste cooking oil, animal fats, and rapeseed	A by-product of petroleum refining or natural gas processing	Underground reserves	Underground reserves	Corn, grains, or agricultural waste (cellulose)	Natural gas, coal, or woody biomass	Natural gas, methanol, and electrolysis of water	Coal, nuclear, natural gas, hydroelectric, and small percentages of wind and solar
Gasoline Gallon Equivalent	100%	1 gallon of diesel has 113% of the energy of one gallon of gasoline.	B100 has 103% of the energy in one gallon of gasoline or 93% of the energy of one gallon of diesel. B20 has 109% of the energy of gasoline or 99% of the energy of one gallon of diesel.	1 gallon of propane has 73% of the energy of one gallon of gasoline.	5.66 pounds or 126.67 cu. ft. of CNG has 100% of the energy of one gallon of gasoline. [1]	1 gallon of LNG has 64% of the energy of one gallon of gasoline.	1 gallon of E85 has 73% to 83% of the energy of one gallon gasoline (variation due to ethanol content in E85). 1 gallon of E10 has 96.7% if the energy of one gallon of gasoline. [2]	1 gallon of methanol has 45% of the energy of one gallon of gasoline.	1 kg or 2.198 lbs. of H ₂ has 100% of the energy of one gallon of gasoline.	33.70 kWh has 100% of the energy of one gallon of gasoline.
Energy Content (Lower heating value)	116,090 Btu/gal (g)	128,450 Btu/gal (g)	119,550 Btu/gal for B100 (g)	84,950 Btu/gal (g)	20,268 Btu/lb (g) [1]	74,720 Btu/gal (g)	76,330 Btu/gal for E100 (g)	57,250 Btu/gal (g)	51,585 Btu/lb (g)	3,414 Btu/kWh
	Gasoline	Diesel (No. 2)	Biodiesel	Propane (LPG)	Compressed Natural Gas (CNG)	Liquefied Natural Gas (LNG)	Ethanol	Methanol	Hydrogen	Electricity
Energy Content (Higher heating value)	124,340 Btu/gal (g)	137,380 Btu/gal (g)	127,960 Btu/gal for B100 (g)	91,410 Btu/gal (g)	22,453 Btu/lb (g) [1]	84,820 Btu/gal (g)	84,530 Btu/gal for E100 (g)	65,200 Btu/gal (g)	61,013 Btu/lb (g)	3,414 Btu/kWh
Physical State	Liquid	Liquid	Liquid	Pressurized Liquid	Compressed Gas	Cryogenic Liquid	Liquid	Liquid	Compressed Gas or Liquid	Electricity

Quelle: Alternative Fuels Data Center (afdc.energy.gov)

Die unterschiedliche Energiedichte schlägt sich in einem stark variierenden Platzbedarf für den Tank bzw. die Batterie nieder, wie Darstellung 3-1 zeigt. Insbesondere der hohe Raumbedarf und das enorme Gewicht heutiger Batterien sind für Nutzfahrzeuge problematisch, da sie die Produktivität der Fahrzeuge beeinträchtigt.

Darstellung 3-1: Volumenbedarf verschiedener Kraftstofftypen



Quelle: eigene Darstellung nach IINAS/IFEU/SHELL 2012

Von zentraler Bedeutung für die Kosten und Einsatzmöglichkeiten ist der Wirkungsgrad der zur Verfügung stehenden Energie in einem Antriebs- bzw. Fahrzeugkonzept. Hier gibt es gravierende Unterschiede, wie die folgende Verkettung von Wirkungsgraden für ein 2020-Szenario zeigt. In der energetischen Kette vom primären Energieträger, über Treibstoff, Distribution, Einzelhandel und schließlich Fahrzeug gehen je nach technologischer Option zwischen 65 % und 92 % der Energie verloren.

Abbildung 3-3: Wirkungsgrade und Energieverluste



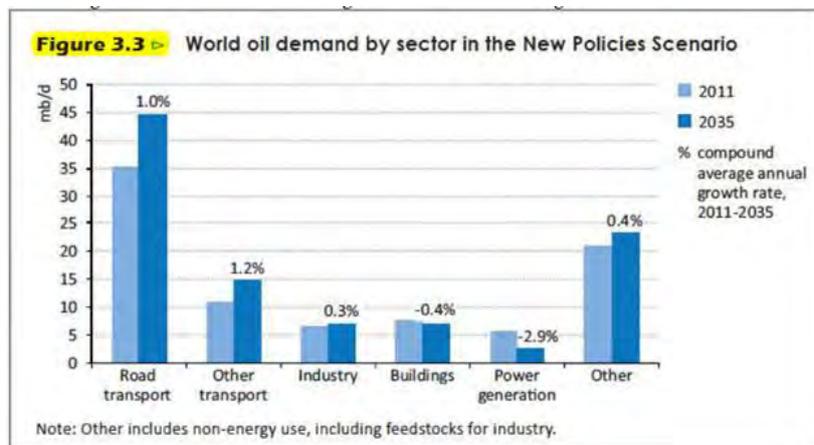
Quelle: BMW AG, Daimler AG et al. 2011

3.1.4 Der Status-Quo: Monokultur Dieselmotoren

3.1.4.1 Rahmenbedingungen: Wachstum und technologische Sackgasse

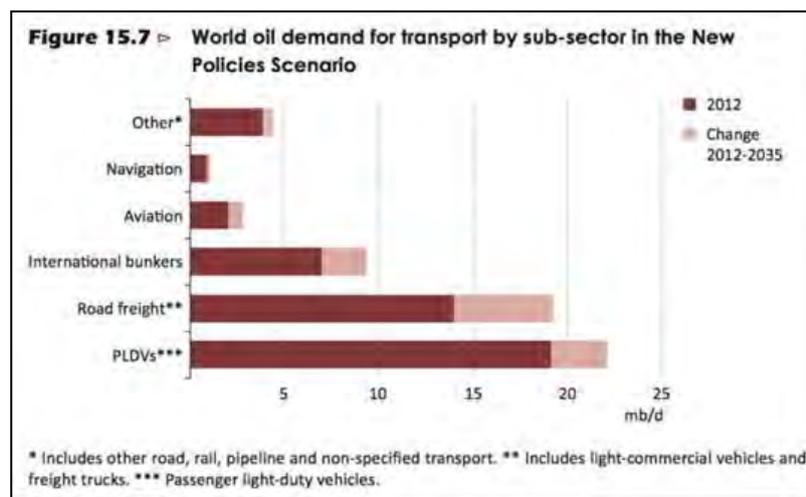
1. Der Verkehr verbraucht weltweit etwa 60 % des Ölangebots. Dieser Anteil wird weiter steigen. In Westeuropa und anderen Regionen wird auch weiterhin ein Wachstum des Straßengüterverkehrs erwartet. Bis 2035 werden die weltweit benötigten Kraftstoffmengen des Lkw-Verkehrs den Umfang des heutigen Pkw-Verkehrs erreichen, wie die folgende Grafik zeigt. Sowohl in absoluten Mengen als auch relativ wächst kein Sektor des Verkehrs so schnell wie der Lkw-Verkehr.

Abbildung 3-4: Wachstum der Ölnachfrage und Gesamtnachfrage nach Sektoren



Quelle: IEA: World Energy Outlook 2012

Abbildung 3-5: Umfang und Zuwachs der Ölnachfrage unterschiedlicher Verkehrssektoren



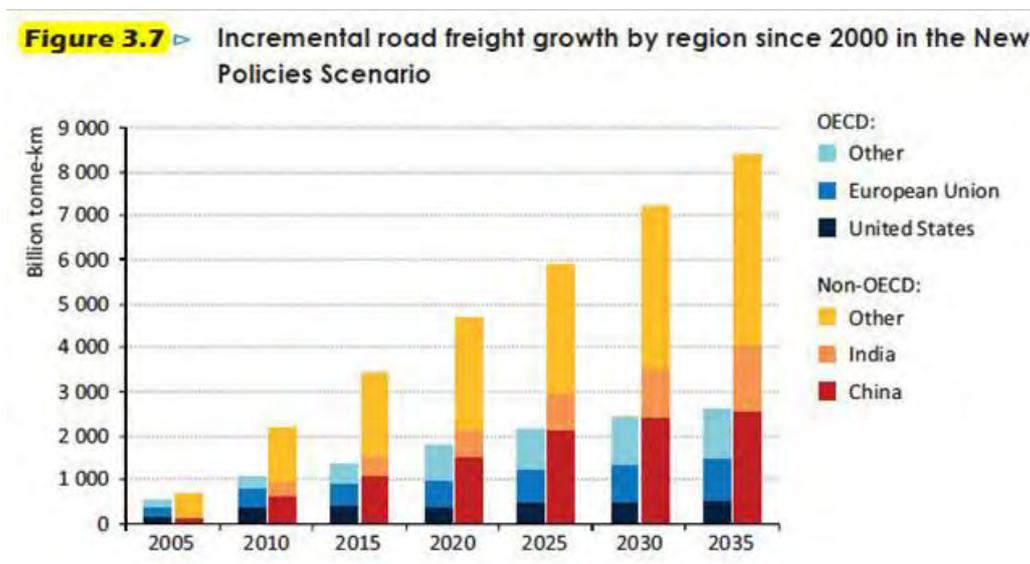
Quelle: IEA: World Energy Outlook 2013

Schwerpunkte des Wachstums sind die Schwellenländer, insbesondere China. Das hat auch Konsequenzen für die Antriebstechnologie. Generell gilt, dass die technologischen Standards in den Leitmärkten etabliert werden und von dort aus ihren Weg in die peripheren Märkte finden.

Bislang waren die USA und Westeuropa die technologischen Leitmärkte im Verkehr, doch schon heute ist China der mit Abstand größte Markt der Welt für Neufahrzeuge bei Pkw und Nutzfahrzeugen. Daher werden auch die Markimpulse und die technologischen Impulse verstärkt von dort kommen. Das gilt umso mehr, als China vor großen Herausforderungen steht: Der Smog in den Innenstädten („Airpocalypse“), der seit Anfang 2013 ein Politikum ersten Ranges ist, und die wachsende, politisch unerwünschte Abhängigkeit von Ölimporten, führen schon heute zu einer vergleichsweise aktiven Verkehrs- und Kraftstoffpolitik, zu der auch „New Energy“-Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien gehören.

Kraftstoffe wie komprimiertes Erdgas (CNG) und verflüssigtes Erdgas (LNG) sowie Elektrofahrzeuge werden besonders stark gefördert, insbesondere in städtischen Busflotten, in der Küsten- und Binnenschifffahrt und verstärkt auch im Lkw- und Pkw-Verkehr.

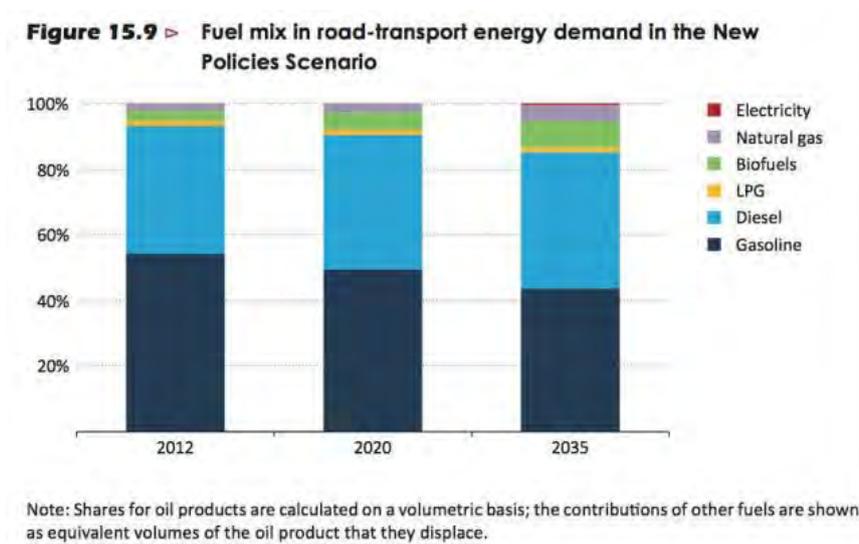
Abbildung 3-6: Wachstum des Straßengüterverkehr (Verkehrsleistung) nach Region!



Quelle: IEA: World Energy Outlook 2012

2. Aus technologischer Sicht ist der heutige Lkw-Verkehr eine Monokultur: Fast der gesamte Nutzfahrzeugverkehr verwendet Diesel als Kraftstoff für einen weitgehend standardisierten Verbrennungsmotor. Nur bei leichten Nutzfahrzeugen kommen auch Benzinmotoren zum Einsatz. Die folgende Grafik zeigt die Marktanteile der Kraftstoffe für den Straßenverkehr insgesamt (Personen und Güter) für das Jahr 2012 (links) sowie die Erwartungen für die kommenden Jahrzehnte.

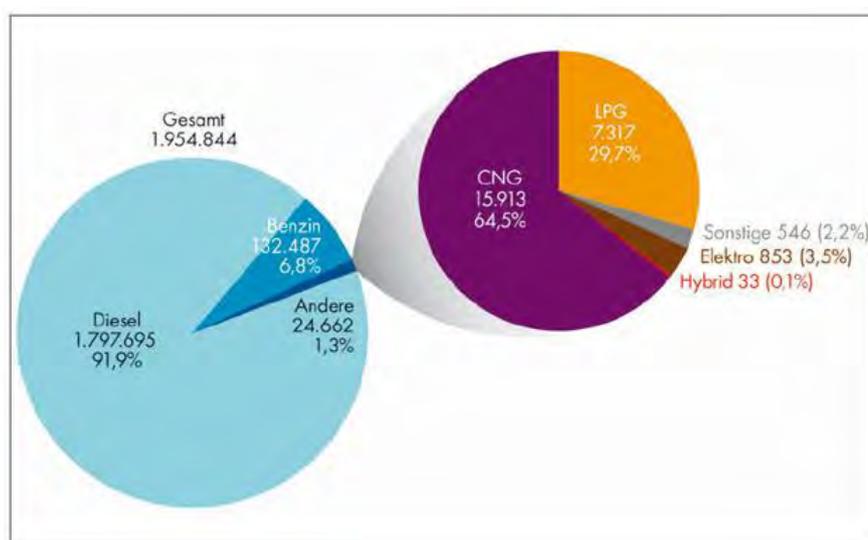
Abbildung 3-7: Kraftstoffe im globalen Straßenverkehr 2012-2035



Quelle: IEA: World Energy Outlook 2013

In den europäischen Industrieländern setzt der Lkw- und Sattelzugverkehr ausschließlich auf Diesel. Selbst die leichten Nutzfahrzeuge verwenden z.B. in Deutschland zu 92 % Diesel, zu 7 % Benzin und nur zu 1 % alternative Antriebe, insbesondere CNG und LPG.

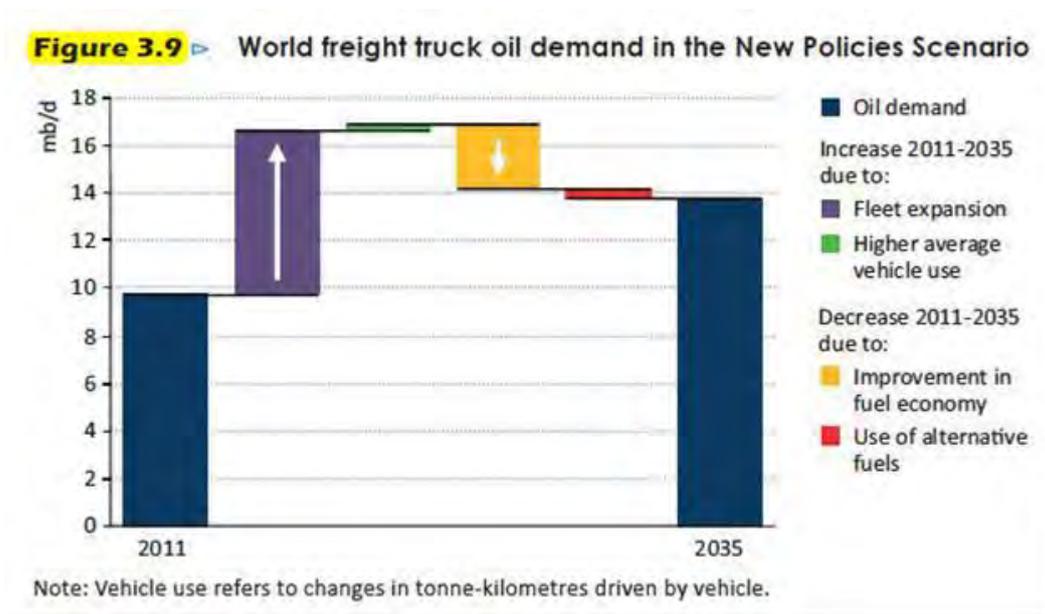
Abbildung 3-8: Antriebe und Kraftstoffe leichter Nutzfahrzeuge in Deutschland!



Quelle: Adolf, Knitschky, Lischke 2012

Die laufenden Produktivitätsgewinne in der Dieseltechnik und Fahrzeugtechnik werden nicht ausreichen, die höhere Nachfrage nach Transportdienstleistungen aufzufangen. Die IEA erwartet daher einen Anstieg des Ölverbrauchs im Straßengüterverkehr 2011-2035 um 40 %.

Abbildung 3-9: Komponenten der Kraftstoffnachfrage im globalen Lkw-Verkehr



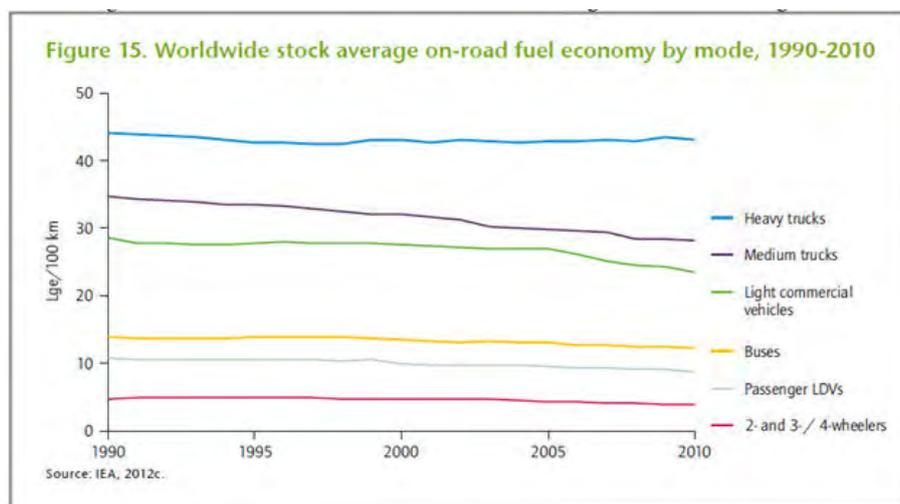
Quelle: IEA: World Energy Outlook 2012

3.1.4.2 Potenziale und Risiken der Diesel-Monokultur

□ Technologischer Ausblick

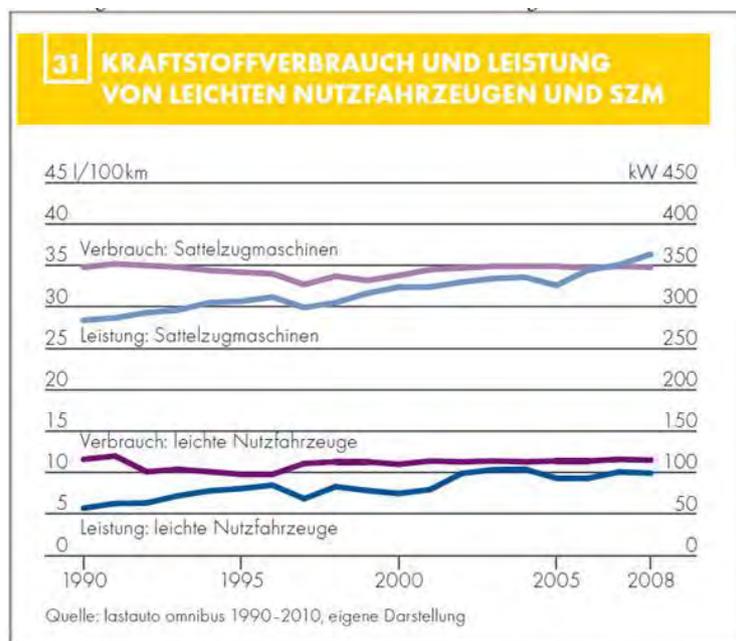
Auch wenn der Dieselmotor technisch sehr ausgereift ist, bietet die Kombination des Dieselmotors mit der Hybridtechnik die Möglichkeit, den Wirkungsgrad des Antriebs auch motorseitig noch deutlich zu steigern, indem die Betriebspunkte des Motors um den Bereich des Wirkungsgradmaximums (in Zukunft bis zu 45-50 %) verschoben werden können. Die Verbrauchswerte haben sich 1990-2010 kaum verändert, wie die folgenden beiden Übersichten demonstrieren.

Abbildung 3-10: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch im globalen Straßengüterverkehr 1990-2010



Quelle: IEA: Technology Roadmap Fuel Economy of Road Vehicles 2012

Abbildung 3-11: Kraftstoffverbrauch im deutschen Straßengüterverkehr 1990-2008



Quelle: Shell 2013

Überdies wird an neuen Brennverfahren für Dieselmotoren gearbeitet, die zusammen mit effizienteren Abgasnachbehandlungsverfahren es erlauben, auch zukünftig noch weiter verschärfte Emissionsgrenzen (EURO VI und folgende) ohne Wirkungsgradeinbußen einzuhalten.

Wichtigste Impulse kommen aus der der Hybrid-Technik, aus dem Fahrzeugdesign und dem Fahrverhalten. Größere Sprünge erfordern also die Integration neuer Antriebstechnologien, die den Dieselantrieb ergänzen oder gegebenenfalls auch teilweise ersetzen (z.B. Plug-In Hybrid).

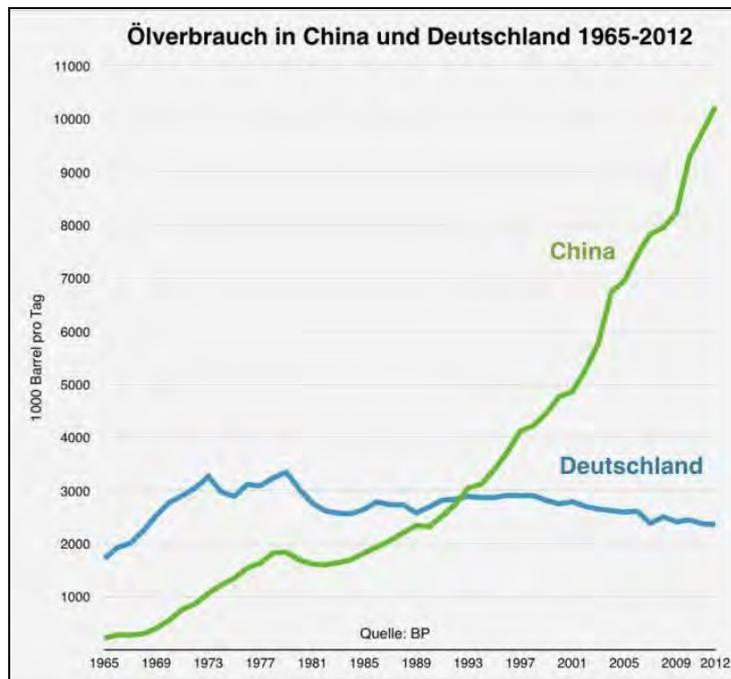
❑ Geologische Sackgasse – Alternativantriebe unvermeidlich

Der aktuelle antriebstechnologische Pfad der ölbasierten Motorisierung, der etwa 60 % des globalen Ölangebots verbraucht, und der teilweise ölbasierten Industrialisierung (Petrochemie) führt langfristig in eine Sackgasse, da die Rohstoffressourcen nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen.

Wenn China, Indien etc. auch weiterhin eine Motorisierung wie in den alten Industrieländern (Europa, USA, Japan) verfolgen, wird der Diesel- und Benzinkonsum einen Umfang erreichen, der produktionstechnisch von der Ölindustrie nicht mehr bewältigt werden kann. Die folgende Abbildung zeigt, wie rasch sich der Ölverbrauch in China entwickelt hat. Dort werden bereits 11,5 % des globalen Ölangebots verbraucht: im Verkehr, in der Industrie und in der Petrochemie.

Selbst wenn nur China denselben Pro-Kopf-Ölverbrauch wie z.B. Deutschland entwickeln sollte, würden dort knapp 40 Mio. Barrel pro Tag, also etwa 45 % des globalen Ölangebots, benötigt werden. Indien und China zusammen würden das gesamte aktuelle Ölangebot für sich beanspruchen müssen.

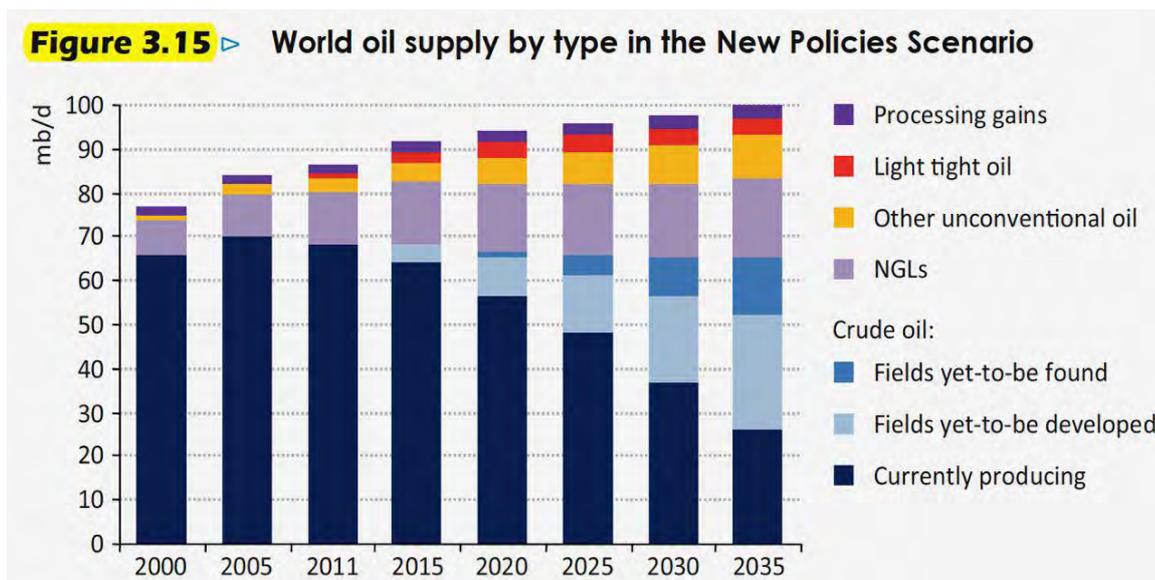
Abbildung 3-12: Ölverbrauch in China und Deutschland 1965-2012



Quelle: EnergyComment

Die wachsende globale Nachfrage trifft auf immer größere Probleme bei der sicheren Bereitstellung des Rohstoffs. Schon seit 2005 stagniert die Förderung von Rohöl im engeren Sinn (Crude+Condensates). Die heute aktiven Ölfelder werden bis 2035 etwa zwei Drittel ihrer Leistungskraft verlieren (vgl. dunkelblaue Säulensegmente in Abbildung 3-13 unten).

Abbildung 3-13: Quellen der globalen Ölversorgung 2000-2035



Quelle: IEA: World Energy Outlook 2012

Flüssiggase aus Erdgasfeldern (Ethan, Propan, Butan), Ölsand, Schieferöl und die (ungewisse) Entdeckung neuer Ölfelder werden bestenfalls ausreichen, das globale Ölangebot in den kommenden zwei Jahrzehnten um 0,5-1 % pro Jahr auszuweiten. Noch vor 2040 ist sogar ein Rückgang des Ölangebots wahrscheinlich, je nach der Schwere der Investitionshemmnisse (politischer oder ökonomischer Natur) sogar schon davor.

Alle Entwicklungsvarianten **erzwingen daher die Einführung alternativer Antriebstechnologien** im großen Maßstab:

- Entweder wird der aktuelle Technologiepfad der Diesel-Monokultur weiter verfolgt, bis Öl relativ knapp und damit sprunghaft teurer wird. In diesem Fall werden sich alternative Antriebe zwar spät, aber dann unvermeidlich aus Kostengründen am Markt durchsetzen. In manchen Ländern geschieht das schon heute, da Erdgas billiger als Öl ist.
- Oder diese Verknappung wird antizipiert und durch politische Maßnahmen entschärft, indem schon jetzt alternative Antriebe mit finanzieller oder regulatorischer Förderung auf dem Markt etabliert werden.
- In der dritten Variante bleibt Diesel dem Lkw-Fernverkehr vorbehalten, während die extremen Schadstoffbedingungen in den Metropolen der Schwellenländer zu restriktiven Maßnahmen in Stadtregionen zwingen, z.B. Einführung von Elektrofahrzeugen oder Erdgasantrieben.

In allen drei Fällen werden Alternativen zum Dieselantrieb in großer Zahl auf den Markt kommen. Das eröffnet technologiestarken Exportstaaten, die schon jetzt Kompetenzen für die post-Diesel-Ära aufbauen, große Marktchancen und wird dort die Arbeitsplätze langfristig sichern.

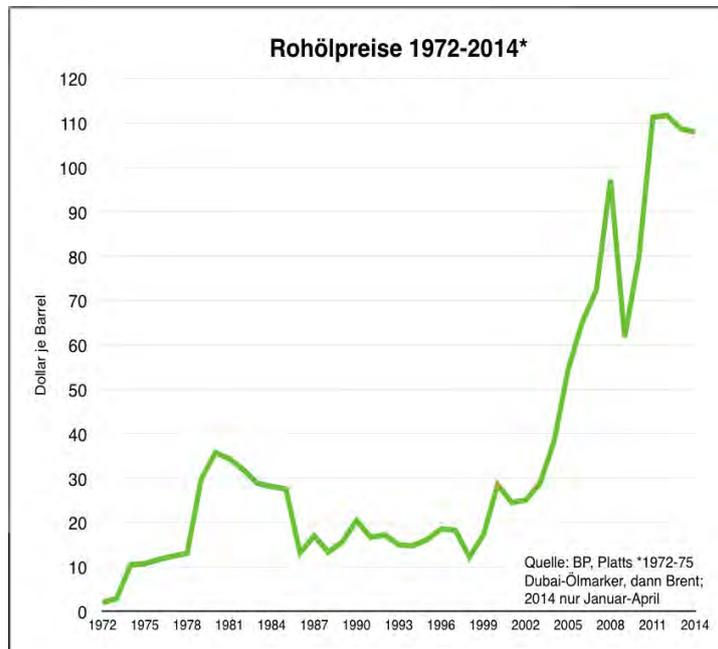
❑ Rohölriskien - langfristige Sicherung der Dieselvesorgung durch Schieferöl?

Die Ölpreise sind seit Beginn dieses Jahrhunderts stark gestiegen, wie die folgende Übersicht zeigt. Trotz der relativ schwachen Weltkonjunktur seit 2009 bleiben sie in der Nähe des Allzeithochs. Sollte die Weltwirtschaft wieder Fahrt aufnehmen, ist mit einem erneuten Preisschub zu rechnen.

In den letzten drei Jahren wuchs die Hoffnung, dass die Erschließung von amerikanischem Schieferöl (Shale Oil oder Light Tight Oil - LTO) mittels Fracking, also der hydraulischen Frakturierung von Schiefergestein, das Ölzeitalter deutlich verlängern könnte.

Nach der ersten Euphorie ist jedoch Ernüchterung eingetreten. Viele Vorkommen lassen sich nicht ökonomisch sinnvoll fördern oder sind sogar technisch nicht förderbar, da sich das Öl auch nach der gewaltsamen Öffnung von Gesteinsklüften nicht zum Bohrloch bewegt.

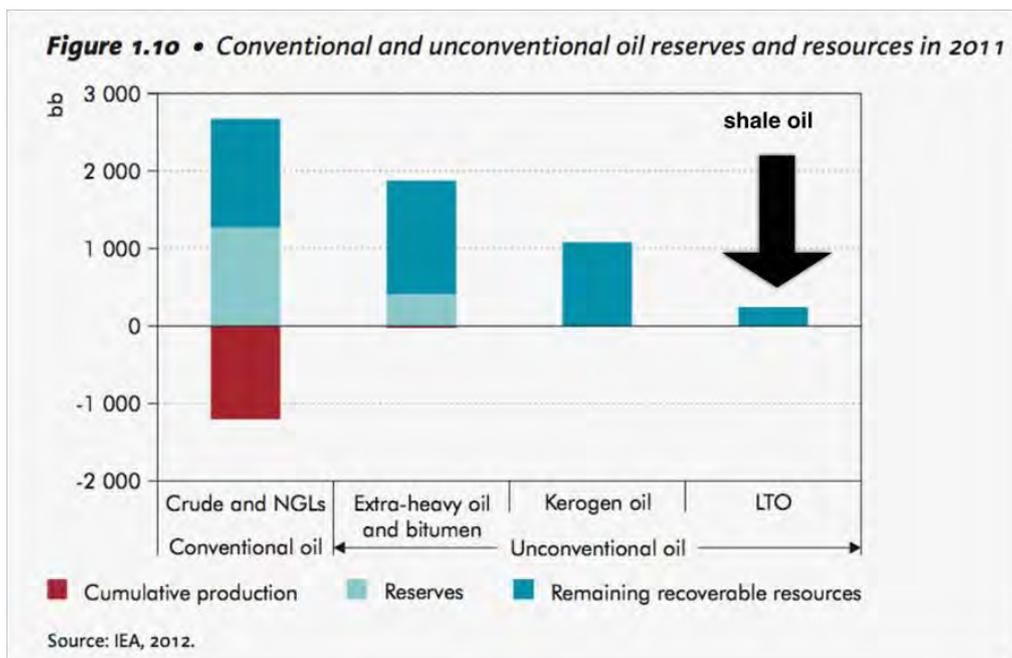
Abbildung 3-14: Ölpreisentwicklung



Quelle: EnergyComment, BP Statistical Review of World Energy 2014

Die folgende Abbildung 3-15 zeigt, wie gering der Beitrag von Schieferöl zur Weltölversorgung sein wird. Selbst die dort angegebenen Mengen mussten im Mai 2014 um ein Drittel reduziert werden, da sich das Öl im Monterey Shale als nicht förderbar herausstellte.

Abbildung 3-15: Konventionelle und unkonventionelle Ölreserven und Ölressourcen



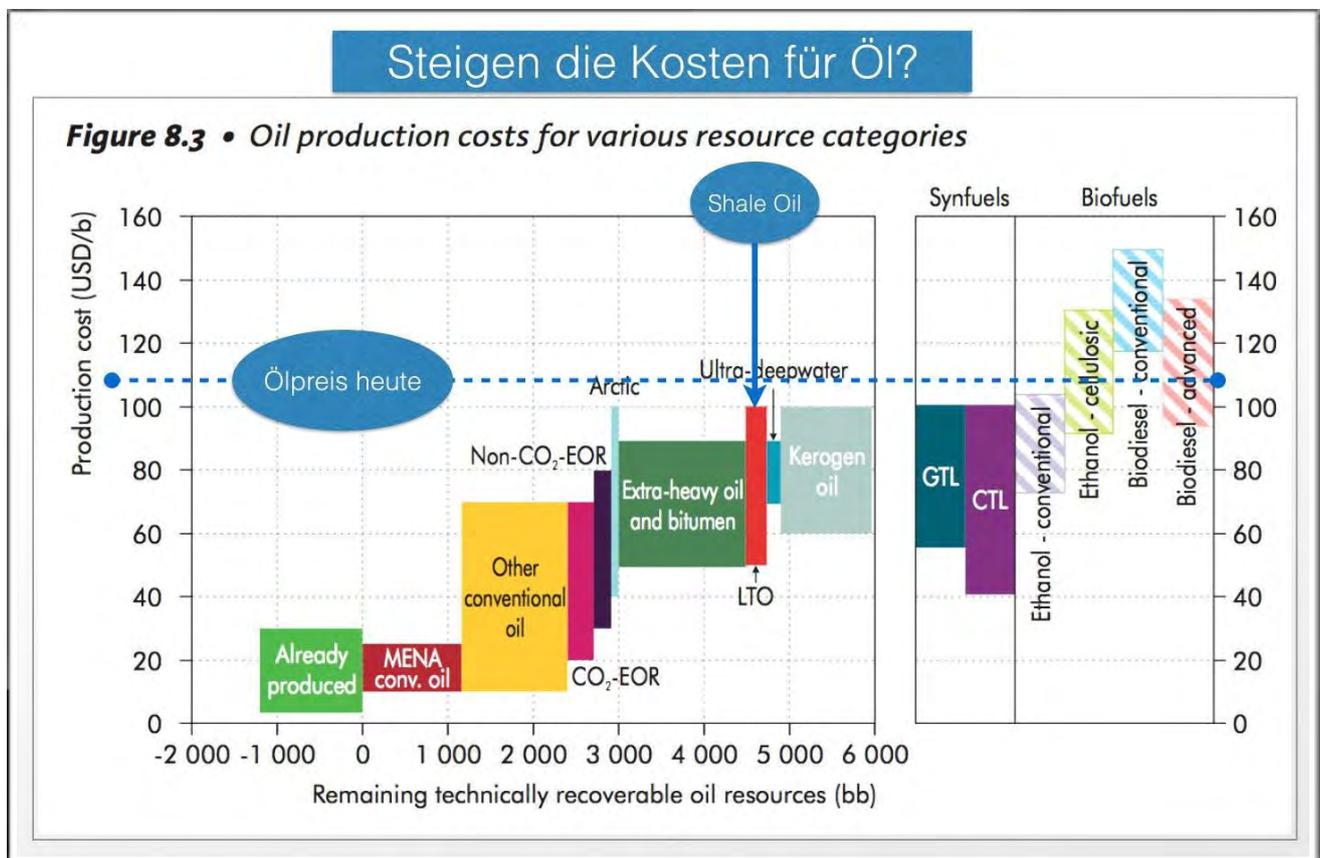
Quelle: IEA: Resources to Reserves 2013

Auch kann Schieferöl keinen Beitrag zur Preissenkung liefern. Die Produktionskosten liegen bislang bei 50-100 \$/b und bewegen sich wegen der Erschöpfung der „Sweet Spots“ allmählich aufwärts.

Große konventionelle Ölvorkommen haben weitaus niedrigere Kosten, insbesondere am Persischen Golf. Allerdings sorgen diese Produzenten durch Kartellbeschlüsse innerhalb der OPEC dafür, dass die Ölpreise nicht dauerhaft sinken können. Die Rente dient zum Ausgleich der staatlichen Haushalte. Außerhalb der OPEC-Staaten und Russlands gibt es kaum noch „low-cost“-Öl. Der Ölpreis kann also schon wegen der Kosten des marginalen Anbietenden kaum noch sinken.

In der folgenden Übersicht wird deutlich, dass Schieferöl wegen seiner hohen Kosten keinen Beitrag zur Kostensenkung leisten kann.

Abbildung 3-16: Kosten der Ölproduktion



Quelle: IEA: Resources to Reserves 2013

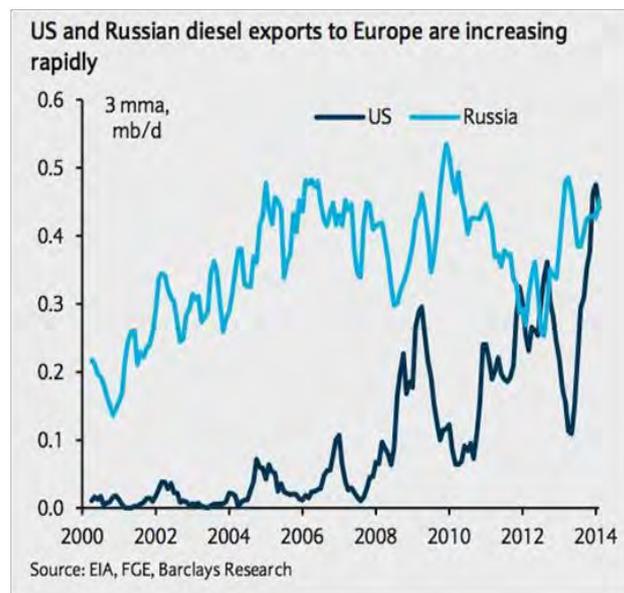
❑ **Downstream-Risiken: Raffineriesterben und Versorgungssicherheit in Europa**

(a) Die Probleme der schrumpfenden europäischen Raffineriebranche und der damit zusammenhängenden Preisrisiken werden erst in jüngster Zeit verstärkt wahrgenommen. In einem Bericht für den europäischen Gipfel im Juni 2014 hat die Europäische Kommission jüngst darauf aufmerksam gemacht, dass russische und andere nicht-europäische Ölkonzerne und Öl-handelnde

Unternehmen in der EU zahlreiche Raffinerien und Ölterminals aufgekauft haben.[†] Gleichzeitig muss die EU etwa 90 % ihres Öls importieren, davon ein Drittel aus Russland.

Dadurch entstehen Preisrisiken und Versorgungsrisiken für den europäischen Markt: Produktimporte, insbesondere für schwefelarmen Diesel, Kerosin oder Naphtha, sind weitaus enger, preisvolatiler und stärker vermacht als Rohölmärkte. Russische Mineralölhandelsunternehmen sind mit Abstand die größten Rohöl-lieferanten der EU und liefern sich mit den USA ein Kopf-an-Kopf Rennen um den ersten Rang beim Export von Ölprodukten in die EU.

Abbildung 3-17: Dieselexporte in die EU



Quelle: Barclays Capital

Durch die direkte Kontrolle über den europäischen Raffineriepark üben die Importierenden nun auch noch direkten Einfluss auf die Versorgung europäischer Regionen aus. In den letzten Jahren kam es immer wieder zu Beschwerden, dass Öl-handelnde Unternehmen bestimmte Produktmärkte „cornern“, also künstliche Verknappungen erzeugen. Das betraf u.a. den Handel mit Naphtha und mit Diesel.

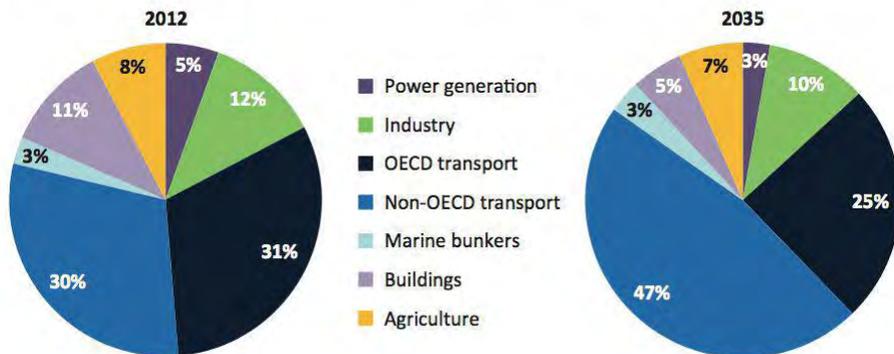
(b) Zahlreiche Raffinerien in Europa wurden geschlossen, weil sie mit Importen preislich nicht mithalten können, oder weil die europäische Nachfrage mit ihrem wachsenden Diesel- und schrumpfenden Benzinanteilen raffinieretechnisch nicht mehr passt.

Die globale Produktnachfrage konzentriert sich stark auf Diesel, da Diesel/Heizöl bzw. das Vorprodukt Gasoil gleichzeitig für mehrere Sektoren von großer Bedeutung ist: Verkehr, Industrie, private Haushalte, Stromerzeugung (als Backup).

[†] Europäische Kommission: European Energy Security Strategy SWD (2014) 330 final, Brüssel, 28.5.2014 COM (2014) 330 final.

Abbildung 3-18: Einsatzgebiete von Diesel

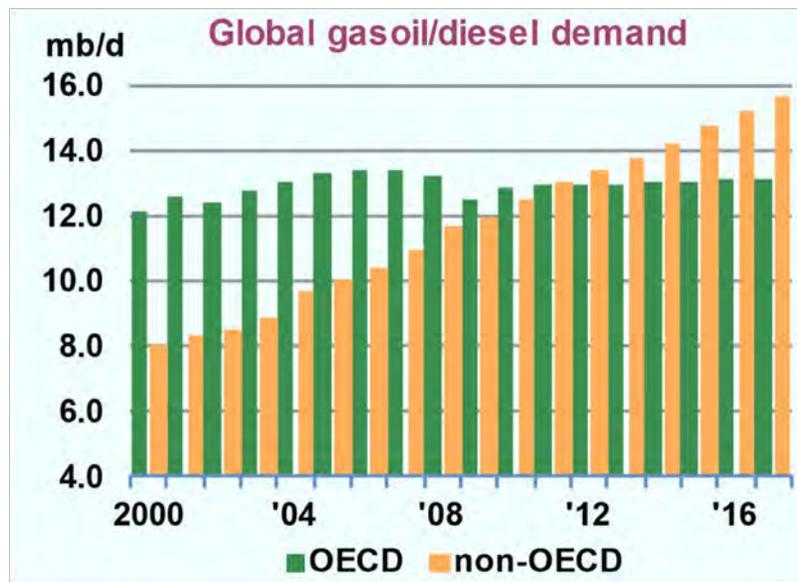
Figure 15.20 ▷ World diesel demand by sector in the New Policies Scenario



Quelle: IEA: World Energy Outlook 2013, Paris 2013

Man kann in der Tat von einer „Dieselization“ der Weltölmärkte sprechen. Die Dieselnachfrage außerhalb der alten Industrieländer (OECD) verdoppelt sich in den Jahren 2000-2016.

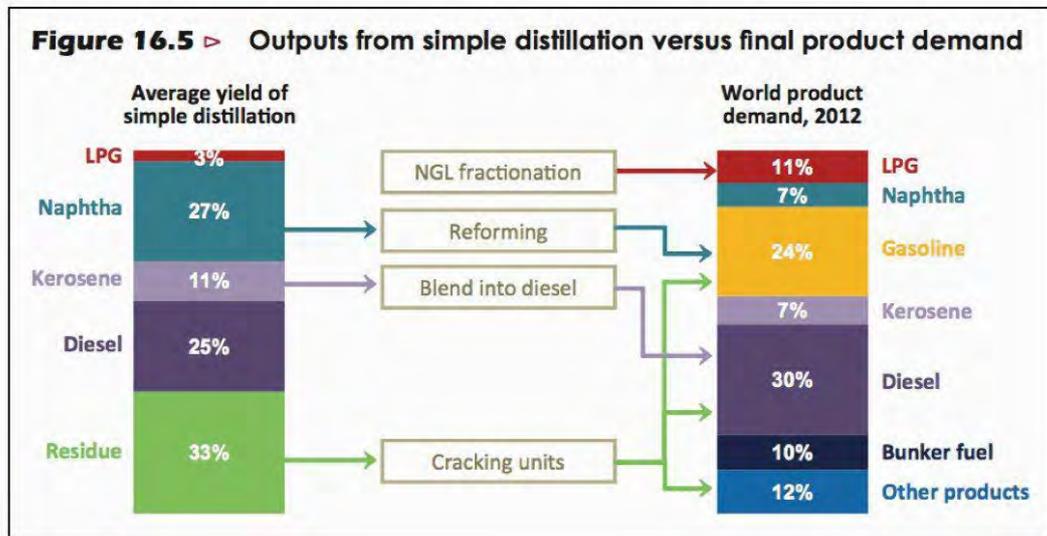
Abbildung 3-19: Steil wachsende Dieselnachfrage in Schwellen- und Entwicklungsländern (non-OECD)



Quelle: IEA: Medium-Term Oil Market Report 2013

Auch in Westeuropa verschiebt sich die Nachfrage aufgrund der Attraktivität von Dieselfahrzeugen weg vom Benzin und hin zum Dieseldieselkraftstoff. Das ist für die relativ alten Raffinerien in Europa problematisch, da ihre einfache technische Konfiguration zu viel Benzin und zu wenig Diesel produziert (s. Abbildung 3-20).

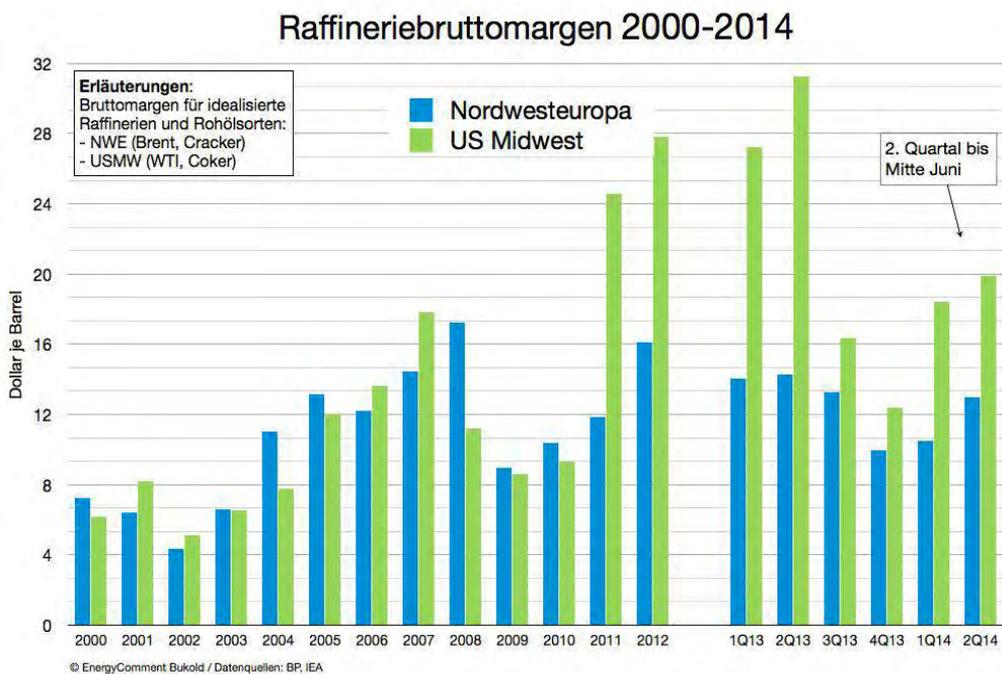
Abbildung 3-20: Output einer simplen Destillations-Raffinerie vs Struktur der Ölnachfrage



Quelle: IEA: Medium-Term Oil Market Report 2014

Im Ergebnis kommt es zu stark schwankenden Raffineriemargen, wie die folgende Abbildung 3-21 selbst bei Durchschnittsmargen (!) pro Quartal zeigt. In der Raffinerieregion Nordwesteuropa, zu der neben Benelux und Deutschland auch Österreich gehört, schwankten die Margen in den letzten Jahren zwischen 4 und 16 Dollar pro Barrel, also zeitweise 20 % des Rohölpreises. In den USA sind die Schwankungen noch stärker.

Abbildung 3-21: Raffineriemargen



Quelle: EnergyComment: Global Energy Briefing Nr.100 Juni 2014

Diese Preisrisiken könnten in den nächsten Jahren weiter zunehmen, insbesondere wenn man kürzere Zeiträume und Teilregionen betrachtet, die nicht mehr über eine regionale Raffinerie versorgt werden, sondern von globalen Handelsketten für spezifische Produkte wie ULSD abhängen (Ultra Low-Sulfur Diesel).

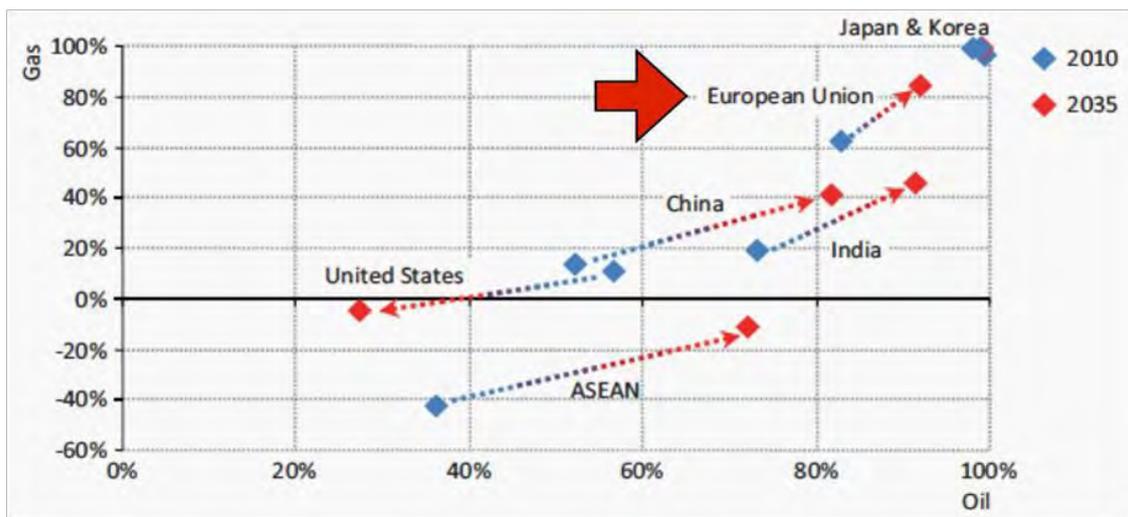
Zusätzlich zu den oben beschriebenen Preisrisiken durch Rohöl und Raffinerien ergeben sich aus der Abhängigkeit von Diesel noch weitere Risiken, die im Folgenden skizziert werden:

❑ Risiko Importabhängigkeit

Aufgrund der allmählichen Erschöpfung der Öl- und Gasreserven wird die Importabhängigkeit der EU weiter steigen, wie Abbildung 3-22 unten zeigt. Damit bewegt man sich auf „japanische Verhältnisse“ zu: Bis 2035 müssen über 90 % des Ölverbrauchs und über 80 % des Erdgasbedarfs in der EU durch Einfuhren gedeckt werden.

Entsprechend stark beeinflussen Ereignisse in Übersee (Stichworte: Ukraine, Syrien, Libyen, Irak etc.) die Versorgungssicherheit und damit die Preisrisiken des Dieseldraftstoffs.

Abbildung 3-22: Importabhängigkeit der EU bei Öl und Gas



Quelle: IEA: World Energy Outlook 2013

❑ Kostenrisiko Wechselkurs

Selbst in geopolitisch ruhigen Zeiten erhöhen schwankende Wechselkurse, insbesondere zwischen Euro und US-Dollar, die Preisvolatilität der Rohöl- und Dieseleinfuhren der EU-Länder.

Abbildung 3-23 verdeutlicht die teilweise abrupten Verschiebungen im Außenwert des Euros. Eine Verschiebung von z.B. 1,50 \$/€ auf 1,35 \$/€ erhöht die Kosten der Rohöleinfuhr um 10 % - mit entsprechenden konjunkturellen Folgen. Eine Kraftstoffversorgung, die auf heimische Energieträger setzt, könnte solche Preisrisiken vermeiden.

Abbildung 3-23: Wechselkursrisiken



Quelle: finanzen.net

❑ Kostenrisiko Klimapolitik

Im Moment ist schwer einzuschätzen, wie schnell sich die globale Erwärmung fortsetzt und wie stark politisch darauf reagiert wird. Unbestritten ist jedoch, dass innerhalb der EU zahlreiche energie- und verkehrspolitische Maßnahmen mit dem Ziel eines besseren Klimaschutzes auf den Weg gebracht wurden.

Es ist durchaus möglich, dass schon in wenigen Jahren die Folgen der globalen Erwärmung deutlicher sichtbar werden und dass daraufhin energischere Maßnahmen zum Klimaschutz verabschiedet werden, was insbesondere auf eine Einschränkung bei der Verbrennung von Öl, Gas und Kohle hinausläuft.

Es liegt auf der Hand, dass davon auch der Dieserverbrauch betroffen wäre. Höhere Steuern und regulative Eingriffe könnten zu einer beträchtlichen finanziellen und organisatorischen Belastung von Fuhrunternehmen führen, die einseitig von Dieselmotoren abhängen.

Insofern stellt die Monokultur des Diesels auch unter klimapolitischen Gesichtspunkten ein Kostenrisiko dar, das z.B. regenerativen Energieträgern fehlt.

❑ Innovation und Exportmärkte

Ein zu langes Festhalten an einer Diesel-Monokultur könnte indirekt Exportchancen und Arbeitsplätze gefährden. Unternehmen, die neue Technologien und Konzepte für post-fossile Antriebe entwickeln, sind darauf angewiesen, im eigenen Land Praxiserfahrungen mit neuen Antriebstechnologien sammeln und auswerten zu können.

Das gilt insbesondere dann, wenn wichtige Absatzmärkte wie USA oder China bereits auf neue Pfade einschwenken, im eigenen Land aber noch an überkommenen Konzepten festgehalten wird.

Aber auch den umgekehrten Fall gilt es zu vermeiden: Der überaus rasch wachsende konventionelle Fahrzeugmarkt in China verleitet Fahrzeug- und Motorenhersteller dazu, Innovationen für den europäischen Heimatmarkt hinauszuschieben und stattdessen die „Gunst der Stunde“ in Fernost mit herkömmlichen Modellen zu nutzen. Hier wäre es eine Aufgabe der Forschungspolitik, innovative Impulse zu fördern.

3.1.4.3 Zwischenfazit: Asymmetrische Preisrisiken bei Diesel

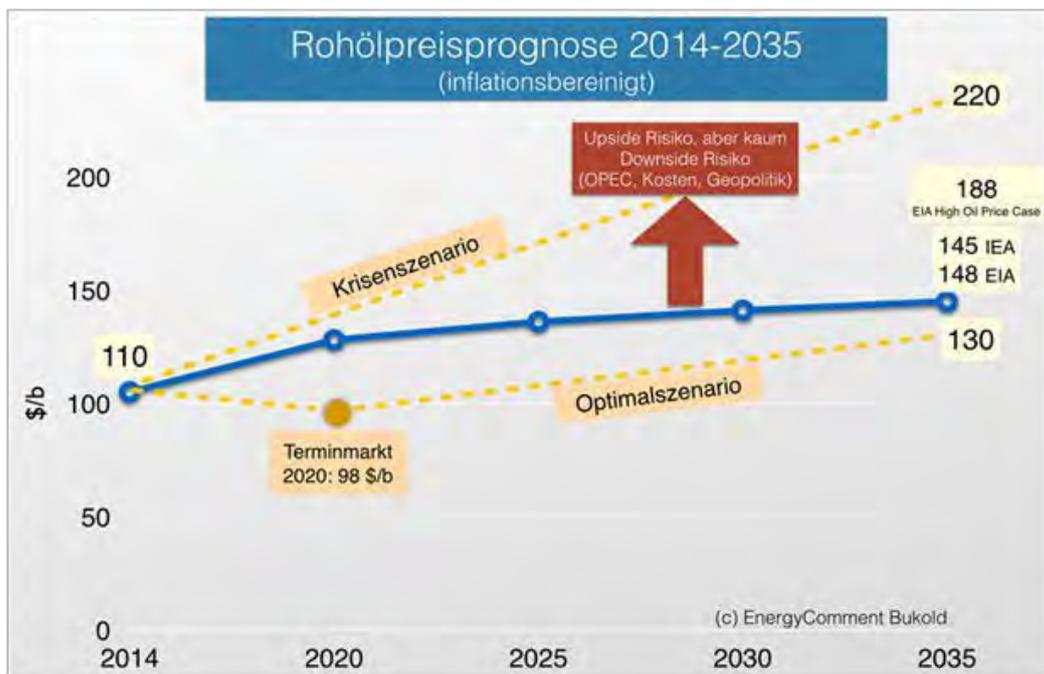
Die **Preise** für Rohöl und damit auch Dieselmotorkraftstoffe sind in der Vergangenheit steil gestiegen. Auch in den kommenden Jahrzehnten ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass sich der Preisanstieg fortsetzt, selbst in einem ruhigen ökonomischen und politischen Umfeld, denn die Stabilisierung der globalen Ölversorgung wird immer aufwendiger, teurer und fragiler.

Hinzu kommen enorme **Preisrisiken**, die sich aus der Gefährdung und Verknappung der Rohölversorgung, der Raffineriekrise in Europa, der vollständigen Importabhängigkeit, der Klimapolitik und der Wechselkursentwicklung ergeben.

Diese Risiken werden bei den meisten einschlägigen Studien ausgeblendet. Doch schon ein kurzer Blick zurück auf die letzten 10 Jahre zeigt, wie häufig unerwartete Ereignisse eingetreten sind. Der Aspekt zukünftiger Preisrisiken ist daher neben dem aktuellen Preisniveau ein wichtiges Kriterium bei der Bewertung von Technologiepfaden im Straßengüterverkehr.

Die folgende Abbildung 3-24 zeigt den asymmetrischen Preiskorridor für Rohöl bzw. Dieselmotorkraftstoff: Ein plötzlicher Preisanstieg ist jederzeit möglich, ein Preisrückgang ist hingegen unwahrscheinlich.

Abbildung 3-24: Rohölpreisprognose



Quelle: EnergyComment

3.1.5 Alternative Kraftstoffe und Energieträger

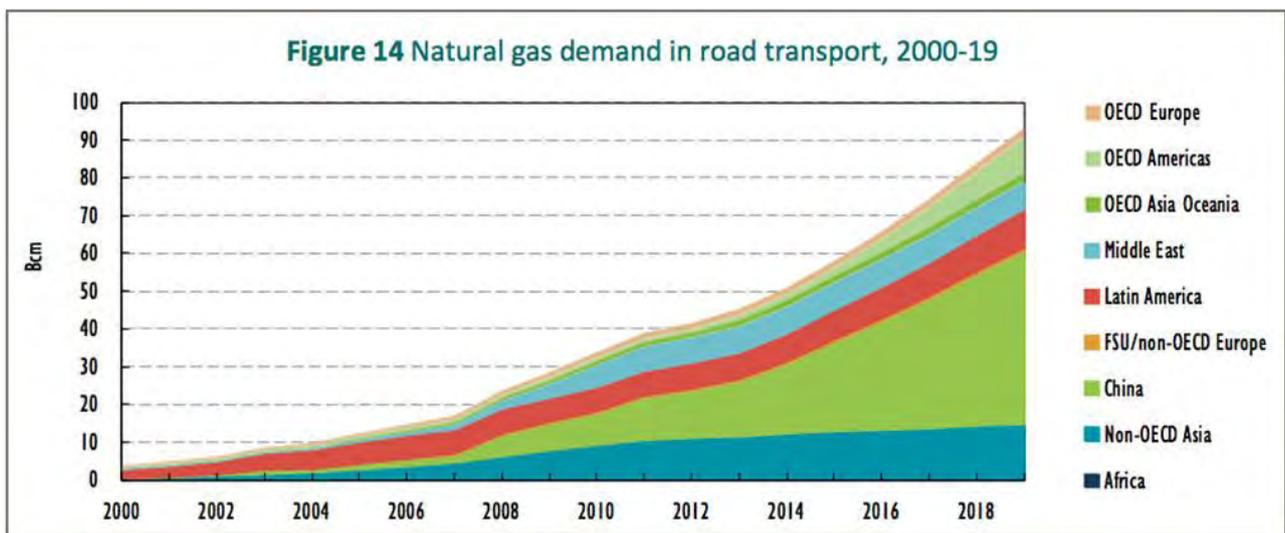
3.1.5.1 Erdgas

Erdgas ist derzeit die wichtigste Alternative zu Diesel und Benzin im Straßengüterverkehr. Millionen kleiner Nutzfahrzeuge sind in Südasien, Osteuropa und Lateinamerika bereits im Einsatz. Dabei handelt es sich fast ausnahmslos um komprimiertes Erdgas (CNG). Der Einsatz von verflüssigtem Erdgas (LNG) ist selten, gewinnt aber an Bedeutung.

In den großen Märkten USA, China und Russland gibt es derzeit starke Bestrebungen, CNG und LNG auch im Straßengüterverkehr zu etablieren. Immer mehr Nutzfahrzeuge und Busse werden bereits mit für CNG und LNG optimierten Antrieben ausgeliefert. Neben dem Straßenverkehr gilt dies auch für den Schiffsverkehr. Selbst Pilotprojekte für LNG-Lokomotiven laufen bereits, um Diesellokomotiven mit ihren höheren Kraftstoffkosten zu ersetzen.

Der Anteil von Erdgas im Kraftstoffmix des globalen Verkehrs liegt bei 1,8 %. Die IEA erwartet angesichts der dynamischen Entwicklung in China einen steilen Anstieg auf 3,4 % bis 2019. In China sind bereits 1,5 Mio. Fahrzeuge mit Erdgasantrieb auf den Straßen. Es gab Ende 2012 landesweit 3014 CNG-Tankstellen und 600 LNG-Tankstellen. Die Zahl der LNG-Fahrzeuge verdoppelte sich 2012 auf 80.000. Allerdings kann das angesichts der noch hohen Kosten in der LNG-Kette nur mit staatlicher Unterstützung gelingen. Daher sind 80 % aller LNG-Fahrzeuge Busse, der Rest v.a. Taxis und Nutzfahrzeuge.

Abbildung 3-25: Erdgas im Straßenverkehr 2000-2019



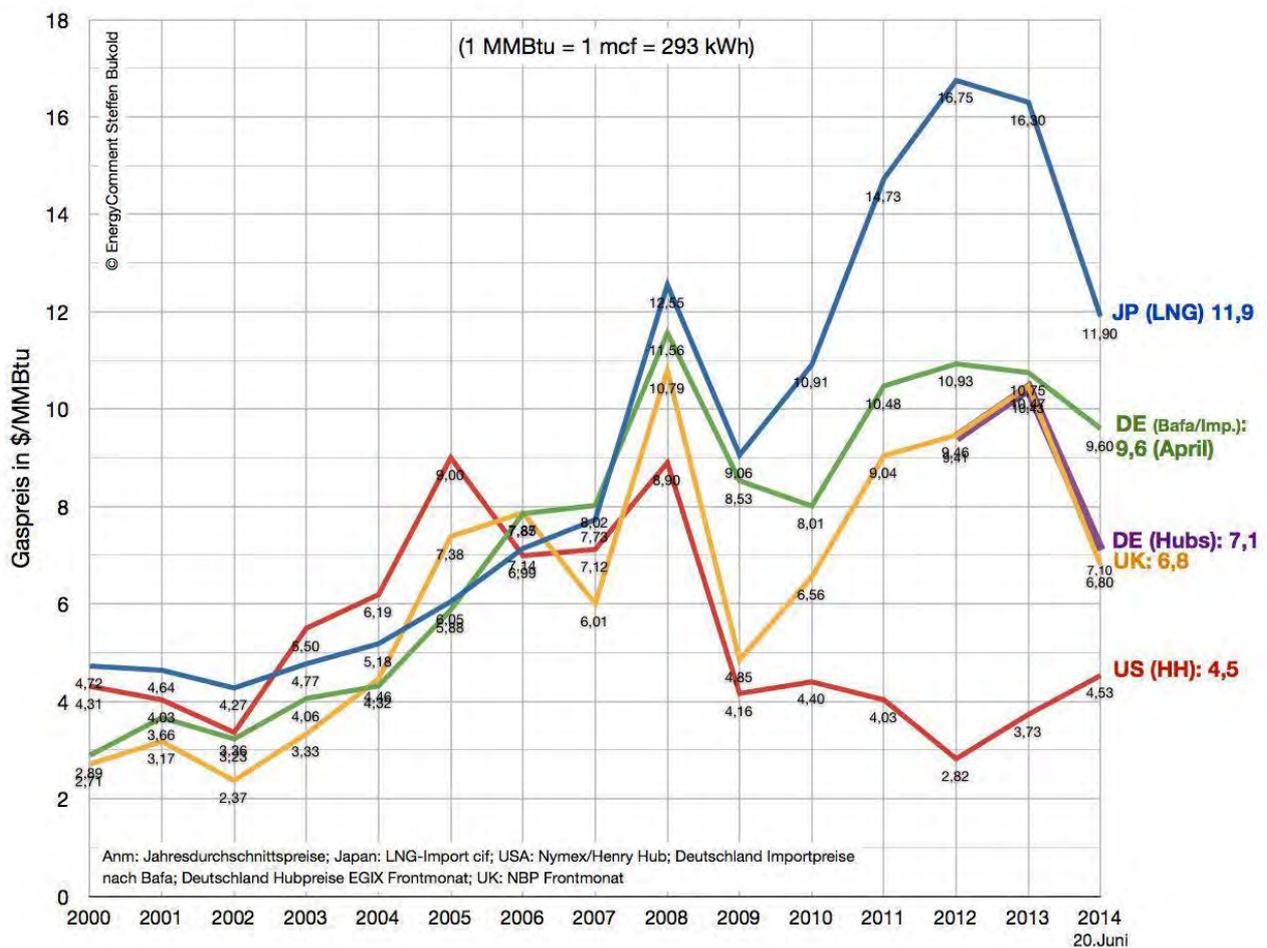
Quelle: IEA: Medium-Term Gas Market Report 2014

Die Erdgaspreise werden weltweit entweder aus Ölpreisen abgeleitet (Ölindexierung), ergeben sich relativ frei auf einem Wettbewerbsmarkt (Gas-to-Gas Competition) oder enthalten beide Komponenten in unterschiedlichen Mischformen. In Westeuropa ist der Preismechanismus für Erdgas seit einigen Jahren im Umbruch: Die Dominanz der Ölindexierung mit ihren langfristigen Lieferverträgen wurde gebrochen. In

weitgehend liberalisierten Marktgebieten ermitteln Gaspreishubs täglich in einem Wettbewerbsmarkt die Erdgaspreise aus Angebot und Nachfrage. Im diesem Jahr (2014) liegen diese Hubpreise weit unter den ölexportierten Gaspreisen, was Nachverhandlungen der Importierenden mit Gazprom und Statoil auslöste.

Der Preistrend und die Versorgungslage ist bei Erdgas deutlich günstiger als bei Erdöl, aber es gibt weltweit starke regionale Preisunterschiede, wie die folgende Übersicht zeigt. Die Gaspreise in Westeuropa sind in diesem Jahr stark gefallen, was auf die schwache Nachfrage und ein gutes Angebot zurückzuführen ist. Der enorme Preisvorteil der USA gegenüber Europa von 7 \$/MMBtu^u im Jahr 2012 ist im Moment auf nur noch 2-2,5 \$/MMBtu geschrumpft.

Abbildung 3-26: Internationale Gaspreise 2000-2014 (Jahresdurchschnittspreise; 2014 bis 20. Juni)

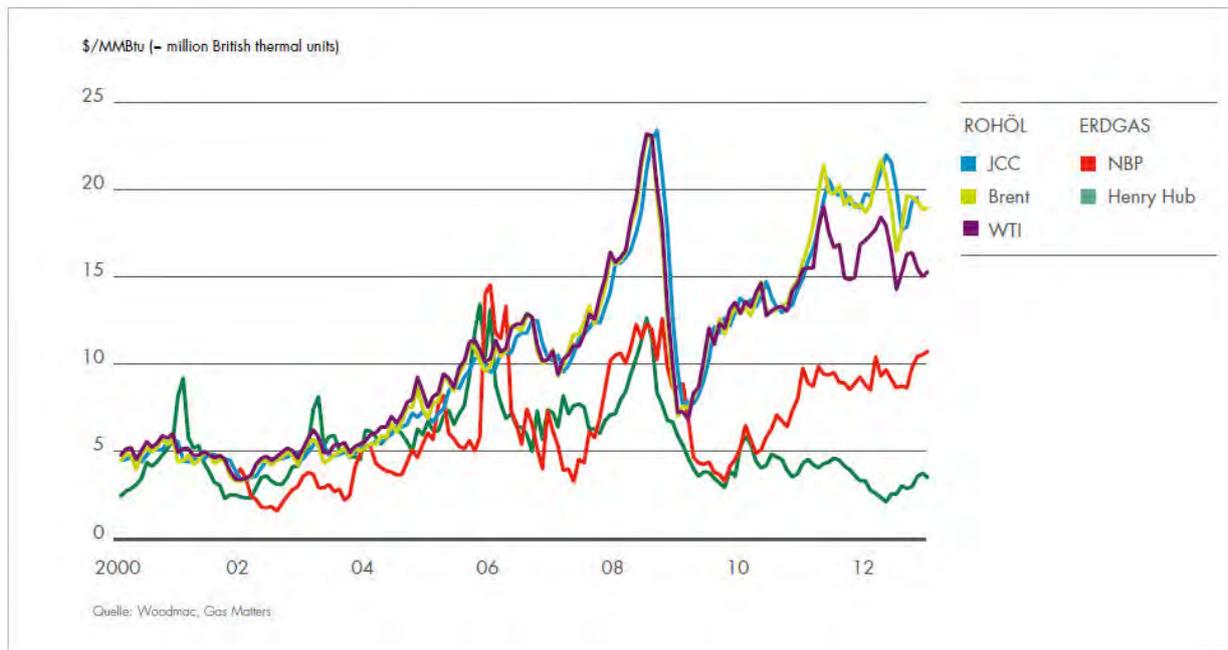


Quelle: EnergyComment: Global Energy Briefing Nr.100 Juni 2014

Ein Vergleich der Öl- und Gaspreise zeigt, dass für Energie aus Öl (in \$/MMBtu) seit 2010 deutlich mehr gezahlt werden muss als für Energie aus Erdgas. Alle Prognosen erwarten, dass diese Preisschere auch in den kommenden Jahrzehnten Bestand haben wird.

^u MMBtu = Million British thermal unit

Abbildung 3-27: Preisvergleich Öl-Gas bei gleichem Energieinhalt



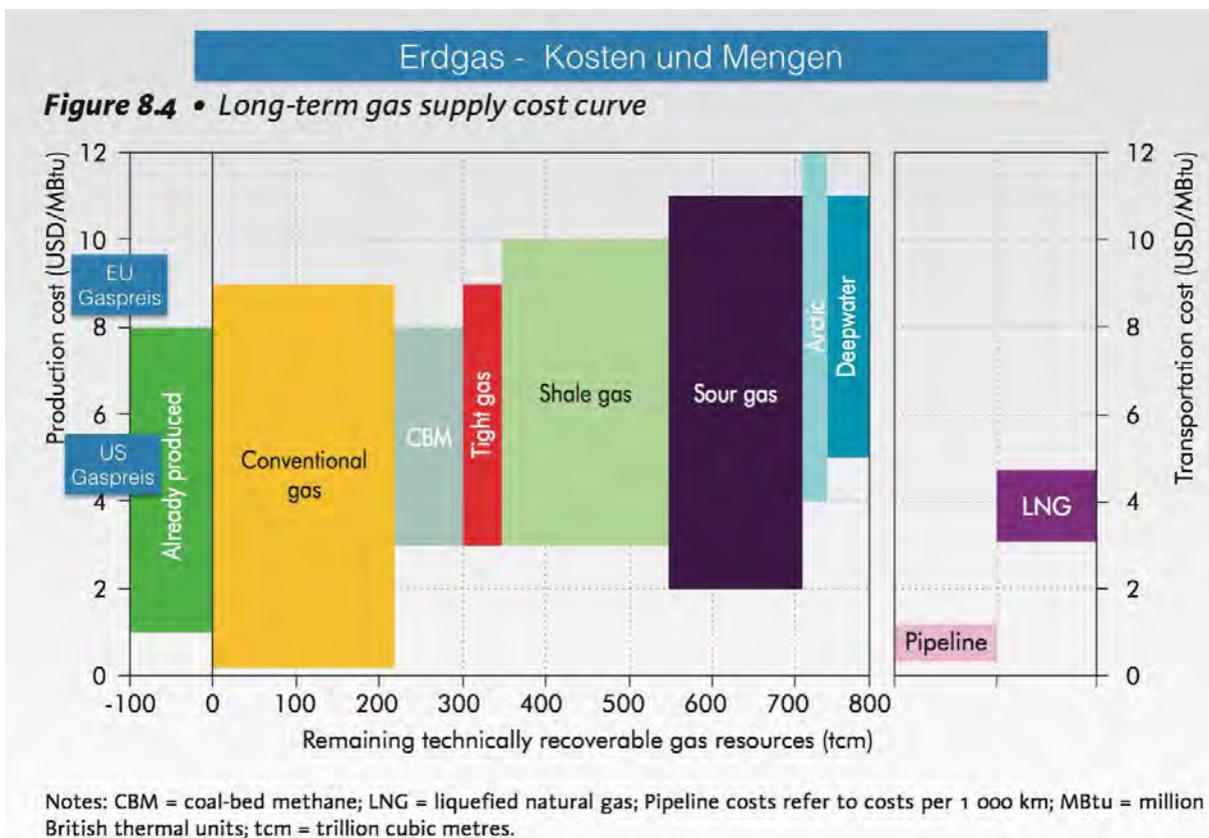
Quelle: Shell 2013

Von der Kostenseite ist bei Erdgas kaum Druck zu erwarten. Bislang wurde nur ein kleiner Teil der bekannten Erdgasressourcen verbraucht (vgl. nächste Abbildung 3-28, dunkelgrünes Segment). Selbst bei konventionellem Erdgas stehen noch enorme Ressourcen zu niedrigen Kosten zur Verfügung. Anders als bei Rohöl gibt es im Gasmarkt kein weltweites Preiskartell, das den Marktpreis stabilisieren könnte. Daher werden zuerst die kostengünstigsten Vorkommen erschlossen.

Neben den konventionellen Vorkommen gibt es mehrere Typen von nicht-konventionellen Gasvorkommen, die zum allergrößten Teil zu Kosten weit unter dem aktuellen Erdgaspreis gefördert werden könnten. Addiert man jedoch die nicht unerheblichen Transportkosten bei LNG (Flüssiggas), dann wäre ein leichter Anstieg der Preise in Europa von derzeit 9,5 auf 11,5 \$/MMBtu denkbar.

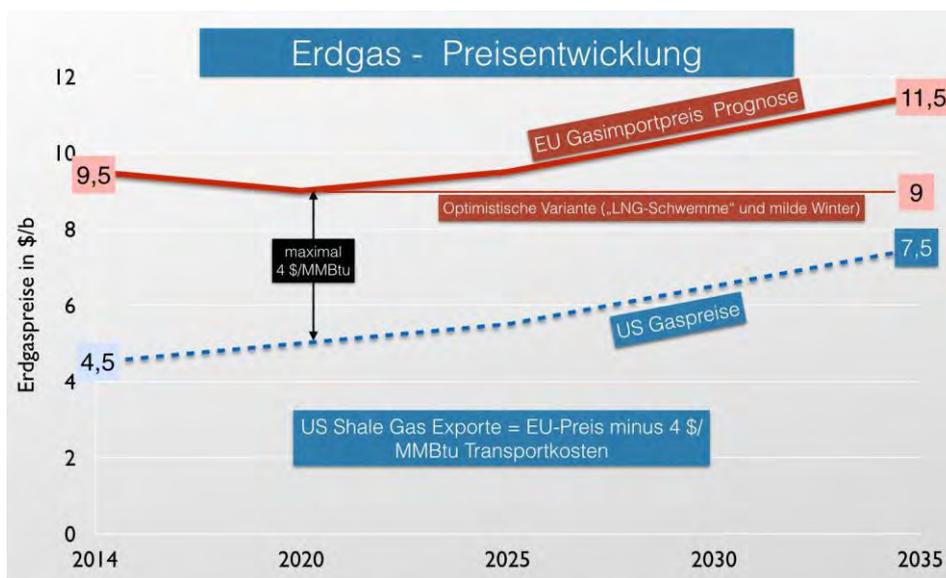
Ein höherer Erdgaspreis erscheint auch deshalb unwahrscheinlich, weil das Preisniveau in den USA wegen der großen Schiefergasvorkommen in den kommenden Jahrzehnten nur bis 7,5 \$/MMBtu (inflationsbereinigt) anziehen sollte. Wenn der Abstand zum europäischen Preisniveau auf mehr als 4 \$/MMBtu expandiert, kommt es automatisch zu LNG-Exporten aus den USA, um diese Arbitrage-Gelegenheit zu nutzen. Die europäischen Gaspreise werden sich nach dieser Prognose im Schnitt nicht über 11,5 \$/MMBtu hinaus bewegen. Sollte es wiederholt zu milden Wintern als Folge der globalen Klimaerwärmung kommen und sollte der Ausbau der LNG-Exportterminals wie geplant weiter gehen, dann wäre sogar ein langfristig stabiler Durchschnittspreis für Erdgas von 9 \$/MMBtu wahrscheinlich.

Abbildung 3-28: Erdgas - Kosten und Ressourcen



Quelle: IEA: Resources to Reserves, Paris 2013

Abbildung 3-29: Erdgaspreisprognose



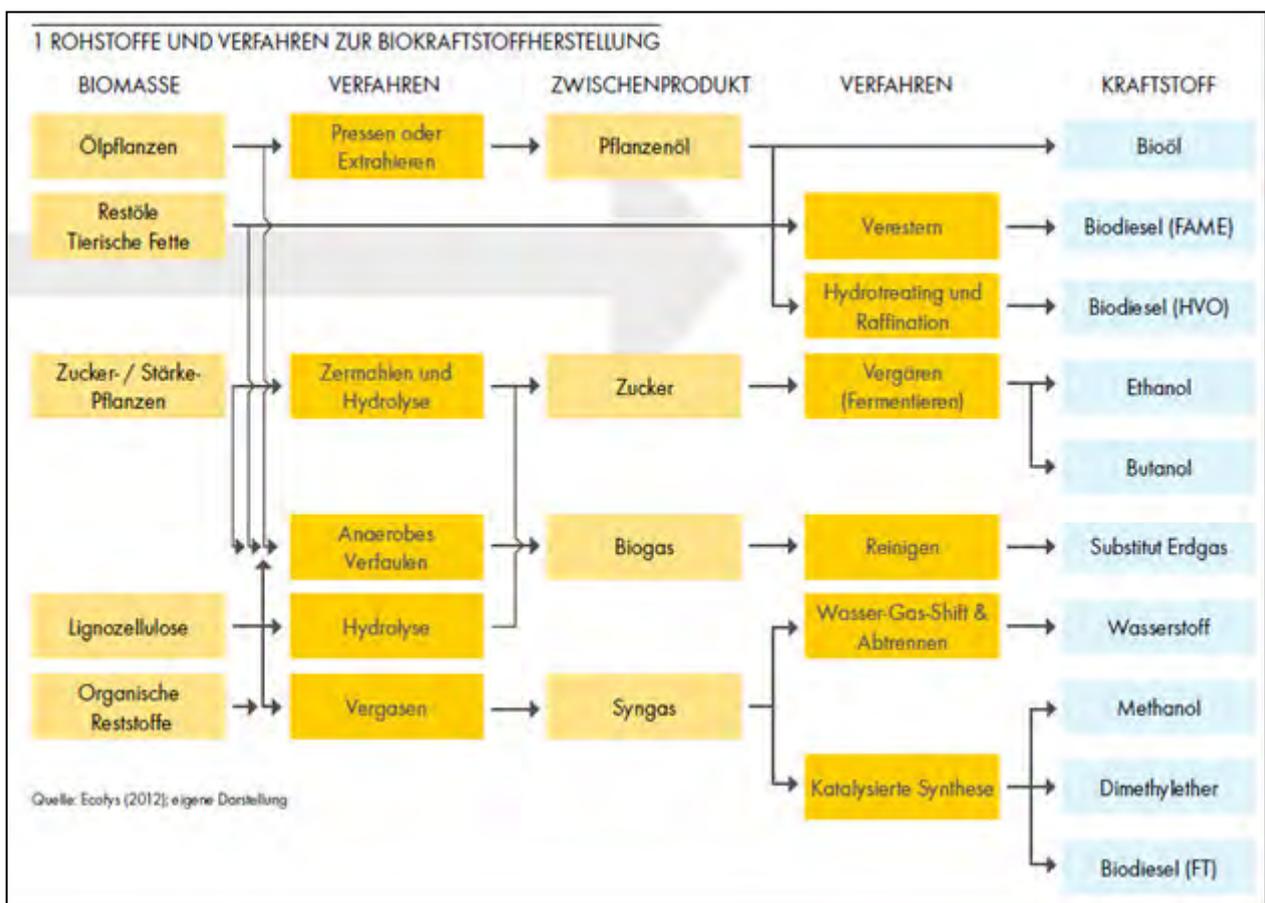
Quelle: EnergyComment

Die relativ entspannte Versorgungssituation bei Erdgas würde jedoch an ihre Grenzen stoßen, wenn es zu einem raschen und massiven Umsteigen von Diesel/Benzin auf Erdgas käme. Wenn z.B. ab jetzt 10 % der Neufahrzeuge weltweit Erdgasantriebe nutzen sollten, würde die Erdgas-Fahrzeugflotte bis 2035 auf 190 Mio. Fahrzeuge anwachsen. Das würde einerseits den Ölmarkt massiv um 5,7 Mio. Barrel pro Tag entlasten (etwa 5 % der Nachfrage), aber andererseits den Erdgasmarkt mit 381 Mrd. Kubikmeter belasten (SHELL, 2012). Das entspricht etwa 10 % des heutigen globalen Erdgasverbrauchs und würde angesichts dieser Dimension nicht ohne Folgen für die Erdgaspreise bleiben.

3.1.5.2 Biokraftstoffe

In Biokraftstoffen dient Biomasse unterschiedlicher Art als Feedstock für die Herstellung von Biodiesel, Bioethanol und motorentauglichem Pflanzenöl. Die erste Generation dieser Kraftstoffe, die quantitativ bis heute dominiert, verwendet Pflanzenfrüchte (Raps, Mais, Zuckerrohr etc.) und tritt damit in direkte Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion („Tank oder Teller“). Die zweite Generation („Advanced Biofuels“), die bislang nur eine Marktnische besetzt, kann auch die übrigen Pflanzenteile verwenden, also Stroh oder Zellulose, oder sie setzt auf spezielle „Energiepflanzen“, zumeist schnell wachsende Gräser.

Abbildung 3-30: Biokraftstoffe - Rohstoffe und Verfahren



Quelle: IINAS/IFEU/SHELL 2012

Bis Mitte des letzten Jahrzehnts galten Biokraftstoffe als der neue Hoffnungsträger der globalen Kraftstoffversorgung. Das hat sich allerdings in den letzten Jahren geändert. Die politische Unterstützung hat einer breiten Skepsis Platz gemacht, so dass die Branche mit weiteren Investitionen abwartet:

- Die Kosten der Herstellung fallen nicht ausreichend schnell, so dass außerhalb Brasiliens staatliche Subventionen oder Steuervorteile entscheidend bleiben. In Brasilien erschweren die staatlich fixierten Benzinpreise die Vermarktungschancen für Zuckerrohr-Ethanol.
- Biokraftstoffe verschlingen in wichtigen Produktionsländern mittlerweile einen so großen Anteil der Ernte (z.B. 40 % der amerikanischen Maisernte), dass ethische Aspekte und Nutzungskonflikte (Tierfutter, Nahrungsmittel) in den Vordergrund treten.
- Der klimapolitische Nutzen bei Biokraftstoffen der 1. Generation bleibt umstritten. Der Energieeinsatz beim Anbau, bei der Ernte und bei der Weiterverarbeitung ist so hoch, dass der Nettoeffekt gegenüber Mineralöl nach Meinung vieler Fachleute gegen Null tendiert oder sogar negativ ist.
- Eine weitere Erhöhung der Beimischungsanteile von Bioethanol im Benzin stößt sowohl in der EU als auch in den USA auf politische, ökologische und technische Vorbehalte.

Die optimistischen Mengenprognosen werden daher regelmäßig zurückgenommen. Im Moment wird erwartet, dass die Produktion von Biokraftstoffen von 1,9 mb/d^v (2013) auf 2,3 mb/d (2019) steigen könnte, davon knapp 1,8 mb/d Bioethanol und knapp 0,6 mb/d Biodiesel. Dabei ist zu beachten, dass 3 l Bioethanol nur 2 l Benzin ersetzen können, da der Energieinhalt geringer ist.

Die Produktion von Biokraftstoffen der 2. Generation („Advanced Biofuels“) ist nach wie vor sehr gering. Die Kapazitäten liegen bei rund 0,03 mb/d, aber zahlreiche operative Probleme verhindern eine hohe Auslastung der Anlagen. Falls alle geplanten Anlagen verwirklicht werden, könnten die Kapazitäten bis 2019 auf 0,07 mb/d anwachsen. Die unsichere politische Situation in der Kraftstoffpolitik in den USA und Europa lässt jedoch immer mehr Investoren zögern.

Insgesamt sieht es in Europa so aus, dass die heimisch erzeugten Biokraftstoffmengen nicht mehr steigen werden: Zusätzliche Biokraftstoffe der ersten Generation sind politisch unerwünscht, während Biokraftstoffe der zweiten Generation zu teuer sind, um Investitionen anzuziehen.

^v mb/d = Millionen Fass pro Tag; zum Vergleich: weltweit werden täglich 91 mb/d verbraucht.

Abbildung 3-31: Prognose der Biokraftstoffproduktion - absolut und in Öläquivalenten

Figure 2.46 World biofuel production 2013-19

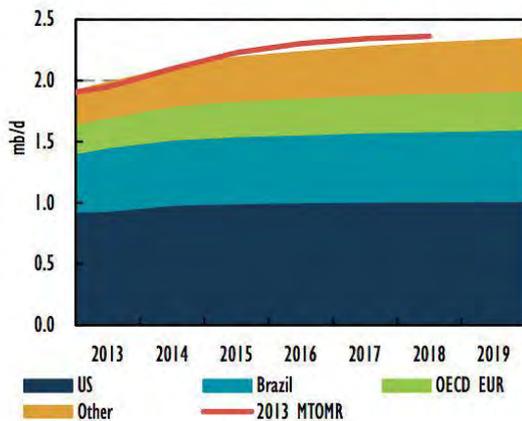
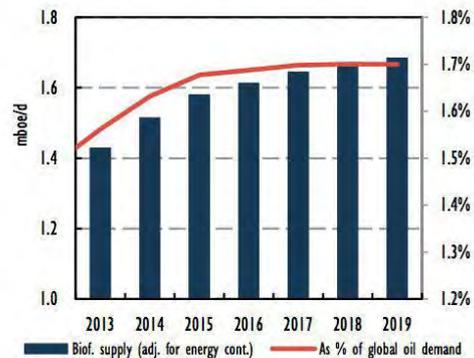


Figure 2.47 World biofuel production adjusted for energy content as share of global oil demand



Quelle: IEA: Medium-Term Oil Market Report, 2014

Auch durch die Kostenseite ist das Einsatzpotenzial der Biokraftstoffe begrenzt. Alle Studien kommen zu dem Ergebnis, dass nur Zuckerrohr-Ethanol in Brasilien auf der Kostenseite mit fossilem Benzin mithalten kann. Aber selbst dort steigen die Kosten in letzter Zeit kräftig an. Hohe Zuckerpreise oder Missernten sorgen zusätzlich immer wieder dafür, dass das Ethanolangebot zurückgeht.

Für alle anderen Biokraftstoffe der ersten Generation gilt, dass sie sich nur durch staatlich festgelegte Beimischungsquoten und/oder Subventionen auf dem Markt behaupten können. Die Kosten für die Produktion von Biodiesel liegen ohne Subventionen in Europa oder den USA durchwegs im Bereich von 1,2-1,5 \$/l (1,3-1,7 \$/Dieseläquivalente), während der Großhandelspreis für einen Liter Diesel (ULSD) bei etwa 0,8 \$/l liegt. Bei Bioethanol sind die Preisverhältnisse ähnlich.^w

Ein häufig unterschätzter Faktor ist die hohe Korrelation der Biokraftstoffpreise mit den fossilen Ölpreisen. Sie beeinflussen direkt oder indirekt das Kostenniveau anderer Kraftstoffe.^x Das gilt insbesondere für Biokraftstoffe, wo Öl als Dünger, Pestizid, oder Kraftstoff für den Anbau, die Ernte bzw. die Sammlung (Forstabfälle) der Biomasse zum Einsatz kommt. Auch beim nationalen oder internationalen Transport der Biomasse stellen die Transportkosten, und damit der Ölpreis, einen wichtigen Faktor dar. Energiepolitisch bedeutet das, dass eine Versorgung mit Biokraftstoffen nur bedingt vor den Risiken der fossilen Rohölversorgung schützen kann.

^w Vgl. hierzu auch die Abbildung oben „Steigen die Kosten für Öl“.

^x Vgl. hierzu ausführlich IEA: Production Costs of Alternative Transportation Fuels. Influence of Crude Oil Price and Technology Maturity, Paris 2013.

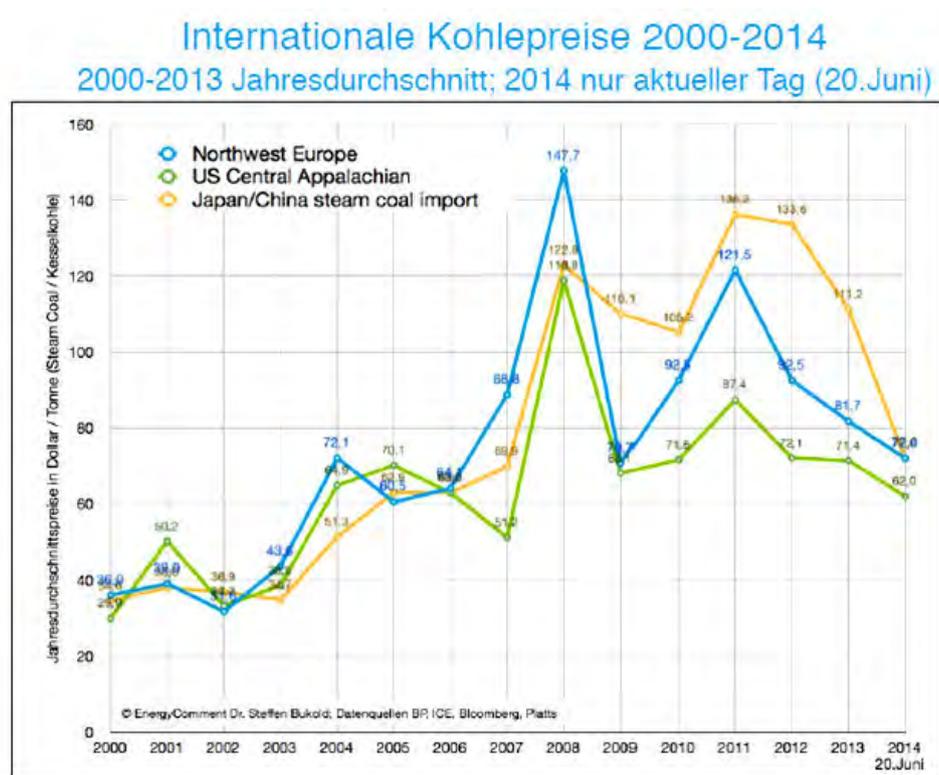
3.1.5.3 Kohle

Kohlepreise sind über verschiedene technologische Pfade für den Kraftstoffmarkt relevant:

- als Primärenergie für die Stromproduktion und damit für die Elektromobilität.
- als Feedstock für CTL-Anlagen (Coal-to-Liquids) und damit für synthetischen Diesel.
- als Primärenergie für die Herstellung von Wasserstoff für Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren

Bei den Steinkohleimporten ist nur ein geringer Preisdruck zu erwarten, da die Reserven- und Ressourcenlage in diesem Jahrhundert keine Knappheitspreise erwarten lässt. Die folgende Abbildung 3-32 zeigt für die globalen Steinkohlereserven, dass über 600 Mrd. Tonnen auf einem mit dem heutigen Niveau vergleichbaren Kostenniveau gefördert werden könnten. Diese Mengen ließen sich durch intensivere Explorationstätigkeiten, auf die momentan wegen der guten Reservenlage verzichtet wird, problemlos ausweiten.

Abbildung 3-32: Internationale Kohlepreise



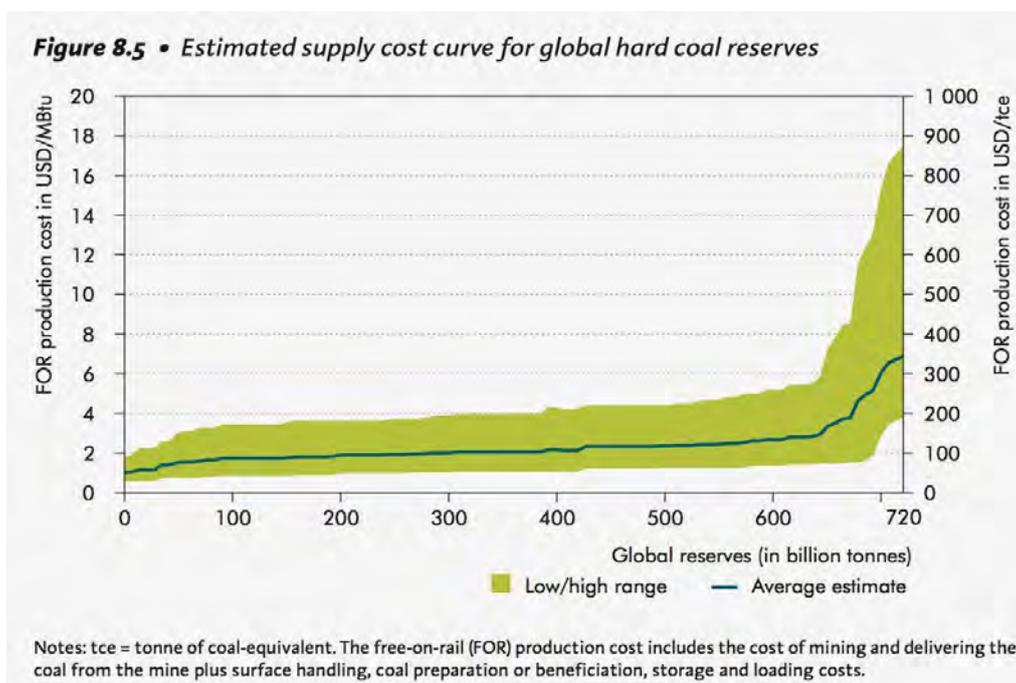
Quelle: EnergyComment: Global Energy Briefing Nr.100 Juni 2014

Neben den bekannten Steinkohlereserven von 728 Mrd. t gibt es ca. 17.204 Mrd. t an Steinkohleressourcen. Hinzu kommt die Braunkohle mit 276 Mrd. t Reserven und ca. 4.154 Mrd. t Ressourcen. Zum Vergleich: Der jährliche globale Kohleverbrauch liegt bei etwa 8 Mrd. t.

Noch besser sieht es auf der Preisseite aus: Die internationalen Steinkohlepreise haben in den letzten drei Jahren um 40 % nachgegeben, ohne dass eine Trendwende nach oben in Sicht wäre.^y

Zwar wächst die Kohlenachfrage in Südasien (auch wegen der niedrigen Preise) wohl noch über längere Zeit kräftig an. Auch in Europa kann Kohle im Moment Erdgas im Strommarkt verdrängen. Aber die energiepolitischen Weichenstellungen in den Hauptmärkten deuten auf eine entspannte Versorgungssituation: Der „War on Pollution“ in China führt schon in wenigen Jahren zu einer Deckelung der Kohlenachfrage, was tendenziell zu weitaus geringeren Kohleimporten führen wird, als bislang erwartet wurde. In den USA wird der aktuelle Clean Power Plan neben den neuen Schadstoffgrenzen (MATS) die Schrumpfung der Kohlenachfrage weiter beschleunigen.

Abbildung 3-33: Marginale Kosten für das globale Kohleangebot



Quelle: IEA: Resources to Reserves 2013

3.1.5.4 Strom

Strom kann aus unterschiedlichen Energieträgern bzw. Energiequellen gewonnen werden: Kohle, Gas, Öl, Biomasse/Müll, Nuklearenergie, Wasserkraft, Photovoltaik und Windenergie decken 99 % der Weltstromerzeugung ab. Der Wirkungsgrad der zur Stromproduktion eingesetzten Anlagen wächst, wenn auch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit: In der Wind- und Solarenergie ist die technologische Entwicklung noch lange nicht ausgereizt, während sie bei den Kohle- und Gaskraftwerken immerhin noch in kleinen Schritten vorankommt.

^y Noch niedriger sind die Preise im Inland, so z.B. die US Minemouth Kohlepreise, die im allgemeinen bei unter 1 ct/kWh liegen.

Die steigenden Strompreise für EndverbraucherInnen sollten daher nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Kosten tendenziell fallen: Die Photovoltaik (PV) wird in großen Sprüngen billiger, die Windenergie (onshore) unterbietet an guten Standorten mit 5-6 ct/kWh bereits die Gaskraftwerke. Die Gaspreise selbst fallen seit zwei Jahren (s.o.). Die internationalen Steinkohlepreise haben sogar um 40 % nachgegeben (s.o.). Vieles deutet darauf hin, dass die Gas- und Kohlepreise auch weiterhin niedrig bleiben, während sie bei PV und Wind weiter fallen und bei der Wasserkraft stabil bleiben. Die Strompreise könnten also in den Industrieländern langfristig stabil bleiben, wenn nicht sogar sinken.^z

Ein wachsender Anteil fluktuierender Stromerzeuger (Wind, Sonne) wird zwangsläufig zu differenzierten Stromtarifen führen, von denen auch die Elektromobilität profitieren wird. Die „Betankung“ der Batterien oder geeigneter Zwischenspeicher erfolgt dann, wenn eine hohe Einspeisung von Windturbinen und PV-Anlagen einen Stromüberschuss erzeugt.

Bislang wird Strom als Antriebsenergie im Straßengüterverkehr v.a. als Hybridlösung oder bestenfalls für innerstädtische Lieferfahrzeuge auf festen Routen (z.B. Paketdienste) diskutiert.

Aber auch im schweren Lkw-Verkehr gibt es Potenziale. Zum einen als Hybridlösung für innerstädtische Teilrouten oder zur Stromversorgung im Standbetrieb, z.B. für Fracht, die dauerhaft gekühlt werden muss.

Im Fernverkehr sind batteriegetriebene Fahrzeuge wegen des hohen Gewichts der Batterien unattraktiv, allerdings ist eine Versorgung auf besonders stark frequentierten oder besonders sensiblen Routen via Induktionsspannung (unter der Fahrbahnoberfläche verlegte Kabel) oder Oberleitungen technisch durchaus möglich. Eine überschlägige Berechnung der Projektkosten zeigt, dass bei stärker frequentierten Lkw-Routen die Kraftstoffkosten und selbst die Total Costs des Fuhrunternehmers deutlich gesenkt werden könnten.^{aa} Die dafür notwendigen Strommengen halten sich in Grenzen (PROKOP G., STOLLER A., 2012).

^z Das gilt sogar, wenn das Strompreinsniveau schon heute deutlich niedriger ist als in Europa, also insbesondere in den USA: Der EIA AEO 2014 Table CP4 erwartet einen Anstieg der Strompreise von 2012-2040 von 9,8 US-ct/kWh auf lediglich 11,1 ct/kWh, bei Industriestrompreisen von 6,7 auf 8,1 US-ct/kWh über einen Zeitraum von 28 Jahren. Quelle: EIA: Annual Energy Outlook 2014, Wash. 2014.

^{aa} IEA: Energy Technology Perspectives 2014, Harnessing Electricity's Potential, Paris 2014. „Using a USD 2.5 million/km infrastructure cost assumption for catenary HFT, a government might invest, looking to cover only capital costs. Assuming an infrastructure lifetime of 35 years, an equal lifetime for vehicles, and a real interest rate on government loans of 6 % (conservative assumption), an annuity is needed of USD 170 000/km. Assuming a daily total traffic of 4 400 trucks, this equals about 1 600 000 trucks per year. If each truck pays a fee of USD 0.11/km, this would cover the annuity. Higher frequency would lead to lower fees. From a vehicle payback perspective this means the following:

diesel fuel cost = USD 0.47/km

electricity cost = USD 0.24/km

electricity cost plus infrastructure fee = USD 0.35/km

the net saving per travelled kilometre thus = USD 0.12/km.

Assuming that a HFT has an annual mileage of 140 000 km per year, this delivers savings of USD 16 800 per year. Adding in the lower maintenance cost (diesel maintenance cost – electric maintenance cost = USD 13 572 – USD 3 878 = USD 9 694) yields a total annual saving of USD 26 494 per travelled kilometre. In this case, the approximately USD 70 000 (USD 2.5 million per km/35 years of lifetime) additional cost of a catenary HFT compared with a reference diesel vehicle can be paid back in about 2.5 years.“

3.1.6 Fazit: Bewertungsmatrix

Im Folgenden werden Dieselkraftstoffe und die alternativen Lösungen unter mehreren Gesichtspunkten verglichen. Dabei steht ein Kriterium aufgrund der Aufgabenstellung dieses Arbeitspakets im Vordergrund: Die Entwicklung der Kosten der Antriebsenergie bzw. der Kraftstoffe. Dazu gehören auch Kostenrisiken, etwa das Risiko von Knappheitspreisen bei Versorgungskrisen.

3.1.6.1 Methodische Vorbemerkungen

1. Die Kosten werden vor Steuern im Verbraucherland betrachtet, allerdings inklusive der Steuern und Abgaben im Produzentenland, wenn es sich um Importe handelt. Es werden also die vollen Importkosten bei Einfuhren bzw. die vollen Produktionskosten vor Steuern bei inländischer Produktion betrachtet. Dieses Vorgehen erscheint aus mehrererlei Hinsicht vorteilhaft:

- Zum einen ist die steuerliche Begünstigung von Diesel-Alternativen fiskalisch nur so lange tragbar, wie die Alternativen in Marktnischen bleiben. Sobald sie größere Marktanteile erreicht haben, entfällt die Begründung für eine steuerliche Bevorzugung und steigt die fiskalische Belastung durch Steuerausfälle.
- Zum anderen bewirken Steuern im Prinzip lediglich eine Umverteilung von Einkommen, belasten also an der einen Stelle und entlasten an der anderen. Sie verändern aber nicht die gesamtwirtschaftlichen Faktorkosten bzw. die Importkosten, solange sie sich im vernünftigen Rahmen bewegen, also keine volkswirtschaftlichen Verwerfungen verursachen.

2. Der weit verbreitete Kostenvergleich auf kWh oder MJ-Basis zwischen Diesel und alternativen Energieträgern ist zwar ein interessanter Indikator, für die Kostenanalyse aber letztlich irrelevant. Entscheidend ist die Antriebsenergie bzw. der Energieaufwand je Fahrzeugkilometer. Hier fließt der Wirkungsgrad der Motoren mit ein, der bei Elektromotoren mit 80 % weitaus höher liegt als bei Dieselmotoren mit 30-40 %.

3. Wasserstoff wird nicht als eigenständiger Kraftstoff oder Antriebsenergie untersucht, da er lediglich als Energiezwischenspeicher verwendet wird, sei es in Verbrennungsmotoren oder in Brennstoffzellen. Seine variablen Kosten variieren mit der eingesetzten Primärenergie. Insofern ist es sinnvoller, sich auf die Kostenentwicklung der Primärenergie zu konzentrieren.

4. LPG (Liquefied Petroleum Gas, „Autogas“) ist eine Mischung aus Butan und Propan. Es wird aus Erdöl oder aus Erdgas gewonnen. In Europa kommt es ganz überwiegend als Nebenprodukt der Erdölraffinerien auf den Markt. Es liefert hier 3 % der Kraftstoffe und treibt 9 % der Fahrzeuge an. Die Preisentwicklung und die Versorgungslage sind in Europa direkt oder indirekt an andere Ölprodukte gekoppelt, so dass LPG unter Kostengesichtspunkten zusammen mit Diesel analysiert werden kann. Die Situation ist nur geringfügig besser als bei Diesel, da LPG-Gase auch aus Erdgasfeldern gewonnen werden können. Da die globale Erdgasförderung weiter steigen wird, kann die Versorgung im Prinzip auch auf dem Seeweg mit LPG-Frachtern erfolgen. Allerdings sind die Transportkosten sehr hoch und wären kommerzielles und technisches Neuland.

3.1.6.2 Kostentrends und Kostenrisiken

Die folgende Tabelle verdeutlicht zusammenfassend drei Aspekte der Kostenbetrachtung: Die aktuelle Kostensituation, den langfristigen Kostentrend und schließlich die Kostenrisiken, also eine unerwartete und rasche Abweichung vom Kostentrend.

Darstellung 3-2: Fazit: Kostentrends und Kostenrisiken

	Kostentrend kurz/mittelfristig	Kostentrend langfristig	Kostenrisiken
Öl/Diesel	leicht steigend, teuer <i>Window of Opportunity</i>	stark steigend, teuer	sehr hoch
LPG	wie Öl	etwas besser Öl	hoch
Erdgas CNG LNG	stabil	stabil oder leicht steigend	gering
Kohle	stabil	stabil	gering
Biokraftstoffe 1. Generation	leicht steigend, teuer	leicht steigend, teuer	hoch (Nutzungskonkurrenz)
Biokraftstoffe 2. Generation	stabil, sehr teuer	stabil, sehr teuer	mittel (Ölpreiskorrelation)
Strom	stabil	stabil (im Tagesverlauf fluktuierend)	gering

Quelle: EnergyComment

Bei Öl, und damit auch Diesel, ist kurz- und mittelfristig nur mit leicht steigenden Kosten zu rechnen, langfristig jedoch mit deutlich höheren Preisen und sehr hohen Kostenrisiken. Die Gegenwart stellt deshalb für viele ölarme Länder ein „Window of Opportunity“ und kein Ruhekitzen dar: Die Erfahrung der Jahre 2007 und 2008 hat gezeigt, dass rasch steigende Ölpreise nicht zu einem Kurswechsel in der Kraftstoffpolitik führen können, sondern ganz im Gegenteil zu einem plötzlichen Stillstand, da die enorme plötzliche Kostenbelastung durch hohe Ölpreise die Staatshaushalte vieler Länder und das Investitionsbudget der Unternehmen und Privatpersonen belastet.

Demgegenüber kann bei Erdgas und Kohle auch längerfristig mit stabilen Importpreisen gerechnet werden, wobei allerdings die Kohle (und damit auch CTL) durch eine plötzliche Verschärfung der Klimapolitik in der Zukunft an Attraktivität verlieren könnte.

Die Biokraftstoffe der ersten Generation bleiben mit Ausnahme von Zuckerrohr-Ethanol aus Brasilien teuer. Die Kostenrisiken sind relativ hoch, da die Korrelation mit den Ölpreisen stark ist, und da die Nutzungskonkurrenz der Flächen mit Futter- und Nahrungsmitteln an Bedeutung gewinnt.

Die Biokraftstoffe der zweiten Generation sind auch nach zahlreichen Pilotprojekten und Forschungsanstrengungen weit davon entfernt, auf der Kostenseite mit fossilem Diesel konkurrieren zu können. Viele technische Probleme harren ihrer Lösung, v.a. wenn der Übergang vom kleinen Pilotprojekt zur Anlage im industriellen Maßstab gelingen soll.

Auch bei diesen modernen Biokraftstoffen ist die Ölpreiskorrelation relativ hoch, da die Biomasse, selbst wenn sie aus Energiepflanzen oder Zellulose besteht, aufwendig gesammelt und die Kraftstoffe der Bioraffinerien kleinteilig distribuiert werden müssen. Neben dem Kostenaspekt ist hier auch der Mengenaspekt wichtig: Selbst wenn man die Kosten außer Acht lässt, sind keine Produktionsmengen in Sicht, die in nationaler oder globaler Perspektive nennenswerte Marktanteile abdecken könnten.

Strom als Antriebsenergie ist schon heute auf der Kostenseite attraktiv. Auch längerfristig ist der Kostentrend stabil, eventuell sogar leicht sinkend. Auch sind keine größeren Kostenrisiken in Sicht, da Strom zum einen aus reichlich vorhandenen fossilen Energieträgern und immer mehr auch aus unbegrenzt verfügbaren erneuerbaren Energien gewonnen wird, die technologisch noch große Produktivitätspotenziale haben.

Zusammenfassend bietet die folgende Tabelle einen Überblick über die relevanten Kostenaspekte von Dieselmotoren und alternative Antriebsenergien.

Tabelle 3-1: Fazit: Kosten und Risiken - Diesel vs Alternativen

Primärenergie	Diesel/LPG	Erdgas CNG/LNG	Strom	Biokraftstoffe
Technische Kompatibilität für schwere Lkw	sehr gut (Diesel) gut (LPG)	mittel (CNG) gut (LNG)	sehr schlecht**	gut
Technische Kompatibilität für leichte Nutzfahrzeuge	sehr gut	sehr gut (CNG) schlecht (LNG)	gut	sehr gut
Kosten Kraftstoff/Strom* in Eurocent/kWh***	6	3	4-8	8-10
Wirkungsgrad des Antriebs %	30-45	25-40	80	30-40
Kosten Antriebsenergie - jetzt in Eurocent/kWh	13-20	8-12	5-10	20-33
Kosten Antriebsenergie - langfristig in Eurocent/kWh	stark steigend	stabil	stabil od. fallend	stark steigend
Kostenrisiken	sehr hoch	gering	sehr gering	hoch
Mengenrisiken heute	gering	gering	sehr gering	hoch
Mengenrisiken langfristig	hoch	gering	sehr gering	hoch
Ölpreiskorrelation der Kosten	sehr hoch	gering	sehr gering	hoch

* vor Steuern und vor Distributionskosten

** Ausnahme: Induktionsstrom/Oberleitungen

*** Dieselpreis/LPG-Preis = Großhandelspreis Rotterdam für ULSD und LPG; Gaspreis = Großhandelspreise Westeuropa (NCG); Biokraftstoffe = Produktionskosten laut IEA, Irena; Strom = Großhandelspreis deutsche Strombörse und Marginalkostenanbieter (Gaskraftwerk)

Quelle: EnergyComment

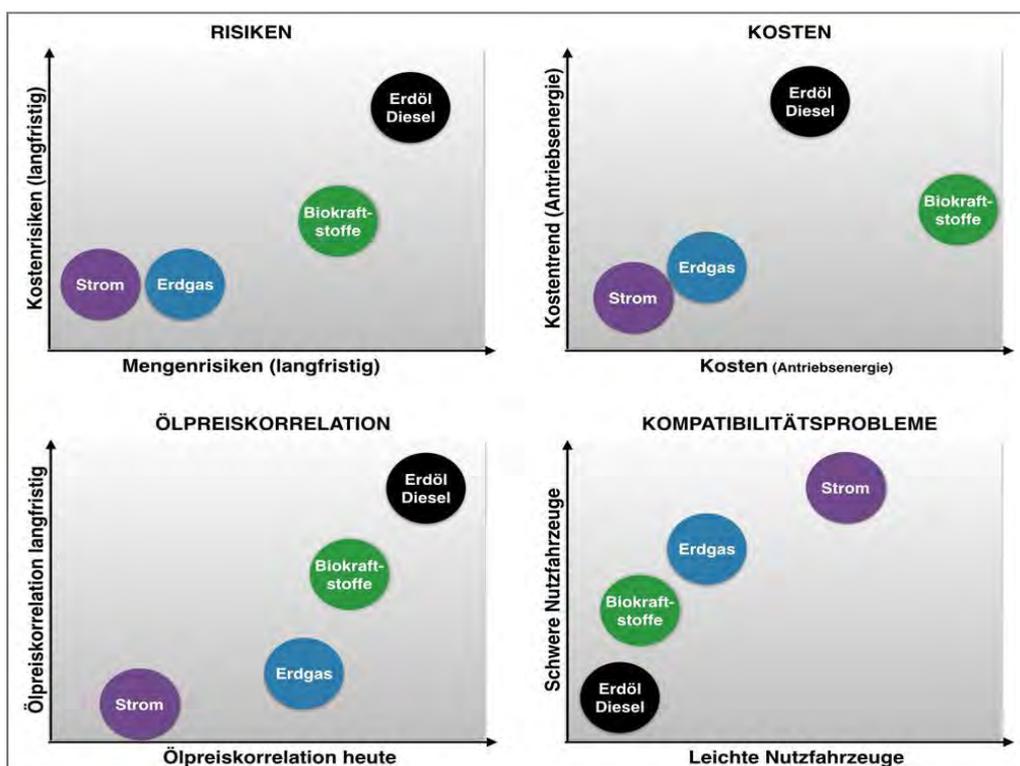
Dieselmotoren und seine Alternativen haben also unterschiedliche Profile, mit jeweiligen Stärken und Schwächen. Bei einem Kostenvergleich der Antriebsenergie schneiden mit Ausnahme der Biokraftstoffe alle Alternativen zum Diesel günstiger ab. Das gilt umso mehr, als der Dieselmotor technisch ausgereift ist, während bei den Alternativen noch Innovationspotenzial vermutet werden kann.^{bb}

Die (nicht zu diesem Kapitel gehörenden) Kosten für die Distribution und Bereitstellung der alternativen Kraftstoffe sind relativ gering, wenn man die langen Abschreibungszeiten der Infrastrukturen und die nach der Marktdurchdringung minimalen Kosten je kWh berücksichtigt, zumal das Erdgasnetz und das Stromnetz in Österreich und vielen anderen Industrieländern bereits relativ engmaschig ist.

Die folgenden vier Abbildungen (s. Darstellung 3-3) verdeutlichen noch einmal die Profile der Antriebsenergien unter verschiedenen Gesichtspunkten: Kosten- und Mengenrisiken, Kosten und Kostentrend, Ölpreiskorrelation und technische Kompatibilitätsprobleme.

In einer abschließenden Bewertung der Antriebsenergien müssen natürlich zahlreiche Gesichtspunkte einfließen, nicht nur die Kosten und Kostenrisiken der Antriebsenergie. In dieser verkürzten Perspektive wird jedoch deutlich, dass Strom und Erdgas ein weitaus günstigeres Profil aufweisen als Biokraftstoffe oder fossiler Diesel.

Darstellung 3-3: Bewertungsmatrix Kraftstoffe/Antriebsenergien



Quelle: EnergyComment

^{bb} Vgl. hierzu ähnlich: Öko-Institut/DLR-IVF/Fraunhofer ISI: Renewability II - Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs, Forschungskennzahl 3710 96 175 UBA-FB 001786/2, Berlin 2012.

Quellenverzeichnis von Kapitel 3.1:

- ADOLF, J. (2013):** Lkw-Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft - Welche Optionen? Wie geht's weiter? BWVL Dialog-Forum 2013 Workshop B, Berlin.
- ADOLF, KNITSCHKY, LISCHKE (2012):** Dicke Luft im Stadtverkehr?, in: Internationales Verkehrswesen (64).
- BAST/IFEU/LBST/FRAUENHOFER ISI/WUPPERTAL INSTITUT (2013):** Überleitung der Ergebnisse aus GermanHy in das Emissionsberechnungsmodell TREMOD, Schlussbericht Teil I, Heidelberg.
- BEE/LBST (2013):** Analyse der Kosten Erneuerbarer Gase, Bochum.
- BMVBS (2013):** Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS), Berlin.
- BMW AG, DAIMLER AG et al (2011):** Ein Portfolio von Antriebssystemen für Europa: Eine faktenbasierte Analyse - Die Rolle von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, Plug-In Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen, o.O.
- CLEAN ENERGY/EVI/IEA (2013):** Global EV Outlook - Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020.
- DENA (2013):** Hintergrundpapier: Energieverbrauch und Energieträger im Straßenverkehr bis 2025.
- DENYS, T. (VITO) (2013):** Alternative Fuels for Road Transport, Helsinki.
- DLR/IFEU/LBST/DBFZ (2012):** Analyse aktueller Szenarien zur Entwicklung des Verkehrs in Deutschland und dessen Umweltwirkungen (MKS Kurzstudie Szenarien), Heidelberg.
- DLR/IFEU/LBST/DBFZ (2013):** CNG und LPG – Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs (MKS Kurzstudie CNG LPG), Heidelberg.
- DLR/IFEU/LBST/DBFZ (2014):** CNG und LPG – LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen, (MKS Kurzstudie LNG), München.
- DLR/IFEU/LBST (2013):** Energie- und umweltpolitischer Kontext sowie regionale und globale Verfügbarkeit von Erdgas und LNG, MKS Fachgespräch/Referentenmaterialien 7, o.O.
- DLR/INSTITUT FÜR FAHRZEUGKONZEPTE (2013):** Der Pkw-Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt, Stuttgart.
- EBNER, S. (2013):** Ökologisierung des Verkehrs (WKO), Wien.
- EIA (2014):** Annual Energy Outlook 2014, Washington D.C.
- ENERGYCOMMENT (2009-2014):** Global Energy Briefing, lfd. Ausg. 2009-2014.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2013):** Clean Power for Transport: A European alternative fuels strategy, COM (2013) SWD (2013) 4 final, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014):** European Energy Security Strategy SWD (2014) 330 final, Brüssel, 28.5.2014 COM(2014) 330 final.
- EUROPEAN EXPERT GROUP ON FUTURE TRANSPORT FUELS (2011):** Future Transport Fuels, Brüssel.
- IEA (2013):** Annual Statistical Supplement 2013 Edition, Paris.
- IEA (2011):** Biofuels for Transport, Paris.
- IEA (2014):** Energy Technology Perspectives 2014, Harnessing Electricity's Potential, Paris.
- IEA (2014):** Medium-Term Gas Market Report 2014, Paris.
- IEA (2013):** Medium-Term Oil Market Report 2013, Paris.
- IEA (2014):** Medium-Term Oil Market Report 2014, Paris.
- IEA (2012):** Medium-Term Renewable Energy Market Report, Paris.

IEA (2013): Production Costs of Alternative Transportation Fuels. Influence of Crude Oil Price and Technology Maturity, Paris.

IEA (2013): Resources to Reserves, Paris.

IEA (2011): Technology Roadmap Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles, Paris.

IEA (2012): Technology Roadmap Fuel Economy of Road Vehicles, Paris.

IEA (2009): Transport, Energy and CO₂, Paris.

IEA (2013): World Energy Model Documentation, Paris.

IEA (2012): World Energy Outlook 2012, Paris.

IEA (2013): World Energy Outlook 2013, Paris.

IFEU (2012): Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoff- emissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMOT, Version 5.3), Heidelberg.

IINAS/IFEU/SHELL (2012): Nach Super E10: Welche Rolle für Biokraftstoffe?, Shell-Studie, Darmstadt.

KAZUNORI, K.; RYAN L. (2010): Transport Energy Efficiency. Implementation of IEA Recommendations.

KLOESS, M. (TU Wien) (2010): Potenziale alternativer Antriebsysteme zur Reduktion von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr; Wien.

KLOESS/HAAS/KÖNIGHOFER/CANELLA/PRENNINGER (2011): Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050 - NANUPOT, Wien.

LBST (2014): Power-to-Gas - Status und Perspektiven, Hannover.

NENTWIG, L.-E./HAUSBERGER, A. (2012): Begrenzung der CO₂-Emissionen aus Nfz (TÜV Nord/TU Graz).

NORDEN/IEA (2013): Nordic Energy Technology Perspectives, Paris.

ÖKO-INSTITUT/DLR-IVF/FRAUNHOFER ISI (2012): Renewbility II - Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs, Forschungskennzahl 3710 96 175 UBA-FB 001786/2, Berlin.

ÖKO-INSTITUT/DLR-IVF (2009): Renewbility I - Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030, FZK 0327546, Dresden.

PROKOP, G./STOLLER, A. (2012): Der Güterverkehr von morgen (Band 30 Heinrich-Böll-Stiftung), Berlin.

SCHMIDT, P. (LBST) (2011): CNG and LPG for Transport in Germany, 6. Tagung Gasfahrzeuge, Stuttgart.

SCHMIDT, P. et al. (LBST) (2013): Results of the FVV Fuel Study - Future Fuels for Combustion Engines & Gas Turbines, München.

SHELL DEUTSCHLAND OIL GMBH (ADOLF/CENG) (2010): Lkw-Studie - Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030, Hamburg.

SHELL (2013): Erdgas - Eine Brückentechnologie für die Mobilität der Zukunft?, Den Haag.

TNO/AEA et al.(2012): Support for the revision of regulation on CO₂ emissions from light commercial vehicles. Framework Contract No ENV.C.3./FRA/2009/0043, Delft.

TU Wien/JOANNEUM RESEARCH/AVL List (2011): Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050 (BMVIT/a3plus), (NANUPOT).

UMWELTBUNDESAMT (2013): CO₂-Monitoring von leichten Nutzfahrzeugen, Wien.

3.2 Systemorientierte FTI-Potenziale nach Bedienformen

3.2.1 Schwerpunkte für Fahrzeugklasse N1 mit Fokus auf Systemoptimierung

3.2.1.1 Aspekte der Einsatzfähigkeit und Substituierbarkeit

Diese Nutzfahrzeugklasse zeichnet sich durch Flexibilität und Wendigkeit aus, kann also in unterschiedlich strukturierten Bedienräumen, wie in beengten Innenstädten oder in peripheren Berggebieten, eingesetzt werden. Sie kann so gut wie alle Ladestandorte anfahren, insbesondere ist eine fast uneingeschränkte „Stadtgängigkeit“ gegeben. Denn diese auf die Lieferung kleiner Sendungsmengen spezialisierten Fahrzeuge zeichnet sowohl eine geringe Störempfindlichkeit (das Fahrzeug kann leicht ausweichen) als auch eine geringe Störwirkung (Wahrnehmung von Lärm und Emissionen des einzelnen Fahrzeuges, Inanspruchnahme von Verkehrsfläche) aus. Ihr Einsatz erregt im Allgemeinen keinen Unmut in der Wohnbevölkerung, weil mit ihnen eine lokale bzw. regionale Dienstleistungs- und Versorgungsfunktion nachvollziehbar verbunden wird, wie bei der Post- und Paketzustellung oder den Frischdiensten in der Lebensmittelversorgung.

Es ist daher kein Zufall, dass vor allem in dieser Fahrzeugklasse für die Bedienung von historischen Stadtkernen, wie sie in Italien oder Frankreich anzutreffen sind, bereits eine größere Auswahl an alternativ angetriebenen Modellen von den dort heimischen Fahrzeugherstellern angeboten wird (vgl. Kap. 1.1.2.4). Unterstützt wird dieser Trend von manchen Kommunalverwaltungen mittelgroßer Städte, die Einfahrtsbeschränkungen in den Stadtkern erlassen haben, auch wegen der touristischen Attraktivität.

3.2.1.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu Verbesserungspotenzialen am Fahrzeug

Weniger günstig schneiden die N1-Fahrzeuge bei der Betrachtung der Transportproduktivität wegen ihres mäßigen Nutzlast-Gesamtgewichtsverhältnisses ab und dementsprechend, was aber nur aus der Analyse ableitbar ist, auch bei den Indikatoren zu den Kraftstoffverbräuchen und Emissionen bezogen auf ihre relativ geringe Transportleistung. Dieses suboptimale Verhältnis könnte künftig durch Leichtbaukonstruktionen (bei gleichbleibender Nutzlast, aber mit entsprechender Hybridausstattung, oder mit höherer Nutzlast und damit einem reduzierten Tonnenkilometer-Energieverbrauch) verbessert werden.

Die Aus- bzw. Aufrüstbarkeit dieser Fahrzeugklasse ist durch die Raumverhältnisse im Fahrzeug begrenzt, weil vor allem das Nutzlastvolumen im Laderaum möglichst nicht verkleinert werden soll. Die für Nutzfahrzeuge kleinen Fahrzeugabmessungen und der geringe Stellplatzflächenbedarf erleichtern andererseits die Schaffung von Batterie-Lademöglichkeiten an verschiedenen Orten der logistikbedingten Stopps, wie etwa in halböffentlichen Bereichen von anfahrbaren Innenhöfen (s. Abbildung 3-34).

3.2.2 Schwerpunkte für Fahrzeugklassen N2 und „N2plus“ mit Fokus auf Infrastrukturoptimierung

3.2.2.1 Aspekte der Einsatzfähigkeit und Substituierbarkeit

In diese Nutzfahrzeugklasse fallen nach der offiziellen Reglementierung (Kraftfahrgesetz) Fahrzeuge mit mehr als 3,5 t bis 12 t zulässigem Gesamtgewicht. Darüber beginnt die Nutzfahrzeugklasse N3, die eine Spannweite von mehr als 12 t bis 40 t bzw. 44 t (im kombinierten Verkehr bis zum nächsten Umschlagterminal) zulässiges Gesamtgewicht aufweist. Dazwischen hat sich in der Praxis des Güterverkehrs eine Fahrzeugklasse (sozusagen „N2plus“) herausgebildet, die zwischen 12 t und ca. 25 t Gesamtgewicht angesiedelt ist und die sowohl aus dem Blickwinkel des Einsatzes in der Flächenbeziehung als auch aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit und Verkehrsverträglichkeit durch Hybridisierung bzw. Dual-Fuel-Auslegung für die Zukunft verstärkte Aufmerksamkeit verdient.

Diese Mittelklasse an Schwerfahrzeugen zeichnet ein ausgewogenes Nutzlastpotenzial (+/- 50 %, vgl. Kapitel 1.1.2.5). Sie verfügen über genügend Einbauraum, z.B. für zusätzliche Energiespeicher und Antriebsaggregate, und haben für verschiedenartigste verkehrslogistische Abläufe operable Fahrzeugabmessungen (Länge und Eckhöhe). Dementsprechend variantenreich kann ihr Einsatz erfolgen. Sie bedürfen allerdings einer *geplanten verkehrsräumlichen Organisation* an den vor allem dezentralisierten Lieferstationen, um Konflikte mit anderen Lieferfahrzeugen, sonstigen VerkehrsteilnehmerInnen oder mit PassantInnen zu vermeiden. Sie weisen eine im Allgemeinen ausreichende Nutzlastkapazität für Sendungsbündelungen oder konzentrierte Anlieferungen zu kollektiven Points of Deliveries auf.

Es besteht also ein erhöhter Bedarf am klaglosen Zusammenspiel von lokaler (dezentraler) Infrastruktur und der Tourenorganisation bzw. Fahrzeugdisposition. Außerdem lassen sich in Kombination mit z.B. Plug-In-Hybriden hohe CO₂-Reduktions- und Entlastungspotenziale aktivieren.

Aufgrund der Fahrzeugkonfiguration besteht eine eindeutige Korrelation zu (werk)täglichen oder zumindest regelmäßigen Bedienfahrten von Auslieferungslägern in zumeist geographisch vordefinierte Bedienräume oder zu Pendelverkehren von mittelbetrieblichen Produktionsstätten zu Warenlagern, wenn mit einer Anlieferung an einen Standort die Nutzlastkapazität (meist dem Volumen nach) ausgeschöpft wird, aber ein Andocken an eine Laderampe nicht eingerichtet ist.

Diese mittleren Nutzfahrzeuge stehen kaum in direkter Verkehrsmittelkonkurrenz zu anderen Verkehrsträgern, weil sie zwar langlauffähig sind, aber auf Fernläufen (außer bei Sprinterdiensten für eilige und hochwertige Güter) wenig verwendet werden. Wird jedoch die Transportkette betrachtet, stellt sich die Frage, wo in der Stadtregion bzw. in welcher Zulaufentfernung zum Bedienraum sich der Umschlagstandort auf den Distributionsverkehr befindet. Liegen diese Logistikläger nämlich in „zig-Kilometer-Distanzen“ außerhalb der urbanen Gütersenke, dann ergibt sich auf dieser Etappe der Letzten Meile sehr wohl eine prinzipielle Verkehrsträgerkonkurrenz mit der mengenleistungsfähigeren Güterbahn, wenn diese ein stadtnäheren Umschlagort ansteuern kann.

3.2.2.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu Verbesserungspotenzialen am Fahrzeug

Gerade bei N2 tut sich im Fahrzeugangebot noch eine Lücke auf. Für diese Fahrzeugklasse scheint sich noch kein überzeugendes Fahrzeugkonzept abzuzeichnen (vgl. Kap. 1.1.2.4). Daher stehen alternative

Fahrzeugmodelle der N₂-Klasse noch vor der Schwelle zur Migration am Fahrzeugmarkt. In diesem Stadium des Innovationsprozesses sind die exogenen Rahmenbedingungen, wie eben in der verkehrsräumlichen Organisation der Verkehrsinfrastruktur, auf einen verbreiteten Einsatz solcher hybriden oder elektrifizierten Nutzfahrzeuge in deren bevorzugten Bedienegebieten *konzeptionell* vorzubereiten und *experimentell* auszurichten, wenn man eine emissionsarme Versorgung der Gütersenke von öffentlicher Seite tatkräftig unterstützen will. Das kann aber zu regionalen „Insellösungen“ in dem Sinne führen, dass vergleichbar strukturierte Siedlungsgebiete ungleich geregelt werden, weil es von der jeweiligen kommunalen Entscheidungsfindung abhängt, ob *Zufahrtsprivilegien bzw. -beschränkungen* für sensible Gebiete erlassen werden.

Dann bleibt möglicherweise immer noch die Hürde einer problematischen Wirtschaftlichkeit. In diese Richtung ist die *industrielle Grundlagenforschung* (v.a. bei der Batterietechnologie) jedenfalls bei den übermäßig kostenintensiven Fahrzeugkomponenten noch weiter zu treiben.

3.2.3 Resümee für die flächenbedienenden Fahrzeugklassen N₁ und N₂

Prinzipiell ist festzuhalten, dass, je tiefer in den (Konsum-)Schwerpunkt der Gütersenke eingefahren wird, desto systemorientierter wird die **betriebliche Verkehrslogistik** organisiert sein (wegen Lieferzeitvorgaben der Kundschaft) und desto stärker wird die **öffentliche Verkehrsorganisation** reguliert sein (z.B. durch Einbahnsysteme im Netz, reservierte Ladezonen, Zufahrtszeitfenster durch die Straßenverwaltung oder die Verkehrsflächenbewirtschaftung mit Benützungsgebühren).

Als systemoptimierende Angriffspunkte sind zu erkennen:

- ❑ Die **Verkehrsflächenaufteilung** zwischen den Verkehrsarten unter beengten räumlichen Bebauungsverhältnissen ist bei der Verkehrsorganisation ebenso ein Thema wie das Zusammenwirken öffentlicher Verkehrsflächen und privater Verkehrsflächen an den Ladestandorten und Anlieferstationen (z.B. sind Ladevorgänge in Hinterhöfen bzw. auf Privatgrund möglich).
- ❑ Die Bevorzugung der Güterversorgung bei seitlichen Haltestreifen, allenfalls auch auf den Zufahrten zur „allerletzten“ Meile auf **Vorzugsspuren**, eventuell kombiniert mit dem öffentlichen Personenverkehr, quasi als Teil des „stadtdienlichen Verkehrs“ (DÖRR, 2001), wenn es sich um die Privilegierung für emissionsfreie Fahrzeuge handelt. Solche Vorzugsspuren könnten mit technischen Elementen des (abschnittsweise) autonomen Fahrens eingerichtet sein, womit eine gegenseitige Behinderung ausgeschlossen werden könnte.
- ❑ Die flotte Fahrdynamik mit hoher Fahrgeschwindigkeit bei den herkömmlichen N₁-Lieferfahrzeugen kann durch die Hybridisierung weiterhin gewährleistet bleiben. Diese Charakteristik der **Fahrdynamik** ist jedoch dann zweitrangig, wenn die Auslieferungsläger nahe an den Lieferbezirken angesiedelt sind, sodass die Zulaufstrecken – im Gegensatz zur simulierten Referenzstrecke – keine Hochleistungsstraße oder nur einen kurzen Abschnitt einer solchen umfassen und überhaupt die Fahrleistung im Zulauf zur Gütersenke minimiert werden kann. Dann bekommt das elektrische Fahren von Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen oder reinen batteriegestützten Elektrofahrzeugen eine

Chance. Die Post AG geht im Raum Wien mit ihrer N1-Fahrzeugflotte mit gutem Beispiel voran (s. Abbildung 3-34).

- ❑ Sowohl bei den Distributionsverkehren von N1- als auch von N2-Fahrzeugen wären prinzipiell heute schon **vollelektrifizierte emissionsfreie Transportketten** möglich, wenn die Eisenbahnstrecken bis zu den Güterstationen in den Innenstädten als Umschlagzentren für die City-Logistik genutzt werden (HÖRL, WANJEK, 2013; DÖRR, 2014). Stattdessen wird aber der Umschlag im günstigeren Fall an die Stadtgrenze und im ungünstigeren Fall sogar an den Rand des Ballungsraumes verlegt.
- ❑ In diesem Zusammenhang ist auch auf die **Zugbildungstechnologie der Bahn** zu verweisen, die immer längere Ganzzüge bevorzugt und kürzere Einzelwagenverkehre eher vernachlässigt. Diesbezüglich sei auf die ungenutzten Güterstationen in Wien an der Nahtstelle zwischen Innenstadt und Außenbezirken, wie am Westbahnhof oder im Franz-Josefs-Bahnhof sowie auf den zur Auflassung vorgesehenen Nordwestbahnhof, hingewiesen (HÖRL et al., 2012, 67f. u. 80). Damit könnte die Warenversorgung wieder näher an die Gütersenke Stadt auf der Schiene angefahren und damit dezentralisierter abgewickelt werden.
- ❑ Hierzu bietet sich eine **intermodale Befassung mit Bedienungsmodellen einer dezentralisierten Versorgung der Gütersenke Stadt** an, die auf der Kombination von geeigneten Zugbildungen auf der Bahn (in der Art von Gütertriebwagen), einem Umschlagkonzept (ohne schwerem Intermodalgerät, aber dafür technisch an der vollautomatisierten Intralogistik orientiert) und dem Einsatz emissionsfreier Nutzfahrzeuge für die allerletzte Meile beruht.
- ❑ Das **Zusammenspiel von Lieferfahrzeugen auf der Letzten Meile und der Fördergeräte auf den „letzten Metern“ an der Anlieferstation** ist ein offenes Thema, wenn man die Zustände an innerstädtischen Points of Sale beobachtet. Gemessen am perfektionierten Warehousing und an der automatisierten Intralogistik in den großen Zentrallägern muten diese Zustände anachronistisch an.
- ❑ Ein **vollautomatisierter Umschlag in City-Terminals**, das **halbautonome Fahren** der Gütertransportmittel im Stadtnetz und die **halbautomatisierte Warenzustellung** am Point of Sale bilden eine technische Herausforderung auf längere Sicht (FLÄMIG, 2014). Dabei mit weitem Horizont an unterirdische Güterverteilnetze zu denken, stellt eine stadtbautechnische Vision für die Smart City von morgen dar.
- ❑ Eine *Synergie von emissionsfreier Warenversorgung mit der Personenelektromobilität* kann sich z.B. im Stadtquartier bzw. in größere Wohnanlagen ergeben, wenn bei einem Quartiersgeschäftszentrum bzw. einer Ladenzeile eine **gemeinsame Aufladestation** mit mehreren Stellplätzen (jeweils mit reservierter Zufahrt für die Warenabschichtung und z.B. für das Car-Sharing) eingerichtet wird. Die Beförderung der Waren vom Fahrzeug zu den Geschäftslokalen müsste konfliktfrei abgesichert sein und das Lieferfahrzeug möglichst nicht reversieren müssen, also in Fahrtrichtungsrichtung verbleiben. Übrigens, wenn das akustische Rückfahrsignal nicht aktiviert wird und die Warenförderung auf den „letzten Metern“ mit Trolleys, z.B. in Spurrillen geführt, geräuscharm erfolgt, kann auch eine Nachtanlieferung störungsfrei für die besiedelte Umgebung durchgeführt werden.

Abbildung 3-34: Die Systemfunktion des „Hinterhofes“ für die emissionsfreie Warenanlieferung



Bilder: arp (2014; 2013)

3.2.4 Schwerpunkte für Fahrzeugklassen N₃ (und O) mit Fokus auf Fahrzeugoptimierung

3.2.4.1 Aspekte der Einsatzfähigkeit und Substituierbarkeit

In diese Nutzfahrzeugklassen fallen Fahrzeuge mit mehr als 12 t bis zu 40 t (im kombinierten Verkehr auf der Fahrt bis zum nächsten Kombi-Terminal bis zu 44 t) zulässigem Gesamtgewicht und mit einem rationellen Nutzlastpotenzial bis knapp über 60 % Nutzgewicht (vgl. Darstellung 1-14). Sie verfügen über verschiedene Einbaumöglichkeiten für zusätzliche Energiespeicher, z.B. im Anhänger oder Trailer (s. Abbildung 1-31), und u.U. auch für unterstützende Antriebsaggregate. Die Fahrzeugklasse ist mit Annäherung an das höchstzulässige Gesamtgewicht (zzG) von 40 t das bevorzugte Straßentransportmittel für Fernläufe auf der Autobahn im Punkt-zu-Punkt-Verkehr innerhalb der Ruhezeitdistanzen des Fahrpersonals im Laufweg der Tour von einigen hundert Kilometern.

Diese Schwerfahrzeuge bedürfen aber idealerweise dreistreifiger Richtungsfahrbahnen, damit ihnen der rechte (erste) Fahrstreifen für das Fahren im Konvoi und der mittlere (zweite) Fahrstreifen zum Überholen dienen kann. Der Pkw-Verkehr wird dabei auf den zweiten bzw. dritten Fahrstreifen verdrängt (s. Abbildung 3-35). Die Schnellstraßen sind nach österreichischer Trassierungspraxis zweistreifig ohne ausreichenden Pannestreifen, wie die S 6 im Müritzal, für einen dichten Verkehr mit Lkw-Zügen bedingt geeignet.

Abbildung 3-35: Die „Güter“-Autobahn mit drei Richtungsfahrstreifen und hohen Lärmschutzwänden



Bilder: arp (Ag Leipzig-Nürnberg, März 2014; A1 Westautobahn, Juli 2013)

Autobahnen mit dreistreifigen Richtungsfahrbahnen kommen prinzipiell für abschnittsweise autonom geführte Güterverkehrsmittel in Frage, wenn der erste Fahrstreifen möglichst dafür reserviert werden kann. Auf absehbare Zeit sind aber im österreichischen Autobahnnetz nur die Westautobahn auf der Strecke Steinhäusl bis Voralpenkreuz und die Südbahn im Abschnitt Inzersdorf bis Seebenstein sowie im Raum Graz derart trassiert.

Abseits der Hochleistungsstraßen im einstreifigen Richtungsverkehr und bei Straßennetzen mit orthogonalen Abbiegerelationen an den plangleichen Knoten sind vor allem die Lkw-Züge letztlich tendenziell verkehrshinderlich. Die zahlreichen Schwerverkehrsfahrverbote (oft ab 7,5 t zGG) entlang von nicht anbaufreien Straßen (im Ortsgebiet) sind ein starkes Indiz dafür (s. Abbildung 3-36).

3.2.4.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu Verbesserungspotenzialen am Fahrzeug

An der problematischen Performance im Innerortsverkehr und im ländlichen Straßennetz ändert ein emissionsminimierter Antrieb nichts. Daher wäre ein Abtausch eines gewissen Umweltvorteils gegenüber der Inkaufnahme eines erhöhten Verkehrsrisikos durch längere, schwerere und höhere Fahrzeugdimensionen, wie in Deutschland im ausnahmsweisen Probetrieb, kritisch zu hinterfragen, wenn von mancher Seite der Vorschlag geäußert wird, die gesetzlichen Fahrzeugabmessungen deswegen hinaufzusetzen. Vielmehr sind die Konstrukteure gefordert, den Raum für alternative Antriebskomponenten im Fahrwerk unter den geltenden Normen zu organisieren.

Abbildung 3-36: Lokales Schwerverkehrsfahrverbot und kritische Ortsdurchfahrt



Bilder: arp (Industriezone St. Martin bei Traun, Februar 2011; Kreuzung in Straßwalchen, Juli 2013)

Aufgrund der Fahrzeugdimensionen und der hohen durchschnittlichen Fahrleistungen von größeren N3-Lkw ergeben sich fahrzeugseitig weiterhin zahlreiche Angriffspunkte, wie

- Erhöhung der Energieeffizienz durch Verringerung der **Fahrwiderstände** als ein komplexes Aktionsfeld: fahrzeugseitig durch verbesserte Aerodynamik und verringerte Rollwiderstände am Rad und Reifen, infrastrukturseitig prinzipiell auch durch Fahrwegtrassierung in Bezug auf die Neigungsverhältnisse, die Windexponierung und die Beschaffenheit der Fahrbahndecken, was das heikle Thema der Griffigkeit beinhaltet.
- Erhöhung der Energieeffizienz antriebsseitig durch **Downsizing, Hybridisierung** und **Motorbetriebsstrategien** wie „Linienbetrieb“ – d.h. Betrieb des Motors nicht im gesamten Kennfeld, sondern nur entlang einer Linie mit sehr guten Wirkungsgraden zur Bereitstellung der

-
- geforderten Antriebsleistung – oder „Bestpunkt Betrieb“, in dem der VKM nur in seinem verbrauchoptimalen Betriebspunkt, also bei konstanter Leistung, betrieben wird.
- Verbesserung der Energieeffizienz durch Vermeidung von mechanischen Verlusten und Wärmeverlusten sowie durch **Rückgewinnung nutzbarer Energie** aus der Motorabwärme.
 - Erhöhung der Fahrzeug-Effizienz (Transportproduktivität) durch **Leichtbau-Komponenten** im Fahrzeugbau.
 - Ausbau der Fahrerassistenzsysteme in Richtung halbautonomes Fahren auf speziell dafür ausgestatteten Fahrwegen, vornehmlich im Autobahnnetz.

Das in der Fahrzyklus-Simulation definierte N₃-Fahrzeug entspricht den Anforderungen eines industriellen Zulieferverkehrs von einem privaten Betriebsstandort zu einem privaten Betriebsstandort. Die Energieverbräuche und die Emissionsmengen der CO₂-Äquivalente stellen sich im Gesamtvergleich aufgrund der günstigen Transportproduktivität am besten dar, daher ist das errechnete Reduktionspotenzial bei einer Umstellung bescheidener ausgefallen, weil ein relativ kurzer Transportlauf im Ballungsraum zugrunde gelegt wurde.

Wenn jedoch die hohen Fahrleistungen im Fernverkehr (Hauptläufe in der Transportkette) und der hohe Anteil des Straßengütertransportes am **Modal Split**^{cc} berücksichtigt werden, dann ergeben sich daraus bedeutende Summen an Kraftstoffeinsparungen und Emissionsentlastungen. Das heißt, bei den schweren Nutzfahrzeugen kommen hauptsächlich energiewirtschaftliche (Dieselabhängigkeit, vgl. Kap. 3.1.4.2) und klimawirksame Effekte (nationale Klimabilanzen) in Hinblick auf ihren Haupteinsatzbereich, dem zügigen Fahren – oft im Konvoi auf Autobahnen und Schnellstraßen –, zum Tragen (s. Abbildung 3-36).

Allerdings darf beim *Stichwort Modal Split* die Einbeziehung der anderen Güterverkehrsträger nicht übersehen werden, wenn sie effektiv als Konkurrenten bzw. als Alternative zum Straßengüterverkehr in von der Wirtschaft nachgefragten Relationen auftreten können. Diese Vergleichsrechnungen müssten zumindest für die N₃-Klasse und die anverwandte Fahrzeugklasse O, das sind die Sattelzugmaschinen mit Trailer, die *Indikatorentafel zu den verkehrsökologischen Effekten von Gütertransporten* ergänzen (s. Tabelle 2-13). Hinweise darauf gibt die FFG-Studie „Friendly Supply Chains“, in der anhand von Transportketten der Getränkeindustrie mit Hilfe des TREMOD-Modells^{dd} solche Effekte im Verkehrsträgervergleich für herkömmliche Verkehrsmittel berechnet wurden (DÖRR, HÖRL, PÖCHTRAGER, 2011, 71ff).

Dazu wird es noch erforderlich sein, die Datengrundlagen für typische Fahrzyklen für Referenzverkehrsmittel der konkurrierenden Verkehrsträger im Landverkehr (also für die Einsatzbereiche von Eisenbahntriebfahrzeugen, Motorgüterschiffen bzw. Schubschiffen, allenfalls von Frachtflugzeugen) sowohl seitens der Fahrzeugantriebe als auch seitens der Befahrbarkeitsbedingungen der Wegeinfrastruktur (in passender Kantenstückelung) herzurichten und in einen multimodalen Vergleich zu bringen (vgl. dazu die Resümees in den Kapiteln 1.1.2.6, 1.1.3.3, 1.1.4.4 und 1.1.5.4).

^{cc} Der Modal Split bezeichnet die Aufteilung der Güterverkehrsleistungen (gemessen in verladene Tonnen Versandgut bzw. in Tonnenkilometer gefahrene Transportleistung) auf die Güterverkehrsträger Straße, Schiene, Binnenwasserstraße, Fracht-Luftfahrt und Produktleitungen (Pipelines).

^{dd} Dieses Tool kann unter www.ecotransit.org zur Berechnung online herangezogen werden.

3.3 Strategischer Ausblick auf Aktionsfelder und Zeithorizonte

3.3.1 Fahrzeugtechnologie als Entwicklungstreiber

Als Ergebnis der Fahrzyklen-Simulationen für repräsentative Mustertransportläufe im Straßengüterverkehr haben sich noch beachtliche Reduktionspotenziale beim Energieverbrauch und bei den Emissionen von CO₂-Äquivalenten herausgestellt. Daraus ergeben sich für die kommenden FTI-Aktivitäten folgende Zielscheiben für Impulse im Innovationsfeld Fahrzeugtechnologie:

- ❑ Vermeidung der Kraftstoffverschwendung im Einsatz, wie bei verkehrsbedingten Stopps
- ❑ Verbesserung der Energieeffizienz (idealer Energieeinsatz im Fahrbetrieb nach Verkehrssituation)
- ❑ Verbesserung der Wirkungsgrade (technologische Weiterentwicklung des Antriebsstrangs)
- ❑ Nutzung von kohlenstoffarmen oder regenerativen Kraftstoffen und Energieträgern
- ❑ Verringerung der Fahrwiderstände (an Karosserie und Fahrwerk)
- ❑ Absenkung der Emissionen (als Kombinationseffekt der vorher genannten Angriffspunkte)

Der bewährte Dieselantrieb für Nutzfahrzeuge wird weiterhin perfektioniert werden. Ein Entwicklungspfad, der nicht zuletzt durch die EURO-Abgasnormen ausgelöst wurde. Ob daher die Hybridisierung und Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe eine **mittelfristige Technologiebrücke** bis zur Einsatzreife beispielsweise der wasserstoffgestützten Antriebstechnologien bilden oder selbst die auf längere Sicht **kommende Antriebstechnologie** für Nutzfahrzeuge sein wird, ist aus heutiger Sicht kaum prognostizierbar. Sehr stark werden solche Entwicklungen auch von künftigen Gesetzeslagen abhängen.

Tatsache ist, dass ein Innovationsdurchbruch bislang nicht stattgefunden hat, obwohl viele Leuchtturmprojekte vor allem zur Elektromobilität im Straßenverkehr initiiert worden sind (JOANNEUM RESEARCH, 2010). Aussichtsreich ist eine Zukunft als **Nischentechnologie für besondere Einsatzfälle**, z.B. in umweltsensiblen urbanen Bedienräumen.

Die verschiedenen Stufen der Hybridisierung ermöglichen es, nicht auf eine „Entweder-Oder-Strategie“ setzen zu müssen, sondern einsatzorientiert den passenden Hybridisierungsgrad bei der Fahrzeugbeschaffung wählen zu können, sofern sich das Fahrzeugangebot dahingehend weiter diversifiziert. Somit könnten die **Hybrid-Strategien** künftig an Bedeutung gewinnen.

3.3.2 Erkenntnisse für FTI-Aktionsfelder

- ❑ Bei den simulierten Mustertransportläufen für die N₁- und die N₂-Fahrzeuge waren die Verteiltouren unter einer für die heutige Batterien-Reichweite kritischen Lauflänge von 60 km angesiedelt und die Fahrzeugmassen mit maximal 9 t waren derart begrenzt, dass sie zwar prinzipiell schon, aber praktisch noch zu wenig für den Einsatz zum rein elektrischen Fahren geeignet gewesen wären.
- Für diese Versorgungsverkehre fehlen vorläufig noch die infrastrukturellen Konzepte, was die Ausstattung an Ladeinfrastruktur im Tourenverlauf betrifft. Auch fehlen die darauf abgestimmten Einsatzkonzepte, die gewisse Unwägbarkeiten in Hinblick auf die Verkehrsqualität auf den frequentierten Routen mitberücksichtigen würden.

-
- Bei N₃- bzw. O-Fahrzeugen (Sattelzüge) erscheint eine volle Elektrifizierung des Antriebes wegen der hohen Fahrzeugmasse bei gleichzeitig hoher Spitzenleistungsanforderung im Fernverkehr gegenwärtig nicht zielführend, solange die Batterie die unmittelbare Quelle für den Fahrstrom darstellt. Parallel dazu wurde optional eine Stromversorgung über Fahrleitungen in Deutschland angedacht (s. Abbildung 1-24).
 - Der ausschließliche Elektroantrieb im Güterverkehrseinsatz ist daher aus heutiger Sicht der Batterietechnologie eine längerfristige Zukunftsoption, die mit dem Einsatz von N₁-Fahrzeugen, der aber dem Charakter nach mehr dem Personen- als dem Güterverkehr zuzurechnen ist, beginnt und sich je nach Fortschritt der Batterietechnologie in die höheren Nutzfahrzeugklassen hinaufsteigern könnte, ohne dass aber ein Zeithorizont dafür abgeschätzt werden kann.
 - Nichtsdestotrotz wären vollelektrifizierte Transportketten bereits realisierbar, wenn die Standortwahl für den Umschlag vom Fernlauf im Schienengüterverkehr auf kleinere E-Nutzfahrzeuge im Verteilverkehr nahe am Bedienraum und die Einrichtung einer Batterieladeinfrastruktur an ausgesuchten Anlieferstationen mit der Fahrzeugbeschaffung von Plug-In-Fahrzeugen zusammenspielen würden. Dann könnte beispielsweise der Mustertransportlauf für einen KEP-Dienst bei den wenig genutzten Güterhallen am Westbahnhof beginnen und die umgebenden Stadtbezirke (wie den 16. Bezirk) anfahren.
 - Welcher Hybridisierungsgrad in welcher Fahrzeugvariante, also eine Teilelektrifizierung im Antriebsstrang, für den praktischen Fahrzeugeinsatz Sinn macht, hängt in hohem Maße von den verkehrslogistischen Aufgaben ab, die von der Nachfrage nach Transportleistungen auf den Güter- und Transportmärkten sowie von den Verkehrsbedingungen in den zu bedienenden Räumen der Güterquellen bzw. -senken abhängen.
 - Die „leichteren“ Hybrid-Varianten unter den alternativ angetriebenen Nutzfahrzeugen vermindern die unnötigen Kraftstoffverbräuche und reduzieren die Emissionen im Zuge der Befahrung der städtischen Korridore, wie dem Gürtel in Wien, insbesondere zu Tageszeiten schlechter Verkehrsqualität (wie bei LoS-E*). Sie entlasten damit die Umgebung und erzielen eine gewisse Kosteneinsparung, die im Einzelfall gering sein mag, in der Summe der unterwegs befindlichen Nutzfahrzeuge in einem neuralgischen Korridor aber in der Doppelwirkung bedeutend sein kann. Solche Untersuchungen stehen noch aus und könnten mit Floating-Car-Data-Fahrten kombiniert werden.
 - Die „schweren“ Hybrid-Varianten erlauben emissionsfreies Fahren in besonders sensiblen Zonen und/oder zu besonders belasteten Zeiten (z.B. bei Überschreitung von Immissionsgrenzwerten) in Abhängigkeit von der Energiespeicherkapazität der Batterie.
 - Diese Nutzenanwendung der Hybride könnte man als **passives Ausnutzen der Antriebsalternative** subsumieren, weil das Wirksamwerden der Hybrid-Aggregate durch die Start/Stopp-Funktion und durch die Rekuperation im Antriebsstrang des Fahrzeuges automatisch gesteuert wird oder weil rechtliche Vorschriften dazu veranlassen, den hybriden Antrieb zu aktivieren, wie es beim Befahren

von Umweltzonen oder in Immissionsschutzgebieten^{ee} der Fall sein kann. Diese passive Ausnutzung fließt vor allem in die strategische Tourenplanung ein, wenn sich das operierende Transportunternehmen gewisse Kostenvorteile verspricht.

- Des Weiteren eröffnen die schweren Hybridvarianten die Möglichkeit, **aktiv (situativ) die Antriebsalternative** im Zuge des Laufweges dort **einzusetzen**, wo sich das Fahrpersonal Einspar- und Entlastungseffekte erwartet. Das kann entlang einer Siedlungsdurchfahrt oder in einem räumlich eng strukturierten Bedienraum sein, wo etliche Stopps und eine Geschwindigkeitsbegrenzung (wie 30er-Zone im Wohngebiet oder in einer Begegnungszone nach der Straßenverkehrsordnung) unumgänglich sind und damit der Elektroantrieb leistungsmäßig ausreichend ist.

Solche Erfahrungen sollten im Betriebseinsatz gesammelt und ergründet werden. Darauf lässt sich ein erweitertes Schulungsprogramm für das Fahrpersonal und die Fahrzeugdisposition aufsetzen.

- ❑ Neben dieser Form des taktischen Fahrens werden mittelfristig Formen des autonomen Fahrens hinzutreten, die sich mit **selbststeuernden Techniken des vorausschauenden Fahrens** verknüpfen werden, wie sie heute schon durch moderne Sensorik als Fahrerassistenzsysteme in Fahrzeuge eingebaut werden (car-to-car-communication, car-to-lane-to-car-communication), aber noch keine Verselbständigung des Systems erlauben.
- ❑ Die **Mikro-Hybrid-Varianten** mit der Start/Stop-Funktionalität bringen gemessen am technischen Aufwand und den Zusatzkosten bei der Fahrzeuganschaffung den größten Effekt bei der Einsparung von CO₂-Äquivalenten. Bevorzugt sind es die Fahrzeuge bis zur N2-Klasse, deren Einsatzspektrum überwiegend durch die gerechneten Mustertransportläufe mit den vielen verkehrsbedingten und logistikbedingten Stopps abgedeckt ist.
- Dabei bleiben die Effekte für jene Verteilverkehre noch zu untersuchen, die ebenfalls von Logistikstützpunkten im Umland der Ballungsräume starten, um jedoch die Flächenbedienung in ländlichen Regionen, also hinaus in eine sehr disperse Gütersenke, zu besorgen.
- ❑ Der **CNG-basierte Antrieb** weist gegenüber dem Diesel-basierten Antrieb einen schlechteren Wirkungsgrad auf (s. Tabelle 2-17), zugleich aber geringere CO₂-Emissionen ohne oder mit Hybrid-Varianten (ca. 10 % niedrigeres Ausgangsniveau), sodass es vor allem in immissionsgefährdeten Einsatzgebieten zweckmäßig sein kann, solche Fahrzeuge dort zu stationieren. Gut geeignet wären solche Antriebe beispielsweise für mittlere tägliche Tourendistanzen aus der Mitte eines Ballungsraumes in die Mitte eines benachbarten Ballungsraumes oder für regelmäßige Pendelverkehre, wie von Frischdiensten.

^{ee} Umweltzonen mit Zufahrtsbeschränkungen für bestimmte Fahrzeugtypen sind in deutschen Ballungsräumen, wie in München, Stuttgart, Frankfurt oder Berlin, in Kraft getreten. In Österreich werden nach dem Immissionsschutzgesetz Luft bei Schadstoff-Grenzwertüberschreitungen in verordneten Immissionsschutzgebieten Verkehrsbeschränkungen erlassen.

3.3.3 Systemvoraussetzungen für eine Umstellungsstrategie und für die Migration

Die retardierte Situation im Innovationsprozess signalisiert, dass noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht, der sich insbesondere mit den systemischen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen der Innovationsdiffusion befassen sollte, nämlich mit

- dem **Bedarf** an adäquaten Transportmitteln für den Transport- und Logistikmarkt,
- der **Nützlichkeit** im Sinne der Ziele einer nachhaltigen Verkehrsabwicklung und Güterversorgung,
- der **Wirtschaftlichkeit** des Fahrzeugeinsatzes für fuhrparkbetreibende Unternehmen und
- der **Einsetzbarkeit** in Hinblick auf den begleitenden Ausbau der Energieversorgungsinfrastruktur.

Diese Kriterien sind dafür maßgeblich, dass die technologischen Innovationen in die „Köpfe“ der entscheidenden Personen einziehen können. Das gilt in ganz besonderem Maße für den Nutzfahrzeugbereich, wo Wirtschaftssubjekte überzeugt sein müssen, um sich auf alternative Technologien im Gütertransport einzulassen.

Für die Innovationsdiffusion dieser Fahrzeugtechnologien und die Migration solcherart ausgerüsteter Fahrzeuge auf dem Nutzfahrzeugmarkt ist es auch wesentlich, dass sich die emissionsarme Gütermobilität in der öffentlichen und in der proprietären (privat einzurichtenden) Infrastruktur sowie in der regionalen Verkehrsorganisation wiederfindet.

Solange eine Verbreitung im relevanten Fahrzeugbestand keine kritische Masse erreicht hat, wird es auch keinen funktionierenden Gebrauchtmarkt für alternativ angetriebene Modelle geben. Wo diese anzusetzen ist, ist derzeit schwer zu bestimmen, wird aber vermutlich über 5% liegen. Ein Marktmechanismus wird sich dann einstellen, wenn eine gewisse Angebotsbreite und damit Auswahlmöglichkeit für die Nachfrage gegeben sein wird. Dann kann es zu einer realistischen Preisbildung kommen. Träte dieser Fall ein, hätte sich die Innovation durchgesetzt.

Die **Triebkräfte für eine Umstellung in den Fuhrparks** der Transport- und Logistik-Branche oder im Werksverkehr können einerseits sowohl die Motivation seitens des nutzfahrzeughaltenden Unternehmens sowie andererseits der Wunsch der vertraglich zu bedienenden Kundschaft sein, möglichst emissionsarm über die gesamte Transportkette die Waren angeliefert zu bekommen.

Andererseits kann die Setzung lokal oder regional wirksamer rechtlicher Rahmenbedingungen der straßenerhaltenden (Gebiets-) Körperschaft in bestimmten Orts- oder Stadtteilen ein Auslöser für den Einsatz alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge sein. Solcherart wird der Innovationsprozess von mehreren Seiten mitgestaltet.

Daraus resultieren die **Eingriffsebenen für eine Umstellungsstrategie**, die

- zunächst **am Fahrzeug** ansetzt, indem bei der Neuanschaffung anstelle eines herkömmlichen Diesel-Kfz z.B. in ein Plug-In-Hybrid-Fahrzeug oder ein reines Elektro-Fahrzeug investiert wird. Das kann als *Probe-Fahrzeug* (aus Vorsichtsgründen, um Erfahrungen zu sammeln), als *Symbol-Fahrzeug* (aus Imagegründen) oder als reales *Ersatz-Fahrzeug* (aus Überzeugung) dienen. Jede dieser Umstellungsschritte hat ihren Stellenwert für die Innovationsdiffusion und kann „promotet“ werden.

- des Weiteren **im Fuhrpark** ansetzt, indem eine *Umstellungsstrategie* bei der Flottenerneuerung eingeschlagen wird, bei der jedem Teil der Flotte bestimmte verkehrslogistische Aufgaben zugeordnet werden, für die ein bestimmter Hybridisierungsgrad bzw. eine bestimmte Energiestrategie besonders geeignet erscheint.
- und **in einem Bedienraum** als *umweltorientiertes* Verkehrskonzept komplettiert wird, indem Maßnahmen zur Privilegierung von emissionsarmen Fahrzeugen seitens der öffentlichen Hand gesetzt werden, wenn es um die Verkehrsorganisation zur optimierten Bedienung der Gütersenke geht.

Quellenverzeichnis von Kapitel 3.2 und 3.3:

DÖRR, H. (2001): Planungsstrategien zum Wirtschaftsverkehr in Metropolregionen. Eine Momentaufnahme in den Regionen London, Paris, München und Wien. In: Raumforschung und Raumordnung. 59. Jg. Heft 1/2001. S. 49-59

DÖRR, H. (2014): Perspektiven für Schienengüterbedienung in Ballungsräumen. In: Bahntechnik aktuell Band 48/2014. S. 49-74. Berlin

DÖRR, H.; HÖRL, B.; PÖCHTRAGER, S. (2011): Friendly Supply Chains. Indikatoren-Konzept für die verkehrsträgerübergreifende Bewertung von Transportketten am Beispiel der Supply Chains zu den NST/R-Gütergruppen Wein, Bier, Fruchtsäfte und Milchprodukte. Endbericht zur Studie des Forschungs- und Technologieprogrammes iv2splus . IVS-Schriften. Band 35. Wien

FLÄMIG, H. (2014): Autonome Fahrzeuge für die Logistik. In: Internationales Verkehrswesen. 66. Jg. Nr. 2/2014. S. 82-83

HÖRL, B. et al. (2012): Metro.Freight.2020. Transportmittelauswahl für die mittelbetriebliche Wirtschaft – Strategien zur Stärkung und effizienten Nutzung der Schieneninfrastruktur in Ballungsräumen. Studie im Rahmen des Forschungs- und Technologieprogrammes iv2splus herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). Wien

HÖRL, B.; WANJEK, M. (2013): Strategien zu einer effizienten Nutzung der Schieneninfrastruktur für Güterverkehre in Stadtregionen. In: Jahrbuch Raumplanung 2013. Band 1 herausgegeben vom Department für Raumplanung. S. 113-128

JOANNEUM RESEARCH (2010): Quo vadis Elektroauto? Grundlagen für die Einführung einer Road Map für die Einführung von Elektrofahrzeugen in Österreich. Endbericht zur Studie im Rahmen des Forschungs- und Technologieprogrammes iv2splus. Graz

Internetverzeichnis

¹ EUROSTAD (2014): Regionalstatistik des Verkehrs.

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/transport/data/main_tables Stand: 20.07.2014

² EUROSTAD (2014): Regionalstatistik des Verkehrs.

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/transport/data/main_tables Stand: 20.07.2014

³ EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014): EU Transport Scoreboard. http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/compare/index_en.htm?indicators=environmental-impact_road%3Benvironmental-impact_rail&modes=road Stand: 20.07.2014

⁴ STATISTIK AUSTRIA (2013): Kraftfahrzeuge – Bestand.

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html Stand: 13.08.2014

⁵ UMWELTBUNDESAMT (o.J.): Verkehr – Auswirkungen – Schadstoffe.

http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen_verkehr/verk_schadstoffe/ Stand: 05.08.2014

⁶ WEINFELDEN (o.J.): Erdgas / Biogas: Der Treibstoff für unsere Zukunft.

http://www.tbweinfeld.ch/pdf/privatkunden/erdgas_erdgasfahren.pdf Stand: 05.08.2014

⁷ FRAUENHOFER (o.J.): Elektromobilität. http://isi.fraunhofer.de/elektromobilitaet/Fossile_Alternativen Stand:

05.08.2014

⁸ INTERNATIONALE TRANSPORT REVUE (2013): „Der Kunde wünscht grüne Lkw“

<http://www.firmenflotte.at/epapers/836487/files/assets/seo/page24.html> Stand: 10.07.2014

⁹ FRAUENHOFER (o.J.): Fossile Alternativen. http://isi.fraunhofer.de/elektromobilitaet/Fossile_Alternativen Stand:

05.08.2014

¹⁰ ÖAMTC (o.J.): Sprit-Applikation.

<http://www.oeamtc.at/?id=2500%2C%2C%2C11156&state=&fuelType=9&daysLimit=sinceNoon&ZIP=&search=Anzeigen> Stand: 10.08.2014

¹¹ ERDGASFAHRZEUG (o.J.): Tanken in Österreich. <http://www.erdgasfahrzeug.at/tanken/tanken-in-oesterreich/>

Stand: 01.08.2014

¹² UMWELTBUNDESAMT (o.J.): Erdgas – sauberer, alternativer Kraftstoff.

<http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/kraftstoffe/erdgas/> Stand: 21.07.2014

¹³ KRAFTSTOFF-INFO (o.J.): Vergleich der Kraftstoffe nach Energiegehalt und Dichte. <http://kraftstoff-info.de/vergleich-der-kraftstoffe-nach-energiegehalt-und-dichte>

Stand: 13.08.2014

¹⁴ METESTEC (o.J.): <http://www.meteshop.de/magento/media/dokumente/Normkubikmeter.pdf> Stand: 13.08.2013

¹⁵ POEL-TEC (o.J.): Autogas LNG. http://www.poel-tec.com/autogas/lng_cng.php Stand: 13.08.2013

¹⁶ GREEN-MOTORS (o.J.): Wasserstoffantrieb. <http://www.green-motors.de/alternative-antriebe/wasserstoffantrieb>

Stand: 01.08.2014

¹⁷ GREEN-MOTORS (o.J.): Wasserstoffantrieb. <http://www.green-motors.de/alternative-antriebe/wasserstoffantrieb>

Stand: 01.08.2014

¹⁸ GREEN-MOTORS (o.J.): Brennstoffzellenantrieb. Green-motors: Brennstoffzelle. URL: [http://www.green-](http://www.green-motors.de/alternative-antriebe/brennstoffzellenantrieb)

[motors.de/alternative-antriebe/brennstoffzellenantrieb](http://www.green-motors.de/alternative-antriebe/brennstoffzellenantrieb) Stand: 01.08.2014

-
- ¹⁹ **IEC-1 (2011)**: IEC 62196-1 ed2.0 (2011-10).
<http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/mysearchajax?Openform&key=iec%2062196&sorting=&start=1&onglet=1>, Stand: 31.01.2014
- ²⁰ **DIN (o.J.)**: Einigung auf einheitliche Ladestecker.
<http://www.din.de/cmd;jsessionid=L16HNZGX5PUAZSS5LKE655RB.1?level=tpl-artikel&languageid=de&bcrumblevel=1&cmstextid=198027> Stand: 17.07.2014
- ²¹ **DIN (2011)**: Die NPE schafft Einigkeit für den Markterfolg der Elektromobilität.
http://www.elektromobilitaet.din.de/sixcms_upload/media/3310/Flyer_Ladestecker_DINlang_ZZ-Falz_DE.pdf Stand: 17.07.2014
- ²² **E-TANKSTELLENFINDER.AT (o.J.)**: Elektrotankstellen. <https://e-tankstellen-finder.com/at/de/elektrotankstellen>
Stand: 16.07.2014
- ²³ **E-TANKSTELLENFINDER.AT (o.J.)**: Elektrotankstellen. <https://e-tankstellen-finder.com/at/de/elektrotankstellen>
Stand: 16.07.2014
- ²⁴ **AUTOMATIV (o.J.)**: <http://www.automativ.de/wp-content/uploads/2012/12/toyota-induktive-ladetechnik1.jpg>
Stand: 09.07.2014
- ²⁵ **KARABAG (o.J.)**: Energie laden per Induktion <http://www.elektroauto-karabag.de/informationen/induktionsladung/> Stand: 09.07.2014
- ²⁶ **HEISE (o.J.)**: Induktive Ladekonzepte von Conductix Wampfler <http://www.heise.de/autos/artikel/Induktive-Ladekonzepte-von-Conductix-Wampfler-1612803.html> Stand: 09.07.2014
- ²⁷ **COBUS (2013)**: E.Cobus – rein elektrisch. http://cobus-industries.de/index.php?article_id=33&clang=0 Stand: 10.07.2014
- ²⁸ **COBUS (2014)**: Cobus News – 26. März 2014. http://cobus-industries.de/index.php?article_id=37&clang=0 Stand: 10.07.2014
- ²⁹ **SCHLIFFKE F. (2013)**: ESWE: E-Bus-Praxistest ab Juli 2014. <http://roter-renner.de/nc/detail/datum/2013/12/20/eswe-e-bus-praxistest-ab-juli-2014.html> Stand: 10.07.2014
- ³⁰ **DAF (o.J.)**: DAF LF Hybrid – Für einen umweltfreundlichen Verteilverkehr.
<http://www.daf.eu/SiteCollectionDocuments/Product-Brochures/LF-Hybrid/DAF-LF-Hybrid-DE.pdf> Stand: 05.08.2014
- ³¹ **E-FORCE (o.J.)**: Leise und emissionslos in urbanen Zentren unterwegs! <http://eforce.ch/eforce/leistungsdaten/>
Stand: 10.07.2014
- ³² **FIAT (2012)**: Fiat natural power mit Erdgasantrieb.
http://www.fiatprofessional.at/at/CMSAT/pdf/natural_power_all.pdf Stand: 10.07.2014
- ³³ **IVECO (o.J.)**: Citelis. URL: <http://web.iveco.com/Documents/Irisbus/Irisbus-Citelis.html> Stand: 10.07.2014
- ³⁴ **IVECO (2012)**: Der neue Daily Electric.
http://www.iveco.com/Germany/collections/catalogues/Documents/Neue_Materialien_DE/Daily_Electric.pdf Stand: 10.07.2014
- ³⁵ **SCHUSTER A. (2009)**: Eigenschaften heutiger Batterie- und Wasserstoffspeichersysteme für eine nachhaltige elektrische Mobilität. http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_180875.pdf Stand: 10.07.2014
- ³⁶ **DB SCHENKER (2012)**: DB Schenker setzt mit Erdgas-Lkw ein ‚grünes‘ Zeichen in Oberösterreich.
<http://ebusiness.schenker.at/newsletter/at/de/newsletter/newsletter/id/111/backto/a2012/year/2012> Stand: 10.07.2014

-
- ³⁷ **INTERNATIONALE TRANSPORT REVUE (2013):** „Der Kunde wünscht grüne Lkw“
<http://www.firmenflotte.at/epapers/836487/files/assets/seo/page24.html> Stand: 10.07.2014
- ³⁸ **KÖGEL (2012):** Kögel Trailer mit CNG-Modul: bis zu 70 Prozent weniger CO₂-Ausstoß nun auch im Regional- und Fernverkehr möglich. <http://www.koegel.com/de/news/artikel/datum/2012/06/28/koegel-trailer-mit-cng-modul-bis-zu-70-prozent-weniger-co2-ausstoss-nun-auch-im-regional-und-fernverkehr/> Stand: 10.07.2014
- ³⁹ **MAN (o.J.) a:** Lion´s City. <http://www.bus.man.eu/global/de/stadtbusse/man-lions-city/uebersicht/Uebersicht.html>
Stand: 10.07.2014
- ⁴⁰ **MAN (o.J.) b:** Lion´s City Hybrid. <http://www.bus.man.eu/global/de/stadtbusse/man-lions-city-hybrid/technik/motor-und-getriebe/Motor-und-Getriebe.html> Stand: 10.07.2014
- ⁴¹ **MAN (2013):** Geschäftsbericht. <http://www.corporate.man.eu/de/investor-relations/finanzberichte-und-publikationen/berichte/Berichte.jsp> Stand: 10.07.2014
- ⁴² **MAN (2012):** MAN Metropolis fährt flüsterleise und emissionsfrei in der Stadt – progressives Konzept eines schweren Hybrid-Lkw. http://www.corporate.man.eu/de/presse-und-medien/pressecenter/MAN-Metropolis-faehrt-fluesterleise-und-emissionsfrei-in-der-Stadt-_progressives-Konzept-eines-schweren-Hybrid-Lkw-20864.html
Stand: 10.07.2014
- ⁴³ **MERCEDES-BENZ (o.J.):** Erdgas – ein Kraftstoff, der sich nicht nur für die Umwelt bezahlt macht.
http://www.mercedes-benz.at/content/austria/mpc/mpc_austria_website/de/home_mpc/van/home/vans_world/blueefficiency/technologies/ngt.html Stand: 10.07.2014
- ⁴⁴ **MERCEDES-BENZ (2011):** Der Mercedes-Benz Econic NGT. http://www.special-trucks.eu/webspecial_econic-ngt/de/ Stand: 10.07.2014
- ⁴⁵ **DAIMLER (o.J.):** Brennstoffzelle – Elektromobilität mit großer Reichweite. <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1228969-49-1401155-1-0-0-1401206-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0.html> Stand: 10.07.2014
- ⁴⁶ **OPEL (2014):** Opel Combo Kastenwagen.
http://www.opel.at/content/dam/Opel/Europe/austria/nscwebsite/de/01_Vehicles/02_CommercialCars/New_Combi/04_EquipmentTechnicalData/Opel-Combo-Katalog.pdf Stand: 10.07.2014
- ⁴⁷ **PEUGEOT (o.J.):** Ein elektrisierender Partner. <http://professional.peugeot.de/partner-electric/> Stand: 10.07.2014
- ⁴⁸ **CITROEN (o.J.):** Der neue Citroen Berlingo Electricque: Weltpremiere auf der IAA Nutzfahrzeuge.
<http://www.citroen.at/news/neuer-berlingo-electrique/#/news/neuer-berlingo-electrique/> Stand: 10.07.2014
- ⁴⁹ **RENAULT (o.J.):** Neuer Kagoo Z.E.. <http://www.renault-ze.at/> Stand: 10.07.2014
- ⁵⁰ **RENAULT (2011):** alternative Energies: Renault Trucks extends its clean tech natural gas range with the premium distribution NGV. <http://corporate.renault-trucks.com/en/press-releases/energies-alternatives-renault-trucks-elargit-sa-gamme-clean-tech-natural-kjx.html> Stand: 10.07.2014
- ⁵¹ **SCANIA (2011):** Scania Citywide LF und LE – eine neue Familie von Stadt- und Überlandbussen.
http://www.scania.at/Images/P11Xo2DE_Scania%20Citywide_tcm114-280119.pdf Stand: 10.07.2014
- ⁵² **SIEMENS (2013):** Elektrobuss der Wiener Linien.
<http://www.siemens.com/press/pool/de/events/2013/infrastructure-cities/2013-03-UITP-PK/hintergrund-ebus-wiener-linien-d.pdf> Stand: 10.07.2014
- ⁵³ **SMITH ELECTRIC (o.J.):** Smith Newton – Der weltweit meistverkaufte vollständig elektrische Lkw.
http://www.smithelectric.com/wp-content/themes/barebones/pdfs/Newton_Brochure_2011_German.pdf Stand: 05.08.2014
- ⁵⁴ **SOLARMOBIL (o.J.):** Projekt Solarbus. <http://www.solarmobil.at/> Stand: 10.07.2014

-
- ⁵⁵ **SOLARISBUS (o.J.):** Urbino. http://www.solaribus.com/vehicles_group/urbino Stand: 10.07.2014
- ⁵⁶ **OMNIBUSREVUE (2014):** SWM/MVG testen weiteren Elektrobüs. <http://www.omnibusrevue.de/swm-mvg-testen-weiteren-elektrobüs-1325583.html> Stand: 10.07.2014
- ⁵⁷ **VW (2013):** Produktbroschüre Caddy. <http://www.vw-nutzfahrzeuge.at/modelle/caddy/infomaterial> Stand: 10.07.2014
- ⁵⁸ **VOLVO (o.J.) a:** Der Volvo FM Methan-Diesel, leistungsstark und nachhaltig. <http://www.volvo Trucks.com/trucks/germany-market/de-de/trucks/volvo-fm-methanediesel/Pages/volvo-fm-methanediesel.aspx> Stand: 10.07.2014
- ⁵⁹ **VOLVO (o.J.) b:** Die Baureihe von Volvo 7900 – Bring Sie voran. <http://www.volvobuses.com/bus/germany/de-de/products/stadtbusse/Volvo-7900-Baureihe/Pages/Die%20Baureihe%20Volvo%207900.aspx> Stand: 10.07.2014
- ⁶⁰ **VOSSLOH (o.J.):** Produkte und Services. http://www.vossloh-locomotives.com/de/products_and_services/diesel-hydraulic_locomotives/de12_de18/de12_de18.html Stand: 28.07.2014
- ⁶¹ **NEWS (o.J.):** www.news-fp7.eu Stand: 10.08.2014
- ⁶² **WIKIPEDIA (2010):** Lufthansa Cargo MD11 Beladung, http://de.wikipedia.org/wiki/Frachtflugzeug#mediaviewer/Datei:Lufthansa_Cargo_MD11_Beladung.JPG Stand: 17.06.2014
- ⁶³ **LUFTHANSA (o.J.):** Lufthansa Cargo Gruppe – Dienstleister, http://lufthansa-cargo.com/de_de/meta/meta/unternehmen/lufthansa-cargo-group/ Stand: 18.06.2014
- ⁶⁴ **AUSTRIANWINGS (2011):** Kühl- und Heizcontainer http://www.austrianwings.info/wp-content/uploads/2011/07/envirocontainer_emirats_credit_emirates.jpg Stand: 16.06.2014
- ⁶⁵ **WIKIPEDIA (2002):** Airbus A300 cross section, http://de.wikipedia.org/wiki/Frachtflugzeug#mediaviewer/Datei:Airbus_A300_cross_section.jpg Stand: 17.06.2014
- ⁶⁶ **BOEING (o.J.):** Provides superior Payload-Range Capability, http://www.newairplane.com/777/design_highlights/#/freighter/payload-range Stand: 18.06.2014
- ⁶⁷ **WIKIPEDIA (2007):** BELUGA 3, http://de.wikipedia.org/wiki/Frachtflugzeug#mediaviewer/Datei:Beluga_n3.jpg Stand: 12.06.2014
- ⁶⁸ **WIKIPEDIA (2009):** B747LCF Dreamlifter, http://de.wikipedia.org/wiki/Boeing_747#mediaviewer/Datei:B747LCF_Dreamlifter.jpg Stand: 12.06.2014
- ⁶⁹⁶⁹ **ASFINAG (2014):** Dauerzählstellen. <http://www.asfinag.at/unterwegs/dauerzaehlstellen> Stand: 07.07.2014

Impressum



Herausgeber und Programmverantwortung Mobilität der Zukunft

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung III/I4 – Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
1030 Wien, Radetzkystraße 2
Ansprechpartnerin Gütermobilität: DI (FH) Sarah Krautsack
Tel.: +43 (0)1 7116265 - 3211
E-Mail: Sarah.Krautsack@bmvit.gv.at
Website: www.bmvit.gv.at

Für den Inhalt verantwortlich

arp – planning.consulting.research
1090 Wien, Alser Straße 34/33
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Dr. rer. nat. Heinz DÖRR
Tel.: +43 (0)1 319 67 82
E-Mail: heinz.doerr@arp.co.at
Website: www.arp.co.at



AVL List GmbH
8020 Graz, Hans-List-Platz 1
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Dr. Peter PRENNINGER
Tel.: +43 (0)316 787-1484
E-Mail: peter.prenninger@avl.com
Website: www.avl.com



TU Wien – Department für Raumplanung –
Fachbereich Verkehrssystemplanung
1040 Wien, Erzherzog-Johann-Platz 1/280-5
Ansprechpartner: Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.
Bardo HÖRL
Tel.: +43 (0)1 58801 26916
E-Mail: bardo.hoerl@tuwien.ac.at
Website: <http://info.tuwien.ac.at/ivs/>



EnergyComment
22337 Hamburg,
Fuhlsbüttler Straße 584
Ansprechpartner: Dr. Steffen BUKOLD
Tel.: +49 (0)40 20911848
Email: bukold@energycomment.de
Website: www.energycomment.de



Programmmanagement Mobilität der Zukunft

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
1090 Wien, Sensengasse 1
Ansprechpartnerin Gütermobilität:
Mag.(FH) Nicole Prikoszovits
Tel.: +43 (0) 57755 5063
E-Mail: nicole.prikoszovits@ffg.at
Website: www.ffg.at

Mitglieder des Beirats

Dipl.-Ing. Christian Bauer
TU Wien, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

Mag. Dr. Andreas Dorda
bmvit, Abteilung III / I 4 - Mobilitäts- und Verkehrstechnologien & Austrian Agency for Alternative Propulsion (A3PS)

Mag. Ing. Renald Kern
Magna Steyr Engineering AG & Co KG

Dipl.-Ing. Andrea Kinsperger
Magistrat der Stadt Wien, MA20

Dipl. Ing. Wolfgang Kriegler
Magna Steyr Engineering AG & Co KG

Ing. Robert Modliba
Österreichische Post AG

Dipl.-Ing. Gottfried Raab
MAN Nutzfahrzeuge Österreich AG

Dir. Alexander Schaffer
Schenker & CO AG, Wien

Dipl.-Ing. Franz Schwammenhöfer
bmvit, Abteilung II / Infra 4 - Gesamtverkehr

Dipl.-Ing. Mag. Josef Siligan
Linz Service GmbH – Hafen

Mag. Oliver Wagner
Zentralverband für Spedition & Logistik

Danksagung

Die BearbeiterInnen bedanken sich vielmals bei den Mitgliedern des Beirates für die zahlreichen Anregungen und Hinweise im Zuge der F&E-Dienstleistung EFLOG.