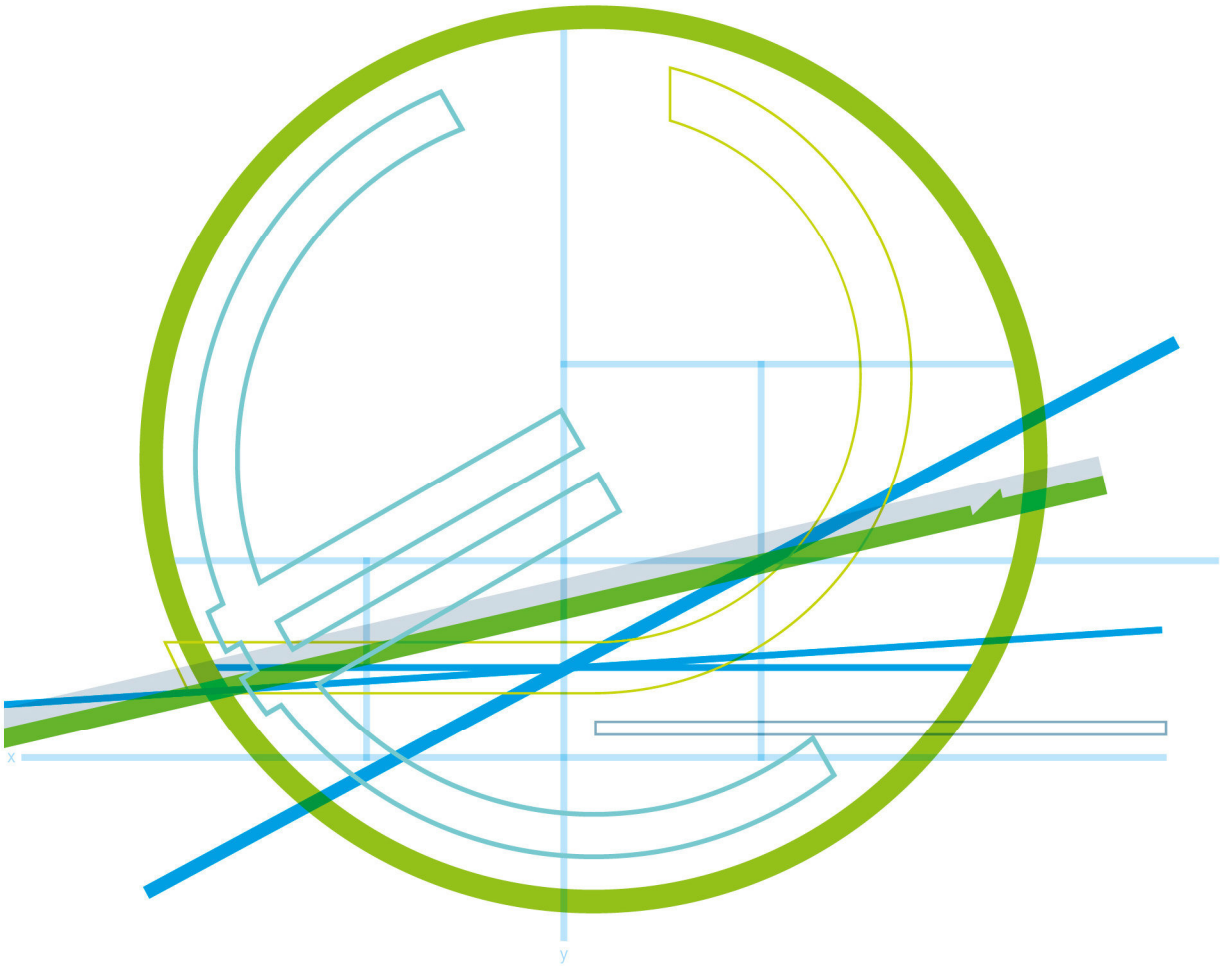
Blue Globe Foresight
Studie #5/2013

STREET 2030

Street-section specific Energy, Emission and Transport model 2030



Nikolaus Ibesich et al.

VORWORT

Die Publikationsreihe BLUE GLOBE REPORT macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

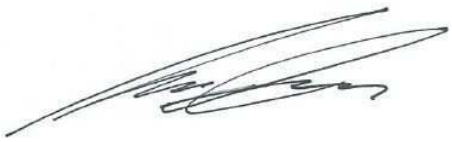
Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem BLUE GLOBE REPORT informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der BLUE GLOBE REPORT wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds



Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Zusammenfassung

Ausgangssituation/Motivation des Projektes

Der Verkehrssektor ist ein bedeutender Sektor für Energieeinsatz und Treibhausgasemissionen in Österreich. Neben der absoluten Höhe der Emissionen sind die jährlichen Zuwachsraten im Vergleich zu anderen Sektoren (Industrie, Haushalte etc.) besonders hoch; Trendänderungen sind jedoch nur mittel- bis langfristig realisierbar, weshalb die Modellierung von Maßnahmenwirkungen zunehmend wichtiger wird.
Das Umweltbundesamt hat gegenüber der UNFCCC und der EU Berichtspflichten betreffend Treibhausgase und Luftschadstoffe zu erfüllen. Weiters werden für die EU und nationale Strategien Prognosen bis zumindest 2020 gefordert. Das Umweltbundesamt muss als akkreditierte Überwachungsstelle eine lückenlos nachvollziehbare, exakte und vollständige Treibhausgasinventur sicherstellen.

Zielsetzungen des Projektes

Nach Fertigstellung des Projekts steht ein maßnahmensensitives Prognosewerkzeug zur Verfügung, mit dem die nationalen Verkehrsemissionen den einzelnen Bundesländern entsprechend den Verkehrsaktivitäten zugewiesen werden können. Berücksichtigt werden neben dem Straßen- und Bahn- auch der Schiffsverkehr. Bei den Emissionen werden neben den direkten auch die vorgelagerten Prozessemissionen bestimmt, die bei der Herstellung, der Verarbeitung und dem Transport der Kraftstoffe freigesetzt werden. Somit können der kumulierte Energieeinsatz und die direkten sowie die gesamten durch Verkehrsprozesse hervorgerufenen Treibhausgasemissionen abgebildet werden. Dies ist eine notwendige Voraussetzung, um etwa die Umwelteffekte des Straßenverkehrs mit jenen des Bahnverkehrs vergleichen zu können oder etwa die Emissionseffekte des Einsatzes von Elektrofahrzeugen zu bewerten.
Die Ausgangsdaten und die Resultate der Modellierung werden in ein GIS System eingespielt, um die Energie- und Emissionsdaten georeferenziert darstellen zu können. Diese Information gibt Aufschluss über die Verortung des Verkehrsgeschehens sowie der Emissionen und stellt eine wesentliche Grundlageninformation der Maßnahmenbeurteilung dar.

Aufbau und Methode des Projektes

Verkehrsmodellierung

Zur Berechnung der Verkehrsmengen im Personen- und Güterverkehr wird auf das bestehende „Verkehrsmodell Österreich 2025+“ (VMÖ)[1] zurückgegriffen, welches entsprechend der Anforderungen partiell verfeinert (Netz, ÖV-Angebot, Zonierung) und aktualisiert wird. Die Verfeinerung wird sich am Ziel der „bundesländerscharfen“ Abbildung orientieren und wird nicht das Niveau von regionalen Modellen erreichen. Mit dem VMÖ werden die ermittelten ÖV- und Pkw-Wege auf das implementierte Verkehrsangebot als Fahrten umgelegt. Durch die Umlegung der Fahrtenmatrizen wird die streckenspezifische Verkehrsbelastung am Netz ermittelt, was wiederum als Grundlage für die Ermittlung des Energieeinsatzes, der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen im Verkehrssektor dient.

Energie- und Emissionsmodellierung

Das dafür entwickelte Verbrauchs- und Emissionsmodell ermöglicht eine detaillierte Abbildung der österreichischen Fahrzeugflotte, des Fahrverhaltens und der zugehörigen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren.

Räumliche Darstellung im GIS

Die Ergebnisse aus der Verkehrs- und Emissionsmodellierung werden in ein GIS System eingespielt, um die Verteilung von Verkehrsgeschehen und den daraus resultierenden Energieverbrauch sowie Emissionen räumlich darstellen zu können.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass der verfolgte Ansatz – die Modellkette Verkehrsmodell-Emissionsmodelle-GIS-Analyse/-Visualisierung – für die Berechnung des Energieeinsatzes und der Emissionen des Verkehrssektors sowie die Bewertung von Maßnahmen funktioniert und sinnvolle Analyseergebnisse liefert. Die dafür notwendigen Strukturen wurden entwickelt und die Modellkette wurde exemplarisch anhand der Daten des Verkehrsmodells der Stadt Wien-MA18 erprobt.
Es hat sich herausgestellt, dass die Anpassung des Netzmodells und die Erstellung des Masternetzes nicht, wie ursprünglich im Antrag dargelegt, erfolgen konnten. Für die Verfeinerung des Netzmodells wurden während des Projekts verschiedene Ansätze verfolgt und - gut begründet - die Verwendung unterschiedlicher Datengrundlagen (kommerzielle Graphen, GIP Österreich, GIP Ostregion) angestrebt. Die Entscheidungen, auf Basis welches Netzgraphen und auf welchem Planungsraum gearbeitet werden sollte, musste mehrfach an die gewonnen Erkenntnisse, den tatsächlich zur Verfügung gestellten Daten bzw. entsprechend der Zeitachse angepasst werden.

[1] BMVIT (Hrg. 2009): Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Abt. V / INFRA 5 Internationale Netze und GVP-Ö: Verkehrsprognose Österreich 2025+, Endbericht

Schlussendlich konnte das Verkehrsmodell Österreich nicht für STREET 2030 angepasst werden und die Modellstruktur von STREET wurde anhand von Daten aus dem Verkehrsmodell der Stadt Wien-MA18 demonstriert.
Demgegenüber konnte das Energie- und Emissionsmodell wie geplant entwickelt werden.
Um die im Antrag dargelegte Modellkette – Verkehrsmodell-Emissionsmodelle-GIS-Analyse/-Visualisierung – dennoch zeigen zu können, wurde als Verkehrsinput auf das Verkehrsmodell der Stadt Wien – MA18 zurückgegriffen.

Ausblick und Resümee

Folgende Erkenntnisse lassen sich ableiten:

- Die Ausweitung bestehender Emissionsmodelle um zukünftige Antriebs- und Energietechnologien sowie die Erstellung von Szenarien für Energie- und Emissionsentwicklung ist modelltechnisch gut durchführbar
- Schiffs- und Bahnverkehr lassen sich gut in die Straßenverkehrsmodellierung integrieren, womit (unter der Voraussetzung entsprechender Verkehrsmodelle) eine Bewertung verkehrsverlagernder Maßnahmen und Effekte möglich ist.
- In einer Verknüpfung von Verkehrsmodellierung mit einer nachfolgenden Emissionsmodellierung muss in der Erstellung des Verkehrsmodells bereits besondere Aufmerksamkeit auf die Anforderungen der Emissionsberechnung gelegt werden.
- Es hat sich gezeigt, dass die Anforderungen an Verkehrsmodelle für diese Anwendung sehr hoch sind und dass viele bestehende Modelle nicht ohne Adaptierung bzw. Nachkalibrierung als Grundlage für die Energie- und Emissionsmodellierung verwendet werden können. In Zukunft sollten die Anforderungen der Emissionsmodellierung schon bei der Entwicklung bzw. bei der Aktualisierung von bestehenden Modellen berücksichtigt werden.
- Für die Anwendung der Modellkette auf Bundesebene fehlt derzeit ein einheitliches und räumlich ausreichend detailliertes Verkehrsmodell. Bei der Überarbeitung und Verfeinerung des Netzmodells des „Verkehrsmodell Österreich“, die in Zukunft sehr wahrscheinlich auf dem Graphen der GIP aufsetzen wird, sollten die Empfehlungen für die Energie- und Emissionsmodellierung (vgl. Kapitel 8) jedenfalls berücksichtigt werden.
- Eine modellmäßige Quantifizierung der Marktannahme von verschiedenen Fahrzeugtechnologien als Funktion von Rahmenbedingungen wie Technologiekosten und Energiekosten ist derzeit noch nicht vollständig gelöst. Daher müssen nach derzeitigem Wissenstand diesbezügliche Szenarien mit nicht objektiven Methoden („expert judgement“) abgeschätzt werden.

Wie geht es weiter?

- Das im Rahmen von STREET 2030 erstellte Modell NEMO wird laufend in Projekten eingesetzt (z.B. in der nächsten Luftschadstoffinventur) und weiterentwickelt

- Die Erkenntnisse aus STREET 2030 für die Kalibrierung und Parametrisierung von Verkehrsmodellen, deren Ergebnisse auch für die Energie- und Emissionsmodellierung verwendet werden sollen, sowie die Ansätze für die Berechnung der Geschwindigkeiten werden in zukünftige Arbeiten an und mit Verkehrsmodellen einfließen.
- Erarbeitung eines Österreichweiten Verkehrsmodells und Anwendung der in STREET 2030 entwickelten Methode zur Energie- und Emissionsmodellierung.
- Mit diesem Modellansatz lassen sich alle Arten von Maßnahmen (ökonomische, fahrzeug- und kraftstofftechnische, verkehr- und raumplanerische, legislative, etc.) in ihrer zeitlichen Wirksamkeit evaluieren.

Ein derartiges Österreichweites Modell bietet somit die ideale Fachgrundlage zur Beurteilung und Bewertung bestehender Pläne und Programme zur Energie-, Treibhausgas- und Schadstoffreduktion, die Ergebnisse der Evaluierung können den umwelt- und verkehrspolitischen Zielsetzungen gegenüber gestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 8

1.1 Ausgangssituation/Motivation 8

1.1.1 Internationale Berichtspflichten 8

1.1.2 Akkreditierte Überwachungsstelle 9

1.1.3 Österreichische Luftschadstoff-Inventur 9

1.1.4 Bundesländerinventur 9

1.1.5 Szenarien 9

1.2 Zielsetzung 10

1.3 Einordnung in das Programm 10

1.4 Aufbau und Methode von STREET 2030 11

2 Verkehrsmodellierung (Komobile) 12

2.1 Anpassung des Netzmodells und der Zonierung 14

2.1.1 Erstellung eines Masternetzes 14

2.1.2 Implementierung des Bahn-Fahrplan 2010 15

2.1.3 Vorbereitungen für die Implementierung der Modellteile des Landesverkehrsmodell Oberösterreich 16

2.1.4 Vorbereitungen für die Implementierung des GIP-Netzes 18

2.1.5 Ermittlung der Streckenlängsneigung für das Netzmodell des VMÖ 18

2.2 Aktualisierung der Strukturdaten im Inland 20

2.2.1 Bevölkerung (1.1.2011) 20

2.2.2 Motorisierungsgrad (31.12.2010) 20

2.2.3 Erwerbsstatistik (31.10.2008) 20

2.2.4 Zielpotentiale 21

2.3 Recherchen 21

2.3.1 Zonierung 21

2.3.2 Verfeinerung des Netzgraphen im angrenzenden Ausland 22

2.3.3 Verfeinerung des methodischen Ansatzes zur Modellierung des Zellbinnenverkehrs 22

2.3.4 Abbildung des Eisenbahngüterverkehrs am Netz des VMÖ 23

2.3.5 Alternative Verkehrsmodelldaten zur Demonstration der Emissionsmodelle 24

2.4 Entwicklung der Methode zur Berechnung der emissionsmodellierungs-relevanten Geschwindigkeit 25

2.5 Definition der Schnittstellen zwischen dem Verkehrsmodell und den Emissionsmodellen 29

2.5.1 Hochrechnung der Werktagsverkehre auf Jahreswerte 29

2.6 Aufbereitung der Verkehrsmodelldaten für die Energie- und Emissionsmodellierung 30

2.6.1 Straßengebunde Verkehrsmittel 30

2.6.2 Schienengebundene Verkehrsmittel 37
3 Das Emissionsmodell NEMO 39
3.1 NEMO-Road 39
3.1.1 Aktualisierung der Modellbedatung für konventionelle Antriebstechnologien 41
3.1.2 Vervollständigung der Fahrzeugkategorien 43
3.1.3 Berücksichtigung des Alterungseinflusses auf das Emissionsverhalten 44
3.1.4 Vorgabe einer Verteilung an verfahrenen Kraftstoffen je Fahrzeug- und Antriebskategorie 44
3.1.5 Parametrierung von Kraftstoffverbrauch und CO2-Ausstoß anhand Daten aus dem CO2-Monitoring der Neuzulassungen 45
3.1.6 Verdunstungsemissionen 45
3.1.7 Abbildung zukünftiger Antriebstechnologien 46
3.1.8 Koppelung Emissionsmodell – Verkehrsmodell 48
3.2 NEMO-Rail 49
3.2.1 Das Modell RECEM 49
3.2.2 Abbildung des Schienenverkehrs in Österreich durch die Modellkette RECEM – NEMO-Rail 52
3.3 NEMO-Ship 55
4 GEMIS 57
4.1 GEMIS 57
4.2 Emissionsfaktoren 58
4.2.1 Zusammenfassung EFA: 60
4.3 Schnittstelle zu Emissionsmodell 63
5 Plannullfall (BAU) und Szenarien 64
5.1 Definition des Plannullfalls 64
5.2 Szenario Forcierung der Elektromobilität 67
5.2.1 Direkte Emissionen: 67
5.2.2 Vorgelagerte Emissionen 67
5.3 Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen 69
6 Ergebnisdarstellung im GIS 70
6.1 ArcGIS 70
6.2 Schnittstelle zu Emissionsmodell und Methodik 70
7 Ergebnisse und Schlussfolgerungen 71
7.1 Die Modellkette im Detail 71
7.1.1 Input Verkehrsmodell 71
7.1.2 Output Verkehrsmodell 72
7.1.3 Input Emissionsmodell 72
7.1.4 Output Emissionsmodell 73

7.1.5 Input GEMIS 73
7.1.6 Input GIS 74
7.2 Zugrundeliegendes Straßennetzwerk 75
7.3 Verkehrsmengen 76
7.4 Energie 77
7.5 Direkte Emissionen 81
7.5.1 Ergebnisse für alle Straßen - Fahrzeugkategorien 81
7.5.2 Ergebnisse im Netzwerk 84
7.5.3 Business as usual (BAU) in den Jahren 2011 bis 2030 für NOx 91
7.6 Vorgelagerte Emissionen 95
7.7 Gesamtemissionen 99
7.7.1 BAU 99
7.7.2 Szenario Forcierung der Elektromobilität mit Österreichischem Strommix 102
7.7.3 Szenario Forcierung der Elektromobilität mit Ökostrom 104
7.7.4 Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen 106
7.7.5 Direkter Vergleich der Szenarien 109
8 Ausblick und Empfehlungen 110
8.1 Verkehrsmodellierung als Grundlage für die nationale, streckenbasierte Energie- und Emissionsmodellierung 110
8.2 Generelle Anforderungen an Verkehrsmodelle für die streckenbasierte Energie- und Emissionsmodellierung 111
8.3 Implementierung eines Inventurmodus 113
9 Literaturverzeichnis 115
10 Abbildungsverzeichnis 118
11 Tabellenverzeichnis 121
12 Projektkonsortium 122
13 Anhang 123
13.1 Technologische Entwicklung (AP3) 123
13.1.1 Einleitung 123
13.1.2 Technologische Antriebsentwicklungen 123
13.1.3 Hybridfahrzeuge (HEV, Hybrid Electric Vehicles) 124
13.1.4 Einsatzgebiete von alternativen Antrieben 133
13.1.5 Kraftstoff und Energiespeicher Entwicklung 138
13.1.6 Kosten der Antriebskonzepte 145
13.1.7 Prognosen für die Flottenentwicklung in den mit NEMO gerechneten Szenarien 151
13.1.8 Literaturverzeichnis für den Anhang „Technologische Entwicklung“ (AP3) 156

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation/Motivation

Der Verkehrssektor ist ein bedeutender Sektor für Energieeinsatz und Treibhausgasemissionen in Österreich. Neben der absoluten Höhe der Emissionen sind die jährlichen Zuwachsraten im Vergleich zu anderen Sektoren (Industrie, Haushalte etc.) besonders hoch; Trendänderungen sind jedoch nur mittel- bis langfristig realisierbar, weshalb die Modellierung von Maßnahmenwirkungen zunehmend wichtiger wird.
Das Umweltbundesamt hat gegenüber der UNFCCC und der EU Berichtspflichten betreffend Treibhausgase und Luftschadstoffe zu erfüllen. Weiters werden für die EU und nationale Strategien Prognosen bis zumindest 2030 gefordert. Das Umweltbundesamt muss als akkreditierte Überwachungsstelle eine lückenlos nachvollziehbare, exakte und vollständige Treibhausgasinventur sicherstellen.

1.1.1 Internationale Berichtspflichten

1.1.1.1 Kyoto Protokoll

Zur Stabilisierung der Treibhausgasemissionen wurde 1992 die UN-Klimarahmenkonvention (UN Framework Convention on Climate Change - UNFCCC) beschlossen. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), auch als Weltklimarat bezeichnet, wurde 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) ins Leben gerufen. Hauptaufgabe des der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) beigeordneten Ausschusses ist es, Risiken der globalen Erwärmung zu beurteilen und Vermeidungsstrategien zusammenzutragen. 1997 wurden im Kyoto-Protokoll zum ersten Mal konkrete und verbindliche Reduktionsverpflichtungen festgelegt. Demnach müssen die Industrieländer im Zeitraum von 2008 bis 2012 ihre Emissionen der sechs wichtigsten Treibhausgase gegenüber 1990 (für F-Gase 1995) um rund 5% reduzieren. Für Entwicklungsländer sind keine derartigen Verpflichtungen vorgesehen.
In der Entscheidung Nr. 280/2004/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über ein System zur Überwachung der Treibhausgasemissionen in der Gemeinschaft ist die Umsetzung des Kyoto-Protokolls geregelt. Luftemissionen sowie Methodik entsprechen den einschlägigen Richtlinien des IPCC.

Die erste Kyoto-Verpflichtungsperiode lief Ende 2012 aus. Eine Einigung über eine Folgeperiode 2013-2020 sowie über einen Fahrplan zur Annahme eines neuen globalen Klimaabkommens wurde bei der 8. Vertragsstaatenkonferenz des Klimarahmenübereinkommens in Doha (2012) erzielt.

1.1.1.2 Luftschadstoffe

Das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (Convention on long-range transboundary air pollution, CLRTAP) der UNO-Wirtschaftskommission für Europa (UNECE)

wurde 1979 in Genf beschlossen und ist 1983 in Kraft getreten. Es umfasst acht Protokolle zur Reduktion von Luftschadstoffen.
Die EG-Richtlinie 2001/81/EG regelt nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe.
Mit dem "Informative Inventory Report" des Umweltbundesamtes erfüllt Österreich die Anforderungen an die Dokumentation hinsichtlich Transparenz und Nachvollziehbarkeit, die für die Berichterstattung zum Genfer Luftreinhalteübereinkommen (LRTAP - Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) - kurz UNECE/LRTAP Convention - notwendig sind.

1.1.2 Akkreditierte Überwachungsstelle

Das Umweltbundesamt ist seit 25. Jänner 2006 weltweit als erste Organisation für die Erstellung der Treibhausgasinventur nach EN ISO/IEC 17020 akkreditiert.
Seit der Einführung des Emissionshandels 2005 sind Treibhausgasemissionen auch ein finanzieller Faktor.

Akkreditierte Inspektionsstelle Nr. 241
GZ. BMWA-92.715/0038-I/12/2005.

Das nationale Inventursystem soll eine lückenlos nachvollziehbare, exakte und vollständige Treibhausgasinventur sicherzustellen.

1.1.3 Österreichische Luftschadstoff-Inventur

Dem Umweltbundesamt ist laut Umweltkontrollgesetz §6 (2) Z.15 die Erstellung von Emissionsbilanzen zur Erfüllung der internationalen Berichtspflichten übertragen.
Im Rahmen der Österreichischen Luftschadstoff-Inventur (OLI) werden die Emissionen nach internationalen Richtlinien erhoben und gemäß internationalen Formaten berichtet.

1.1.4 Bundesländerinventur

Bundesländer Luftschadstoff-Inventur (BLI): Regionalisierung der nationalen Emissionsdaten auf Ebene der Bundesländer. Die Methodik orientiert sich an den Standardregeln der internationalen Emissionsberichterstattung.
Die Zuordnung bei den Flächenquellen geschieht mittels Aktivitäten und statistischen Hilfsgrößen.
Die bedeutendsten Regionalisierungsparameter energiebedingter Emissionen stellen Daten aus den Bundesländer-Energiebilanzen der Statistik Austria dar.
Im Gegensatz zur OLI, wo Österreich als Ganzes dargestellt wird, werden die Emissionen hier auf Bundesländer Niveau heruntergebrochen. Für die Verkehrsemissionen sind die Bundesländer-Energiebilanzen nur bedingt aussagekräftig. Hier wird seit Jahren versucht, die Emissionen auf Basis der tatsächlichen Fahrleistung darzustellen. Hierfür soll speziell dieses Projekt entsprechende Grundlagen bzw. Analysen liefern.

1.1.5 Szenarien

Das Umweltbundesamt erstellt regelmäßig Szenarien über die Entwicklung von österreichischen Treibhausgas-und Luftschadstoff-Emissionen, die als Grundlage zur Erfüllung der EU-Berichtspflicht im

Rahmen des Monitoring Mechanisms herangezogen werden (BAU/WM/WAM Szenarien plus Sensitivitätsanalysen).
Weiters werden in regelmäßigen Abständen Trendanalysen durchgeführt, sowie Grundlagen für politische Strategien, wie Klimastrategie, Energiestrategie und Klimaschutzgesetz, erarbeitet.
Da Trendänderungen nur mittel- bis langfristig realisierbar sind, müssen Maßnahmenwirkungen langfristig modelliert werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel des im Rahmen des KLIEN geförderten Projekts ist es, ein Tool zur Regionalisierung der Verkehrsemissionen zu entwickeln und damit eine fundierte Grundlage für Entscheidungen in der Energie- und Klimapolitik Österreichs zur Verfügung zu stellen.
Zu diesem Zweck wird eine maßnahmensensitive Modellkette von der Verkehrsmodellierung über die Emissionsmodellierung (direkte und vorgelagerte Emissionen) bis hin zur Visualisierung der Ergebnisse auf regionaler Ebene entwickelt.
Berücksichtigt wird neben dem Straßen- und Bahn- auch der Schiffsverkehr. Bei den Emissionen werden neben den direkten auch die vorgelagerten Prozessemissionen bestimmt, die bei der Herstellung, der Verarbeitung und dem Transport der Kraftstoffe freigesetzt werden. Somit können der kumulierte Energieeinsatz und die direkten sowie die gesamten durch Verkehrsprozesse hervorgerufenen Treibhausgasemissionen abgebildet werden. Dies ist eine notwendige Voraussetzung, um etwa die Umwelteffekte des Straßenverkehrs mit jenen des Bahnverkehrs vergleichen zu können oder etwa die Emissionseffekte des Einsatzes von Elektrofahrzeugen zu bewerten.
Die Ausgangsdaten und die Resultate der Modellierung werden in ein GIS System eingespielt, um die Energie- und Emissionsdaten georeferenziert darstellen zu können. Diese Information gibt Aufschluss über die Verortung des Verkehrsgeschehens sowie der direkten Emissionen und stellt eine wesentliche Grundlageninformation der Maßnahmenbeurteilung dar.
Maßnahmen und Maßnahmenbündel zur Senkung von Energieverbrauch und/oder Schadstoff- und/oder Treibhausgasemissionen sollen kombiniert und auch in Verbindung mit anderen Planungsaspekten (Infrastrukturerweiterungen, Preissteigerungen bei Energien, zukünftige Fahrzeug- und Antriebstechnologien) auf regionaler Ebene abgebildet werden können.

1.3 Einordnung in das Programm

NEUE ENERGIEN 2020, 3. Ausschreibung 2009, ist das Forschungs- und Technologieprogramm des Klima- und Energiefonds. Es baut auf den Ergebnissen des Strategieprozesses ENERGIE 2050 auf, setzt thematische Linien der Ausschreibungen Neue Energien 2020 1. und 2. Ausschreibung fort und berücksichtigt die besonderen Anliegen und Schwerpunktsetzungen des Klima- und Energiefonds.
Das Programm unterstützt besonders die Erreichung der österreichischen Energie- und Klimaziele der EU für 2020.

Das Ziel von STREET 2030 ist es eine strategische Entscheidungsgrundlage für die Österreichische Technologie-, Klima- und Energiepolitik zu entwickeln und ist als Grundlagenforschung einzustufen.

1.4 Aufbau und Methode von STREET 2030

1. Verkehrsmodellierung

Zur Berechnung der Verkehrsmengen im Personen- und Güterverkehr wird auf das bestehende „Verkehrsmodell Österreich 2025+“ (VMÖ) zurückgegriffen, welches entsprechend der Anforderungen partiell verfeinert (Netz, ÖV-Angebot, Zonierung) und aktualisiert wird. Die Verfeinerung wird sich am Ziel der „bundesländerscharfen“ Abbildung orientieren und wird nicht das Niveau von regionalen Modellen erreichen.

Mit dem VMÖ wird auf Basis von Bevölkerungsdaten und räumlichen Nutzungsdaten die Zahl der Wege aller Verkehrsmittel (Fuß, Rad, ÖV, Pkw-Fahrer und Pkw-Mitfahrer) auf der Aggregationsebene Gemeinde – in Ballungsräumen entsprechend kleinere Einheiten – berechnet und die ermittelten ÖV- und Pkw-Wege werden auf das implementierte Verkehrsangebot als Fahrten umgelegt.

Durch die Umlegung der Fahrtenmatrizen wird die streckenspezifische Verkehrsbelastung am Netz ermittelt, was wiederum als Grundlage für die Ermittlung des Energieeinsatzes, der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen im Verkehrssektor dient.

2. Energie- und Emissionsmodellierung

Das dafür entwickelte Verbrauchs- und Emissionsmodell ermöglicht eine detaillierte Abbildung der österreichischen Fahrzeugflotte, des Fahrverhaltens und der zugehörigen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren.

3. Räumliche Darstellung im GIS

Die Ergebnisse aus der Verkehrs- und Emissionsmodellierung werden in ein GIS System eingespielt, um die Verteilung von Verkehrsgeschehen und den daraus resultierenden Energieverbrauch sowie Emissionen räumlich darstellen zu können.

2 Verkehrsmodellierung

Die Anforderungen an das Verkehrsmodell im Rahmen von STREET 2030 werden folgend aufgelistet und ergeben sich aus den erforderlichen Eingangsgrößen in die Energie- und Emissionsmodelle sowie der notwendigen Maßnahmensensitivität für die Szenarienrechnungen.

- Berechnung der Fahrleistung (Fahrzeugkilometer) für ganz Österreich
  - Differenziert nach Pkw und Lkw
  - Differenziert nach Straßenkategorie (Innerorts, Außerorts und Autobahn/Schnellstraße)
- Plausible Abbildung der Geschwindigkeiten im Netz
- Implementierung der Streckenlängsneigungen
- Verfeinerung des Netzmodells, um die Verkehrsemissionen zumindest auf Bundesländerniveau und Streckenkategorie dissaggregiert abbilden zu können
- Ausgabe der Fahrplanfahrten je Strecke im ÖV (Schiene und Straße)
- Das Modell muss den Individual- und öffentlichen Verkehr abbilden und maßnahmensensitiv sein.

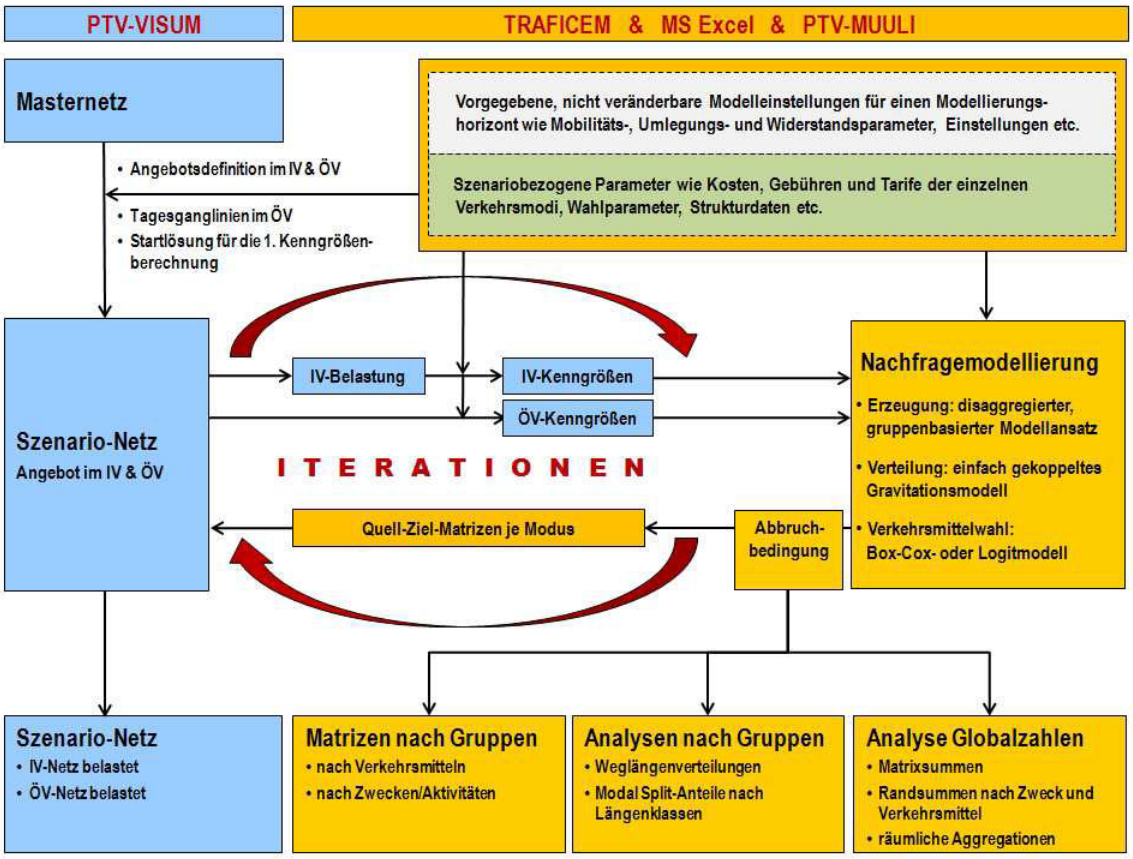


Abbildung 1: Modellstruktur TRAFICEM[2]

[2] Vgl. Obermayer C., Pfeiler D., Molitor R.: TRAFICEM - Eine Applikation für die Nachfragerechnung im Personenverkehr, die Steuerung des Vierstufenalgorithmus und als Tool für das Datenmanagement; ÖVZ 4/2011

Aus diesen Anforderungen heraus sollte die bestehende Modellstruktur des „Verkehrsmodell Österreich 2025+“ (VMÖ)[3] mit dem Nachfragemodell TRAFICEM verwendet und adaptiert werden. Im Wesentlichen lassen sich die Anpassungen auf die Erstellung und Verfeinerung des Masternetzes, die Definition der Szenarien (Verkehrsangebot und sonstige Rahmenbedingungen) und die Anpassung der Ausgabedaten an die Schnittstellen zu den Emissionsmodellen zusammenfassen.

Die Anpassung des Netzmodells und die Erstellung des Masternetzes konnte nicht, wie ursprünglich im Antrag dargelegt, erfolgen und die Entscheidungen, auf Basis welches Netzgraphen und auf welchem Planungsraum gearbeitet werden soll, musste mehrfach an die gewonnen Erkenntnisse, die tatsächlich zur Verfügung gestellten Daten bzw. entsprechend der Zeitachse angepasst werden. Bei der Antragstellung war geplant, das Netzmodell auf Basis eines kommerziellen Graphen in und um die Ballungsräume zu verfeinern. Während der Projektlaufzeit wurde angeregt und dann angestrebt, das Netz auf Basis der Graphenintegrationsplattform Österreich (GIP)[4] zu verfeinern. Die Implementierung dieses Graphen ist bedeutend aufwändiger als die ursprünglich geplante Netzverfeinerung. Die damaligen allgemeinen Erwartungen an die GIP und der angekündigte Zeitplan für die Realisierung der GIP sowie der erwartbare Mehrwert für die spätere Verwendung und Aktualisierung des Netzmodells gegenüber den kommerziellen Graphen, haben das Bearbeitungsteam jedoch dazu veranlasst, diesen Mehraufwand in Kauf zu nehmen. Letztendlich konnte die GIP Österreich jedoch nicht verwendet werden. Als Alternative und als Test in der Anwendung der GIP in einem strategischen Verkehrsmodell wurde als dritter Pfad für die Netzerstellung in STREET die Implementierung der GIP der Ostregion, die die Länder Wien, Niederösterreich und Burgenland umfasst, angeregt und schließlich vereinbart. Der Graph der Zentralräume der anderen Bundesländer sollten auf Basis regionaler Verkehrsmodelle verfeinert werden. Die anschließende vertiefende Recherche hat ergeben, dass für diesen Lösungsansatz nur das Landesverkehrsmodell Oberösterreich verfügbar war. Dieser dritte Pfad konnte jedoch aufgrund des verbliebenen knappen Zeitbudgets für die Implementierung und die notwendigen Adaptierungen der GIP-Ostregion nicht beschritten werden und die Erarbeitung eines verfeinerten Netzmodells für STREET musste abgebrochen werden. Zur Demonstration der in STREET 2030 angestrebten Modellkette Verkehrsmodell-Emissionsmodelle-GIS konnten schließlich Daten aus dem Verkehrsmodell der Stadt Wien-MA18 verwendet und aufbereitet werden.
Der Entschluss, einen Arbeitsschritt durchzuführen oder gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan vor zu ziehen, wurde jeweils auf Basis des aktuellen Informationsstandes getroffen. Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten im Rahmen der Entwicklung des Verkehrsmodells beschrieben.

[3] BMVIT (Hrg. 2009): Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Abt. V / INFRA 5 Internationale Netze und GVP-Ö: Verkehrsprognose Österreich 2025+, Endbericht
[4] Vgl. www.gip.gv.at

2.1 Anpassung des Netzmodells und der Zonierung

Ziel des Projekt STREET 2030 ist es, das Verkehrsaufkommen so weit zu regionalisieren, dass zumindest auf Bundesländerniveau belastbare Aussagen über die Fahrleistung je emissionsmodellierungsrelevantem Streckentyp getroffen werden kann. Das im Rahmen des Projekts erarbeitete Netzmodell sollt so konzipiert und aufgebaut werden, dass es in der Folge vom BMVIT und den Ländern angewandt und für weitere Prognoserechnungen verwendet werden kann. Die damit verbundene Notwendigkeit der Netzverfeinerung und Zonendisaggregierung wird wie folgt determiniert:

- Der Anteil des modelltechnisch als Fahrleistung schwer abbildbaren Zellbinnenverkehrs soll möglichst klein werden, wodurch auch die Modellzonen klein werden müssen.
- Je detaillierter das Streckennetz vorliegt und die Streckenbelastungen dafür plausibel modelliert werden können, desto genauer kann die Emissionsmodellierung erfolgen. (Verkehrszusammensetzung, Geschwindigkeiten, Steigungen, …)
- Die Zonenstruktur muss mit der Netzdichte (Verkehrsangebot im Individualverkehr (IV) und Öffentlichen Verkehr (ÖV)) abgestimmt sein; dh, je feiner die Zonierung, desto detaillierter muss auch das Verkehrsangebot erhoben und implementiert werden.
- Die für die Modellierung erforderlichen Strukturdaten liegen aber nicht für jede beliebig kleine Zonierung vor. Die detailliertesten Daten sind für die Bevölkerung verfügbar (Gemeindeniveau und auch als 100x100-Meter-Rasterdaten), aber die zumindest ebenso wichtigen Daten für die Quell- und Zielpotentiale (Schulen, Arbeitsplätze, Einkaufs- und Freizeitpotentiale, etc.) liegen nur für wesentlich gröber räumliche Einheiten vor; zT nur auf Bundesländerniveau. Wird eine detaillierte Zonierung verwendet, müssen also bei der Verteilung der Strukturdaten Annahmen getroffen werden. Die feine Zonierung suggeriert also eine Abbildungsgenauigkeit, die die verfügbaren Strukturdaten gar nicht ermöglichen.
- Die Daten des Bestandsmodells müssen in der gewählten Detaillierung aktuell gehalten werden. Somit bestimmt die Netzauflösung maßgebend den Aufwand für die weiterführende Netzpflege.
- Für Prognosen müssen alle Eingangsdaten (Verkehrsangebot – bspw. ÖV-Angebot und Straßennetzqualitäten, Personengruppen, Zielpotentiale, etc.) in derselben Auflösung prognostiziert werden wie sie für das Bestandsmodell vorgegeben werden, was einen erheblichen Aufwand mit sich bringen kann.

Unter diesen Rahmenbedingungen wurde versucht, aus den zur Verfügung stehenden Daten die „optimale“ Modellauflösung zu finden.

2.1.1 Erstellung eines Masternetzes

Im Verkehrsmodell Österreich (VMÖ) ist für alle Prognosehorizonte von 2010 bis 2025 das zum Zeitpunkt der Modellerstellung geplante und beschlossene Verkehrsangebot in einem einheitlichen Standard eingearbeitet und bildet damit eine gute Grundlage für das Netzmodell von STREET 2030.
Das Verkehrsangebot wird darin für jeden Prognosehorizont in einer eigenen VISUM-Versionsdatei vorgehalten. In VISUM ist es nicht möglich, Informationen von einer Versionsdatei in eine andere zu

kopieren. Es ist aber möglich, in einer Versionsdatei mehrere Szenarien oder eben Prognosehorizonte vorzuhalten und daraus das für den jeweiligen Planfall relevante Verkehrsangebot automatisiert zu generieren. Diese Vorgehensweise wird als „Masternetzkonzept“ bezeichnet.
Das Netzmodell des VMÖ (Zonierung und Verkehrsangebot im IV und ÖV) muss im Rahmen von STREET 2030 sowohl für das Kalibrierungsjahr (2010) als auch für den Prognosehorizont (2030) verfeinert werden. Um diesen arbeitsaufwändigen Schritt nur einmal machen zu müssen wurden vor der geplanten Verfeinerung des Netzes alle Strecken samt routing-relevanten Informationen des IV und der gesamte ÖV-Fahrplan des Szenario 1[5] der beiden Prognosejahre 2010 und 2025 in eine Versionsdatei eingearbeitet. Zu Kontrolle wurden aus dem neu erstellten Masternetz beide Szenarien generiert und die Planfälle nach modelliert. Die Ergebnisse sind der beiden Szenarien praktisch identisch mit den Originalversionen des „Verkehrsmodell Österreich 2025+“. Das erstellte Masternetz kann also für weitere Anwendungen zur Verfügung gestellt werden.

Nach der Erstellung des Masternetzes war antragsgemäß geplant, das Netz in den und um die Ballungszentren auf Basis eines kommerziellen Graphen zu verfeinern und die Attributierungen gemäß dem tatsächlichen Verkehrsangebot 2010 bzw. den zu erwartenden Ausbauzuständen bis 2030 anzupassen.

2.1.2 Implementierung des Bahn-Fahrplan 2010

Das im Verkehrsmodell Österreich für 2010 eingearbeitete Verkehrsangebot ist aus Sicht der Modellerstellung eine Prognoseannahme. Um für die Modellkalibrierung die erhobene Verkehrsaktivität auf Basis des realen Verkehrsangebots modellieren zu können, wurde der tatsächliche Bahnfahrplan 2010 in das Netzmodell übernommen. Dieser wurde von der ÖBB Personenverkehr AG (ÖBB-PV) als VISUM-Export zur Verfügung gestellt und beinhaltet den gesamten Nahverkehr im Inland und dem angrenzenden Ausland sowie den gesamten, für Österreich relevanten Fernverkehr der privaten und staatlichen Bahnen.

Für den Import von Fahrplänen ist es zwingend erforderlich, dass die Attribut-IDs übereinstimmen. Die beiden Netzmodelle des BMVIT und der ÖBB-PV entstammen derselben Quelle, wurden in der Zwischenzeit jedoch getrennt weiter entwickelt, weshalb viele IDs nicht mehr übereinstimmen und in den beiden Netzen unterschiedliche Elemente erweitert wurden. Für den Abgleich der IDs und die Ergänzung der erforderlichen Netzelemente wurde ein VBA-Skript programmiert. Nach Angleichung der relevanten Attribute und IDs wurde schließlich der reale Fahrplan 2010 importiert. Die Prüfung des resultierenden Netzgraphen hat ergeben, dass alle Linien, Linienrouten, Servicefahrten und Fahrzeitprofile vollständig in das Netzmodell STREET 2030 übernommen werden konnten.

[5] Szenario 1 berücksichtigt eine konservative Entwicklung der Rahmenbedingungen und beschreibt langfristig eine Fortsetzung der bisherigen Entwicklungen; es bildet das Referenzszenario der Verkehrsprognose. Vgl. BMVIT (2009).

Da der schienengebundene Nahverkehr nur für Österreich und das angrenzende Ausland, nicht aber für das gesamte Gebiet des VMÖ übernommen werden konnte, mussten die Linien im Überlappungsbereich händisch den jeweiligen Szenarien zugewiesen werden.

Da für den untergeordneten ÖV keine aktuelleren Fahrplandaten zur Verfügung gestellt werden konnten, wurde das implementierte Angebot des VMÖ unverändert belassen

2.1.3 Vorbereitungen für die Implementierung der Modellteile des Landesverkehrsmodell Oberösterreich

Nachdem fest stand, dass die Netzverfeinerung nicht für ganz Österreich auf Basis der GIP.at erfolgen wird, wurde beim Land Oberösterreich angefragt, ob das bestehende Landesverkehrsmodell Oberösterreich (VM-OÖ) als Grundlage für die Verfeinerung zur Verfügung gestellt werden kann. Dankenswerter Weise wurde dem Bearbeitungsteam nicht nur das Netzmodell für den IV und ÖV für die beiden Modellierungshorizonte 2005 und 2025, sondern auch die bestehenden Fahrtenmatrizen in unkomplizierter Weise und prompt zur weiteren Verwendung übergeben.
Das nationale Modell kann schon wegen des hohen Aufwandes für die Modellpflege nicht dieselbe Detaillierung aufweisen, wie die Landesverkehrsmodelle oder wie regionale Modelle und es ist auch nicht das Ziel des BMVIT, Verkehre in dieser feinen Auflösung für ganz Österreich zu modellieren. So wurde entschieden, nicht den gesamten Graphen aus dem VM-OÖ zu übernehmen, sondern nur den oberösterreichischen Zentralraum auf dessen Basis zu verfeinern. In diesem prosperierenden Gebiet mit dem Agglomerationsraum um die Städte Linz, Wels, Steyr sowie den Gemeinden Traun, Leonding und Ansfelden wohnt ca. ein Drittel der oberösterreichischen Bevölkerung und es bietet ca. 312.000 Arbeitsplätze.
Die Zonierung dieses Gebietes im VM-OÖ ist für die Anwendung im nationalen Modell zu fein, weshalb Zonen zusammengefasst wurden. Folgende Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der Zonierung der drei Netzmodelle, Abbildung 2 die vorgesehenen aggregierten Zonen des VM-STREET.

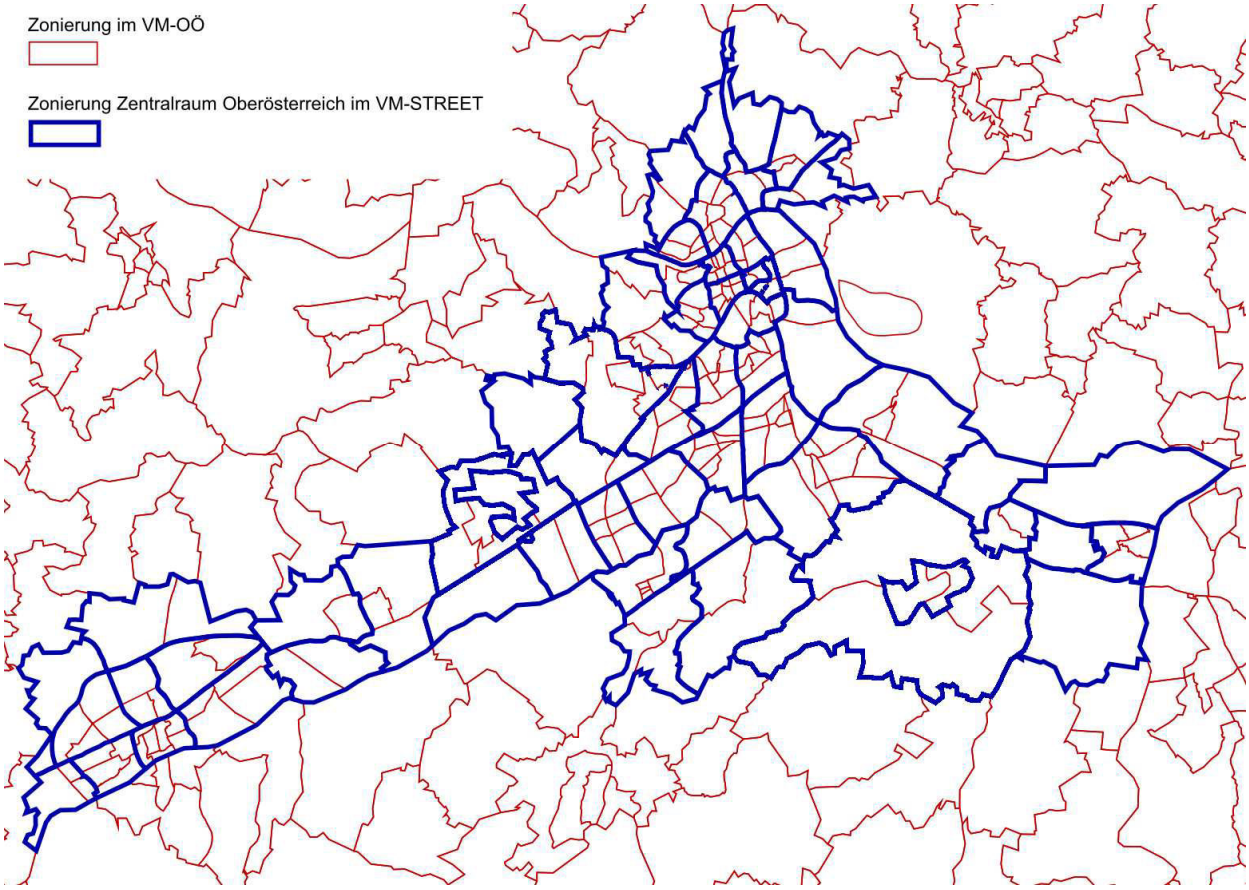


Abbildung 2: Zonierung des oberösterreichischen Zentralraums im VM-OÖ und im VM-STREET

Tabelle 1: Vergleich des Disaggregationsniveaus in den 3 Netzmodellen VMÖ, VM-OÖ und VM-STREET des oberösterreichischen Zentralraums

Gemeinde	**Anzahl Zonen je Netzmodell**		
	VMÖ	**VM-OÖ**	**VM-STREET**
Linz	4	104	24
Wels	4	30	9
Traun	1	12	3
Leonding	1	16	3
Ansfelden	1	13	4
Enns	1	7	4
Marchtrenk	1	7	3
Hörsching	1	5	3
Pasching	1	3	2
Asten	1	3	2
Markt St. Florian	1	4	2
Gesamt	**17**	**204**	**59**

Das Verkehrsangebot für den oberösterreichischen Zentralraum sollte nach der Implementierung des GIP-Graphen der Ostregion in den Graphen des VMÖ aus dem Landesverkehrsmodell übernommen

werden. Der Grund für diese zeitliche Staffellung ist, dass die sehr wahrscheinlich notwendigen Anpassungen der Modelllogiken (VMÖ, GIP) im kleineren und überschaubaren Teilmodell (oberösterreichischer Zentralraum) mit weniger Aufwand zu machen ist, als später, im verschnittenen Zustand.

2.1.4 Vorbereitungen für die Implementierung des GIP-Netzes

Entgegen der ursprünglich geplanten Vorgehensweise zur Verfeinerung des Netzmodells aus dem VMÖ wurde angestrebt, den Netzgraphen aus der Graphenintegrationsplattform (GIP) der Ostregion in den Graphen des VMÖ zu implementieren. Dazu wurde aus der GIP der Ostregion mit Stand 13.12.2010 das „Durchfahrtsnetz“ exportiert, welches in Abstimmung zwischen den Ländern und IST-Vienna Region das relevante Streckennetz enthält. Anschließend wurden sie in eine VISUM-fähige Datei umgewandelt und die ÖV-Fahrplandaten vom Herbstfahrplan 2009 dazu gelesen. Das resultierende Netzmodell inklusive der Zonierung aus dem Verkehrsmodell der Stadt Wien sollte nun mit dem VMÖ-Netzgraphen verschnitten werden.
Um den Graphen der Ostregion in das VMÖ hineinschneiden zu können, müssen die beiden Netzmodelle vorher hinsichtlich der Netzlogik, der IDs und der Attributierungen vereinheitlicht werden. Bei diesem Abgleich wurden die Attribute des Straßenverkehrs und des öffentlichen Verkehrs Schritt für Schritt angepasst.

Der Abgleich umfasste im IV:

- Strecken mit Routingdaten
- Streckentypen
- Knoten
- Zonierung (soweit vorhanden)
- Anbindungen (soweit vorhanden)
- Erlaubte Verkehrsmittel

Für den ÖV wurden folgende Netz- und Fahrplanelemente abgeglichen:

- Linien
- Linienrouten und -elemente
- Haltepunkte
- Haltestellen
- Haltestellenbereiche
- Betreiber

2.1.5 Ermittlung der Streckenlängsneigung für das Netzmodell des VMÖ

Ein wichtiger Parameter für die Emissionsmodellierung ist die Streckenlängsneigung. Nachdem zumindest sechs Bundesländer auf Basis des Netzgraphen des VMÖ modelliert werden sollten, wurde untersucht, ob es eine Möglichkeit gibt, Streckenlängsneigungen für diesen Graphen zu ermitteln oder aus anderen Quellen zu übertragen.

Eine Recherche hat ergeben, dass es keine kompatible Datenquelle für das Gesamtnetz des VMÖ mit Höhenkoten und/oder Streckenlängsneigungen gibt. Die Möglichkeit, den Netzgraphen mit einem Geländemodell zu verschneiden musste aus zwei Gründen ausgeschieden werden:
In den verfügbaren Höhenmodellen für Österreich sind die Kunstbauten der Verkehrsinfrastrukturen (Tunnel, Brücken, Einschnitte, Dämme) unzureichend abgebildet, was zu starken Verzerrungen und hohen Ungenauigkeiten der daraus modellierten Längsneigungen führen würde. Insbesondere bei der hochrangigen Infrastruktur, wo es viele Kunstbauten gibt und die Verkehrsmengen hoch sind, wären die Abweichungen für die Emissionsmodellierung zu hoch.
Eine manuelle Kontrolle und Ergänzung der Kunstbauten wäre im Rahmen des Projekts nicht leistbar.
Der Netzgraph des VMÖ basiert auf der BEV ÖK 500.000 und weist dementsprechend Ungenauigkeiten auf. Ein Vergleich des Graphen mit aktuellen digitalen Straßengraphen auf GIS-Basis zeigt Abweichungen in der Größenordnung von 100 Metern und mehr[6]. Daraus resultieren beim Verschneiden mit einem Höhenmodell – auch ohne Beachtung des Problems mit den Kunstbauten – relevante Abweichungen zur Realität.

Für das untergeordnete Straßennetz des VMÖ konnte im Rahmen dieses Projekts somit keine Streckenlängsneigung ermittelt und zugespielt werden.

Da sich die Steigung vor allem bei hoch und unsymmetrisch belasteten Straßenabschnitten auf die Emissionen auswirkt, wurde weiter nach Möglichkeiten gesucht, zumindest für die Autobahnen und Schnellstraßen Längsneigungen in das Modell zu integrieren. Bei der ASFINAG liegen zwei nicht kompatible Graphen vor, die jedoch beide Längsneigungen enthalten.

- Graph 1) liegt geographisch korrekt, ist zweiachsig, enthält keine Auf- und Abfahrten und die Streckensegmente sind nicht nach derselben Logik wie im VMÖ gebildet.
  Nach der Analyse dieses Graphen durch GIS-Experten (Umweltbundesamt Wien) hat sich gezeigt, dass die Übertragung der Längsneigungen nur händisch erfolgen kann, da der VMÖ-Graph einachsig ist, es darin keine einheitliche Richtungsfortschreibung gibt und die Lageabweichungen in sehr vielen Fällen größer ist, als die Segmentlänge. Zudem hätten die Strecken des VMÖ-Graphen jeweils im Bereich der Segmentenden des ASFINAG-Graphen gebrochen werden müssen. Dies hätte durch die Lageabweichungen nur näherungsweise und händisch erfolgen können. Es wurde entschieden, dass der Nutzen diesen zeitintensiven Aufwand nicht rechtfertigen würde.
- Graph 2) wäre optimal für die Verwendung im STREET-Modell geeignet. Dieser basiert auf einem kommerziellen Graphen, auf den die Attributierung des VMÖ übertragen wurde. Somit ist er einerseits lagerichtig und an das bestehende Netz des VMÖ angebunden, andererseits stimmt die Attributierungslogik für die Umlegung mit der des VMÖ überein. Die ASFINAG wäre grundsätzlich für die Kooperation bereit gewesen, aus lizenzrechtlichen Gründen konnte der Graph jedoch nicht in STREET verwendet werden.

[6] Für die Abbildung der Netzwiderstände in einem nationalen Verkehrsmodell, dessen Ziel die Bewertung von unterschiedlichen Maßnahmen in Bezug auf die hochrangige Straßen- und Schieneninfrastruktur ist, haben diese Abweichungen und Verzerrungen keine Relevanz.

2.2 Aktualisierung der Strukturdaten im Inland

Nachdem die Zonenstruktur festgelegt war, wurden die Strukturdaten für die Nachfragerechnung aktualisiert. Dabei wurden für die Ermittlung der Personengruppen die verfügbaren Statistiken zu den Einwohnern, dem Pkw-Bestand und der Erwerbstätigkeit mit einander verschnitten. Für die Aktualisierung der Zielpotentiale lagen nur wenig verwertbare Daten vor (siehe unten).
Die Personengruppen sind:

- Kinder 6 bis 14 Jahre
- Jugendliche 15 bis 17 Jahre
- Erwerbstätige 18 bis 64 Jahre ohne Pkw-Verfügbarkeit
- Erwerbstätige 18 bis 64 Jahre mit Pkw-Verfügbarkeit
- Nicht Erwerbstätige 18 bis 64 Jahre ohne Pkw-Verfügbarkeit
- Nicht Erwerbstätige 18 bis 64 Jahre mit Pkw-Verfügbarkeit

Das Ergebnis der Berechnungen ist eine vollständige Strukturdatendatei, wie sie für die Anwendung des im VMÖ verwendeten Nachfragemodells TRAFICEM[7] erforderlich ist. Sie kann als Grundlage für Modellierungen mit dem VMÖ und dem Bezugsjahr 2010 verwendet werden.

2.2.1 Bevölkerung (1.1.2011)

Die Bevölkerungsdaten wurden in der erforderlichen Altersschichtung und auf Gemeindeniveau mit Stichtag 1.1.2011 von der Statistik Austria bezogen[8]. Bei den verfeinerten Zonen in Wien wurden die Summen je Wiener Gemeindebezirk mit den Anteilen aus dem Verkehrsmodell der Stadt Wien aufgeteilt.

2.2.2 Motorisierungsgrad (31.12.2010)

Der Pkw-Bestand wird von der Statistik Austria in der Gliederung der Meldestellen publiziert, die im Wesentlichen den politischen Bezirken entsprechen[9]. Die verwendeten Daten beziehen sich auf den Stichtag 31.12.2010. Da keine genaueren Daten über die Verteilung innerhalb der Bezirke vorliegen, wurde bei der Berechnung der Motorisierungsgrade bzw. der Berechnung der Personengruppen mit und ohne Pkw-Verfügbarkeit von einer homogenen Verteilung der Pkw innerhalb der Bezirke ausgegangen.

2.2.3 Erwerbsstatistik (31.10.2008)

Zum Zeitpunkt der Datenaufbereitung waren die aktuellsten Daten zu den Erwerbstätigen am Wohnort in Form der „Abgestimmten Erwerbsstatistik 2008 zum Stichtag 31.10.2008“[10] verfügbar; die feinste räumliche Auflösung ist wiederum die Gemeindeebene. Diese Daten wurden in derselben Weise wie jene der Bevölkerung aktualisiert und in die Strukturdatendatei eingearbeitet.

---

[7] Obermayer C., Pfeiler D., Molitor R.: TRAFICEM - Eine Applikation fuer die Nachfragerechnung im Personenverkehr, die Steuerung des Vierstufenalgorithmus und als Tool fuer das Datenmanagement; ÖVZ 4/2011
[8] http://statcube.at/superwebguest/login.do?guest=guest&db=debevstandjb
[9] http://www.statistik.at/web_de/Redirect/index.htm?dDocName=055766
[10] http://www.statistik.at/web_de/frageboegen/abgestimmte_erwerbsstatistik/ergebnisse/index.html#index4

2.2.4 Zielpotentiale

Über die Zielpotentiale wie Arbeitsplätze gesamt und nach Sektoren, Einkaufsflächen, Freizeiteinrichtungen, Ausbildungsplätze nach Ausbildungsniveau etc., lagen zum Bearbeitungszeitpunkt keine einheitlichen und aktuellen Daten für ganz Österreich bzw. auf dem notwendigen Disaggregationsniveau vor. Aus diesem Grund wurden die Summen je VMÖ-Zone aus dem VMÖ übernommen und für die geteilten Zonen wurden die Anteile aus dem Verkehrsmodell der MA18-Stadt Wien übernommen. Somit ist einerseits die Konsistenz der Potentiale und deren Parametrisierung auf Gemeindeniveau im VMÖ gewährleistet und gleichzeitig wird die Verteilung der Potentiale innerhalb der detaillierten Zonen aus dem Verkehrsmodell Wien berücksichtigt.

2.3 Recherchen

2.3.1 Zonierung

Die derzeitige Zonierung des VMÖ basiert innerhalb Österreichs auf der Gemeindeebene, zusätzlich sind größer Städte feiner aufgelöst.
Wird die Zonierung im Rahmen von STREET 2030 verfeinert, müssen alle neuen Zonen an das IV- und ÖV-Netz angebunden werden. Dabei werden die Zonen(nutzungs)schwerpunkte mit geeigneten Knoten des Netzmodells verbunden. Dieser Schritt kann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen – automatisiert mit anschließender manueller Kontrolle oder manuell – und ist auf jeden Fall arbeitsintensiv. Aus diesem Grund sollte für die Verfeinerung jene Zonenstruktur gefunden werden, die für die Zukunft die beste Nutzungschance ermöglicht. Grundsätzlich standen folgende Möglichkeiten zur Diskussion:

- Gemeindeebene (Bestand)
- Zählbezirke
- Zählsprengel
- Postleitzahl
- Ortschaftkennziffer
- Rasterdaten MGI-Lambert
- Rasterdaten ETRS-LAEA

Nach einer Recherche der verfügbaren Daten für die einzelnen Strukturen (Polygone, Nutzungsschwerpunkte, Strukturdaten) und Diskussionen mit verschiedenen Modellanwendern und -betreibern über die gestellten Anforderungen für die Modellierungen und Auswertungen wurde es als am sinnvollsten eingeschätzt, die Zonierung auf die hierarchische Abstufung Gemeinde – Zählbezirk – Zählsprengel aufzubauen. So kann die räumliche Gliederung je nach Nutzungsdichte bis auf Zählsprengelniveau disaggregiert werden und in dünn besiedelten Gebieten kann die bestehende Gliederung erhalten bleiben. Zudem sind hierarchische Matrixauswertungen für verschiedene Niveaus der administrativen Gliederungen Österreichs einfach möglich.

Nachdem die Entscheidung getroffen wurde, testweise den Netzgraphen der Ostregion zu implementieren, wurde auch entschieden, für die Ostregion die Zonierung aus dem Verkehrsmodell der MA 18 – Stadt Wien[11] zu übernehmen. Diese basiert in Niederösterreich sowie im Nord-/Mittelburgenland auf der Gemeindeebene und für Wien auf Zählbezirksniveau. Daraus ergeben sich für den Raum der Ostregion 2.204 Zonen. Die verbleibenden Zonen des VMÖ (restliche Bundesländer und das Ausland) hätten unverändert bleiben sollen.

2.3.2 Verfeinerung des Netzgraphen im angrenzenden Ausland

Centrope[12] ist eine sehr dynamische Region in der der (grenzüberschreitende) Verkehr in den nächsten Dekaden deutlich zunehmen wird. Um die Auswirkungen des grenzüberschreitenden Verkehrs im Modell STREET 2030 adäquat abbilden zu können, wurde zusätzlich angestrebt, das Verkehrsmodell auch über die östliche Staatsgrenze hinaus zu verfeinern. Es hat sich gezeigt, dass das im Rahmen des Projekts „Verkehrsmodell Österreich-Slowakei“ erarbeitete Verkehrsmodell eine gute Grundlage dafür böte. In der Besprechung vom 19.7.2011 wurde in Aussicht gestellt, dass die notwendigen Daten zur Netzverfeinerung zur Verfügung gestellt werden könnten. Nachdem von slowakischer Seite die Datenfreigabe nicht gewährt wurde, konnten die Daten nicht übernommen und der Netzgraph des „Verkehrsmodell Österreich“ im angrenzenden Ausland nicht verfeinert werden.

2.3.3 Verfeinerung des methodischen Ansatzes zur Modellierung des Zellbinnenverkehrs

Der Zellbinnenverkehr ist jener Teil der erzeugten Wege und Fahrten, der bei einem Verkehrsmodell innerhalb einer Zone Quelle und Ziel haben. Dieser Verkehr wird im Verkehrsmodell generiert, kann jedoch methodisch nicht auf das Streckennetz umgelegt werden. Somit ist über dessen Charakteristik wenig bekannt und es kann die Fahrleistung auch nicht wie sonst, aus der Verkehrsumlegung berechnet werden. Für das Verkehrsmodell Österreich wurde der Anteil der Fahrleistung im Zellbinnenverkehr bei Pkw auf knapp 10 % abgeschätzt. Diese Abschätzung basiert auf der Anzahl der Zellbinnenfahrten und einer mittleren Distanz im Zellbinnenverkehr. Diese Distanz wurde im VMÖ für die vier Zonentypen aus einer Auswertung der Mobilitätserhebung[13] abgeleitet, jedoch in der Form implementiert, dass das Verkehrsmittelwahl- und Zielwahlmodell in Summe plausible Weglängenverteilungen liefert.
Da auch nach der angestrebten Netzverfeinerung die Fahrleistung im Zellbinnenverkehr eine relevante Größenordnung aufweist, wurden verschiedene Methoden zur Verbesserung in Hinblick auf die Berechnung der Fahrleistung recherchiert. Das Ergebnis ist, dass es mit dem Hauptaugenmerk auf die Abbildung der Fahrleistung wenig publizierte Arbeiten gibt, die bestehenden Ansätze allesamt auf der Auswertung bestehender Mobilitätserhebung und dem zusätzlichen Verschneiden mit anderen

[11] Holzapfel, Riedel (2013): MA 18 – Stadtentwicklung und Stadtplanung Wien, Dokumentation zum und Daten des Verkehrsmodell Wien
[12] Die beiden Hauptstädte Bratislava und Wien, deren Agglomerationen als „Twin Cities“ auf nur 50 Kilometer aneinander heranreichen, bilden die Kraftzentren einer wirtschaftlich und kulturell expandierenden europäischen Region. Vgtl. www.centrope.com
[13] BMWV (Hrg. 1998): Bundesministerium für Wirtschaft und Verkehr: Österreichischer Bundesverkehrswegeplan – A3-H/2

Parametern und Statistiken beruhen.[14] Beispiele dafür sind, die mittlere Zellbinnendistanz je Verkehrsmittel und Zonentyp als Funktion

- der Fläche,
- der Einwohner (oder Einwohner und Arbeitsplätze)
- der Einwohner (oder Einwohner und Arbeitsplätze) pro Zonenfläche
- der Straßennetzdichte je Zonenfläche
- der mittleren Distanz von den Ortsteilen einer Zone zum Zentrum/zur Kirche/zur Schule (GIS-Auswertung)
- der mittleren oder gewichtet gemittelten Distanz zu den angrenzenden Zonen

zu berechnen. Nach der Recherche ausgeschlossen wurde lediglich die GIS-Analyse, da die Datenaufbereitung für diesen Ansatz den Rahmen des Projekts deutlich überzogen hätte. Anschließend an die Netzverfeinerung war geplant anhand der vorliegenden Netz- und Strukturdaten obige Ansätze für die drei Netzstrukturen (VMÖ, Zentralraum Oberösterreich und die Ostregion) zu testen und die jeweils beste Methode auszuwählen und zu parametrisieren. Dieser Arbeitsschritt konnte jedoch aufgrund der Rahmenbedingungen nicht mehr durchgeführt werden.

2.3.4 Abbildung des Eisenbahngüterverkehrs am Netz des VMÖ

Ziel von STREET 2030 war unter anderem die möglichst vollständige Abbildung des Energieverbrauchs und der Emissionen des Verkehrssektors. Ursprünglich nicht geplant war die Berücksichtigung des Eisenbahngüterverkehrs, weil dieser im Rahmen des VMÖ zwar berechnet wurde, die Umlegung auf das Netz jedoch von den ÖBB auf einem ÖBB-eigenen Modell erfolgte und dem Bearbeitungsteam somit keine Daten zur Verfügung standen.
Während der Projektbearbeitung wurde bekannt, dass von der ÖBB-Infrastrktur-AG für das Jahr 2025 Prognosewerte über die Bruttotonnagen auf den einzelnen Streckenabschnitten zur Verfügung gestellt werden könnten. Damit hätte sich die Möglichkeit geboten, auch den Energieeinsatz und die Emissionen des Eisenbahngüterverkehrs zu berechnen und darzustellen. Nach Prüfung eines Musterdatensatzes und eingehender Diskussion wurde entschieden, diese Daten nicht einzuarbeiten, da

- Die zur Verfügung gestellten Brutto-Tonnagen händisch auf den Netzgraphen von STREET übertragen hätten werden müssen, weil der Netzgraph des Güterverkehrsmodels der ÖBB-Infrastruktur-AG nicht mit dem der Personenverkehrs-AG kompatibel ist;
- Die Daten nur für dieses Prognosejahr 2025 zur Verfügung gestanden wären und keine zeitliche Veränderung mit der gleichen Modellgüte darstellbar gewesen wäre;
- Keine Grundlage für eine belastbare Modellierung von Schienen-Güterverkehrsmatrizen im Rahmen von STREET 2030 vorhanden ist.

[14] Stellvertretend dafür: Friedrich, Galster (2007): Anbindungszeiten in Verkehrsnetzen, Bundesanstalt für Straßenwesen, Gergisch-Gladbach; mehrere Telefonate und persönliche Gespräche mit Prof. Martin Fellendorf (Technische Universität Graz), Prof. Markus Friedrich (Universität Stuttgart), Dr. Philipp Fröhlich (IG-Modus, Schweiz) und Prof. Christian Schiller (Technische Universität Dresden)

Es wäre also ein relativ hoher Bearbeitungsaufwand notwendig gewesen, nur um die Ergebnisse für 2025 darzustellen. Für den Bestand, die Prognosen und Szenarien hätte der Eisenbahngüterverkehr nicht berücksichtigt werden können.

2.3.5 Alternative Verkehrsmodelldaten zur Demonstration der Emissionsmodelle

Die Verfeinerung des österreichweiten Verkehrsmodells musste aus bereits dargestellten Gründen abgebrochen. Um dennoch die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse aus den anderen Arbeitspaketen demonstrieren zu können und gleichzeitig die Sinnhaftigkeit, eine maßnahmensensitive Modellkette – vom Verkehrsgeschehen über die technologischen Entwicklungen bis hin zur GIS-Analyse und -Visualisierung – zu entwickeln, zu unterstreichen, wurde recherchiert, ob und wie weit die Ergebnisse aus bestehenden städtische und/oder regionalen Verkehrsmodellen als Eingangswerte verwendet werden können. Aufbauend auf die frühere Recherche wurde bei folgenden Modellbetreibern angefragt und die Modellspezifikationen diskutiert:

- Land Oberösterreich: Die Daten dieses Modells wurden schon in einem früheren Stadium zur Verfügung gestellt. Für die direkte Anwendung von NEMO hat der Datensatz den Nachteil, dass keine Streckenlängsneigungen attribuiert sind. Die Idee, diese durch Verschneiden mit einem Höhenmodell zu ergänzen scheiterte, da der Netzgraph verzerrt und leicht verschoben ist. Die durch dieses Verfahren ermittelten Streckenlängsneigungen würden zu keiner Verbesserung der Emissionsmodellierung führen. Somit wurden die Daten des Landesverkehrsmodells Oberösterreich nicht verwendet.
- Land Salzburg: Das aktuelle Landesverkehrsmodell VERMOSA II oder Daten daraus konnten nicht zur Verfügung gestellt werden. Es wurde jedoch angeboten, einen Netzgraphen der Landesstraßen B und L mit entsprechenden Verkehrsdaten zur Verfügung zu stellen; Daten über das Netz der Stadt Salzburg und die Autobahnen hätten nicht zur Verfügung gestellt werden können.

  Die verfügbaren Daten für die Landesstraßen liegen jedoch nicht in der für die Verwendung von NEMO notwendigen Form vor; insbesondere liegen keine mittleren Geschwindigkeiten, sondern nur die Tempolimits vor. Es wurde entschieden, diese Daten nicht zu verwenden, da der Aufwand für die Ermittlung plausibler Geschwindigkeiten nur für das – bezogen auf Österreich – kleine Straßennetz aufwändig gewesen wäre und kein direkter Folgenutzen erkennbar ist.
- Land Tirol: Die Parametrisierung und die Struktur des Landesverkehrsmodells Tirol böten perfekte Voraussetzungen für die Emissionsmodellierung in STREET 2030. Einerseits wurde der Graph aus der GIP abgeleitet – kann daher als Vorlage für die zukünftige Weiterentwicklung von Verkehrsmodell-Graphen dienen – andererseits können alle notwendigen Informationen und Parameter aus der Netzstruktur (ein in beide Richtungen kompatibles Verkehrsmodell und GIS) ausgegeben werden. Leider war das Verkehrsmodell zum Zeitpunkt der Anfrage in Kalibrierungsphase. Daten zu den Streckenbelastungen und -geschwindigkeiten konnten daher nicht weiter geben werden. Zu einem späteren Zeitpunkt ist eine Modellanwendung sehr gut möglich.
- Stadt Wien: Von der MA18 – Stadt Wien wurden der Graph und die Daten des multimodalen Bestandsmodells zur Verfügung gestellt. Die nicht vorhandenen Längsneigungen konnten im

Rahmen dieses Projekts durch Verschneiden mit dem digitalen Höhenmodell zugespielt werden. Da dieses Modell die nachfragerelevanten ÖV-Fahrten der Busse, Straßen- und U-Bahnen enthält, können diese Verkehrsmittel bei der Energie- und Emissionsmodellierung berücksichtigt werden. Somit lagen für Wien die erforderlichen Modellgrundlagen für die Projektanwendung vor bzw. konnten sie im Rahmen des Projekts geschaffen werden.

2.4 Entwicklung der Methode zur Berechnung der emissionsmodellierungs-relevanten Geschwindigkeit

Für die Emissionsberechnung mit NEMO ist neben der Modellierung der Streckenbelastungen die korrekte Abbildung der emissionsmodellierungs-relevanten Geschwindigkeit maßgebend. Diese ist die über den Betrachtungszeitraum des Verkehrsmodells gewichtete gemittelte Geschwindigkeit. Grundsätzlich liefert das Verkehrsmodell aus der Umlegung für jede belastete Strecke eine mittlere Geschwindigkeit, die vom Streckentyp, der Geschwindigkeit im unbelasteten Netz, der Streckenkapazität und der Streckenauslastung abhängt. Recherchen zur Verwendung dieser Geschwindigkeit für die Emissionsmodellierung haben gezeigt, dass im Wesentlichen zwei Punkte zu beachten sind: [15, 16, 17, 18]

- Parametrisierung der CR-Funktion
  Die mit VISUM ermittelte Geschwindigkeit entspricht theoretisch einer über den Betrachtungszeitraum gewichtet gemittelten Geschwindigkeit. Da es sich bei strategischen Verkehrsmodellen in der Regel um Werktagsmodelle handelt, also das Verkehrsgeschehen eines „normierten" Werktags modelliert wird, die routingrelevanten Netzinformationen wie die Kapazitäten im Netzmodell aber meist auf eine Stunde bezogen parametrisiert werden, muss dieser Unterschied durch einen Skalierungsfaktor bei der Parametrisierung der CR-Funktion (zur Beschreibung des Einflusses der Auslastung auf die Fahrzeit einer Strecke) ausgeglichen werden. De facto wird dadurch bei der Geschwindigkeitsberechnung der Umlegung nur ein Teil des berechneten Werktagsverkehrs – je nach Parametrisierung in der Größenordnung von einem Achtel bis zu einem Dreizehntel – umgelegt.[19] Erfahrungen aus anderen Projekten haben gezeigt, dass dadurch vor allem auf mäßig bis stark ausgelasteten Strecken die mit VISUM modellierte Geschwindigkeit gegenüber der real über den Tag gemessenen Geschwindigkeit zu niedrig sein kann[16]. Es ist also zu prüfen, ob die modellierten Geschwindigkeiten plausibel sind.
- Netzfunktion der Straßen
  Die Tagesganglinie der Streckenauslastung korreliert mit dem Tagesgang der mittleren

[15] Fellendorf, Neuhold, Cik (2011): Typisierung von Verkehrsbelastungsganglinien und die Anwendung in der Emissionsberechnung, Paper zur HEREKA 2011 in Stuttgart, Graz
[16] Kriebernegg G., Rexeis M, Schiller C.: Raumnutzungsoptimierung durch Emissionsminimierung, Endbericht des Projektes „ROdEM" finanziert im Rahmen der 2. Ausschreibung der Programmlinie ways2go des Forschungs- und Technologieprogramms iv2splus. Graz, 30.9.2010
[17] Neuhold (2012): Makroskopische Emissionsmodellierung mit HBEFA in VISUM – Erfahrungen aus Graz, Fachvortrag und Diskussion im Rahmen des PTV-Anwenderseminars in Salzburg
[18] PTV-AG (2010): VISUM 11.5 – Grundlagen, Emissionsberechnung nach HBEFA 3.1, Karlsruhe
[19] Beispielgebend: Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2006): Erstellung des nationalen Personenverkehrsmodells für den öffentlichen und privaten Verkehr – Modellbeschreibung, Seite 12ff

Geschwindigkeit. Somit kann aus der Tagesganglinie und der Charakteristik der Straße auf die mittlere Geschwindigkeit geschlossen werden. In bisherigen Arbeiten wurden mittels Clusteranalyse zumindest folgende Streckentypen charakterisiert, die auch bei der Parametrisierung der CR-Funktionen oder später bei der Umrechnung von der mit VISUM ermittelten Geschwindigkeit auf eine „emissionsmodellierungs-relevante“ Geschwindigkeit berücksichtigt werden sollten:

- Autobahnen, eventuell eine weitere Differenzierung sinnvoll
- Freilandstraßen, eventuell eine weitere Differenzierung sinnvoll
- Stadtstraßen Zentrum
- Stadtstraßen tangential
- Stadtstraßen radial-stadtauswärts
- Stadtstraßen radial-stadteinwärts

Von Mitgliedern des Beirats wurde die Befürchtung geäußert, dass bei der Emissionsberechnung auf Basis der Verkehrsdaten und Geschwindigkeiten aus einem Werktagsmodell die Verkehrsemissionen insbesondere in Städten überschätzt werden könnten. Für das Grazer Hauptstraßennetz werden in Neuhold (2012) die Ergebnisse drei unterschiedlicher Modellansätze verglichen; nämlich ein klassisches Werktagsmodell, ein Werktagsmodell mit anschließender Berechnung von stundenfeinen Matrizen auf Basis von Tagesganglinien der Verkehrsnachfrage und ein stundenfeines Nachfragemodell. Die Emissionsberechnung erfolgte dabei mit dem in VISUM implementierten Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA).

Beim gangliniengestützten Ansatz wurde sowohl bei CO_2 als auch bei NO_x in etwa die gleiche Größenordnung der Emissionen errechnet; je nach Definition der Streckenkapazität beträgt die Abweichung zum Werktagsmodell + 0,6 % bis + 2,2 %. Mit den Verkehrsdaten aus dem stundenfeinen Nachfragemodell wurden jedoch deutlich höhere Werte ermittelt. Je nach Kapazitätsdefinition zwischen + 5,5 % und +12,8 %, wobei sich keine deutlichen Unterschiede zwischen CO_2 und NO_x gezeigt haben.

Begründet wird das Ergebnis in der Studie damit, dass die modellierte Auslastung zu den Spitzenstunden sehr hoch ist, was sich bei der Emissionsberechnung entsprechend der Methode im Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) durch schlägt. Dieser Effekt gleicht sich durch die niedrige Auslastung zu den Nebenverkehrszeiten gegenüber der Werktagsbetrachtung nicht wieder aus.

Diese Studie kommt also zum genau umgekehrten Ergebnis, als es von Begleitgruppenmitgliedern befürchtet wurde. Es ist jedoch anzumerken, dass die Resultate für die verwendeten Modelle ermittelt wurden und nicht ohne Analyse der Modellparametrisierung auf andere Verkehrsmodelle übertragen werden können.

Tabelle 2: Methodische Ansätze nach Neuhold (2012)

Methode	Bezugszeitraum des Nachfragemodells	Verkehrsbeziehungsmatrix aus Nachfragemodell pro	Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten der Umlegung je	Verkehrsemissionen je Strecke pro
Tagesnachfrage	Tag	Tag	Tag	Tag

Methode	Bezugszeitraum des Nachfragemodells	Verkehrsbeziehungsmatrix aus Nachfragemodell pro	Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten der Umlegung je	Verkehrsemissionen je Strecke pro
Stundennachfrage	Stunde	Stunde	Stunde	Stunde → aufsummiert auf Tag
Ganglinengestützte Nachfrage	Tag	Tag → über Ganglinien auf Stunde umgerechnet	Stunde	Stunde → aufsummiert auf Tag

Die mit Verkehrsmodellen ermittelten Fahrzeit im Wegenetz setzt sich üblicher Weise aus der Fahrzeit auf der Strecke und den Verlustzeiten an den Kreuzungen (Knoten- und Abbiegerwiderstände) zusammen. Bei der normalen Anwendung des in VISUM implementierten Emissionsmodells werden die Verlustzeiten an den Knoten nicht berücksichtigt. In (Neuhold 2012) wurde gezeigt, dass beim verwendeten Verkehrsmodell in Folge der Berücksichtigung der Verlustzeiten an den Knoten die errechneten Verkehrsemissionen in etwa um den Faktor 2 höher sind, als ohne deren Berücksichtigung. Dabei wurde versucht, den Knotenwiderstand über eine fiktive Verlängerung der Strecke unter Beibehaltung der modellierten Streckengeschwindigkeit abzubilden. Dieser Ansatz ist bei der Verwendung von NEMO nicht sinnvoll, da sich die hinterlegten Emissionsfaktoren auf Streckenzüge ähnlicher Charakteristik (Straßentyp, Beschleunigungs- und Bremsverhalten, mittlere Geschwindigkeit) beziehen und die Verlustzeiten an den Knoten darin bereits enthalten sind[20]. Somit ist auch der theoretisch denkbare Ansatz nicht sinnvoll, die Knotenverlustzeiten als fiktive Strecken zu modellieren.

Um den Einfluss der Knoten methodisch korrekt an die Struktur von NEMO angepasst berücksichtigen zu können, wurde in STREET 2030 folgende Methode ausgearbeitet: es wird für jedes betrachtete Verkehrsmittel die Verlustzeit an den Knoten der jeweils vorangegangen Strecke zugeordnet. Da die Knotenwiderstände von den Verkehrsstärken je Richtung und den Verlustzeiten je Richtung abhängen, wird die Knotenverlustzeit aus den, über die Belastung gewichtet gemittelten Verlustzeiten je Abbiegerichtung berechnet. Aus dieser Verlustzeit, der Streckenfahrzeit aus VISUM und der Streckenlänge wird die „emissionsmodellierungs-relevante“ Streckengeschwindigkeit errechnet. (vgl. Abbildung 3 und folgende Formeln)

[20] Selbiges gilt auch für die Verwendung des Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA

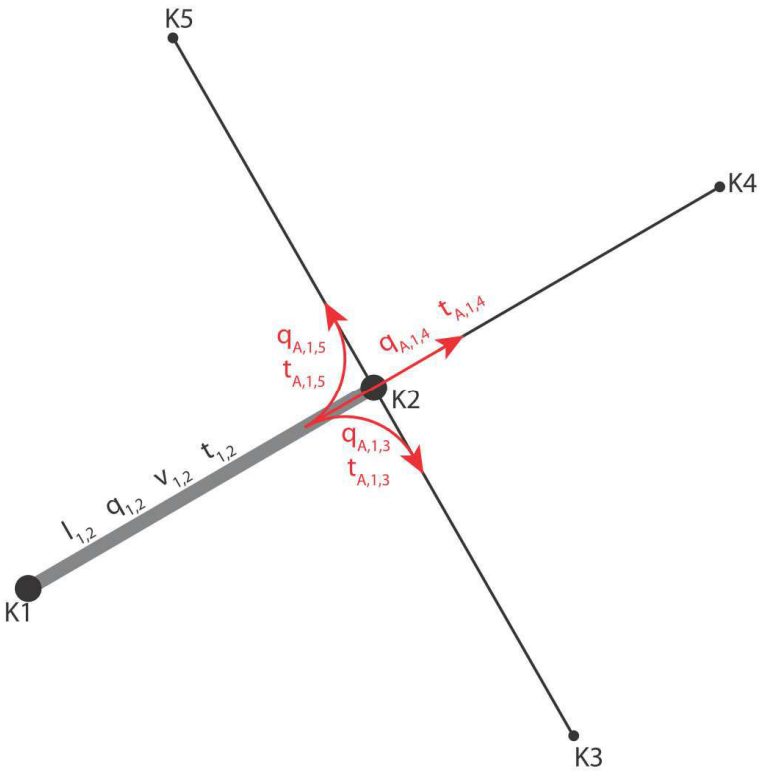


Abbildung 3: Skizze zur Berechnung der „emissionsmodellierungs-relevanten“ Geschwindigkeit der Strecke 1,2

$$v_{EM} = \frac{l_{ges}}{t_{ges}}$$

$$t_{ges} = t_{akt,S} + t_{akt,K}$$

$$t_{akt,K} = \frac{\Sigma (q_{A,i,j} \times t_{A,i,j})}{\Sigma q_{A,i,j}}$$

$$q_S = \Sigma q_{A,i,j}$$

Wobei:

v_{EM} „Emissionsmodellierungs-relevante Streckengeschwindigkeit“, sie entspricht der mittleren Streckengeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Verlustzeit am Folgeknoten

l_{ges} Gesamtlänge; da Kreuzungen in makroskopischen Modellen als Punkt implementiert sind und nicht aufgelöst werden, entspricht sie der Streckenlänge

t_{ges} Gesamtzeit aus Streckenfahrzeit und Verlustzeit am Folgeknoten

$t_{akt,S}$ Auslastungsabhängige Streckenfahrzeit

$t_{akt,K}$ Auslastungsabhängige Verlustzeit am Folgeknoten

$q_{A,i,j}$ Verkehrsstrom am Abbieger vom Ausgangsknoten i zum Zielknoten j

$t_{A,i,j}$ Auslastungsabhängige Verlustzeit am Abbieger vom Ausgangsknoten i zum Zielknoten j

q_S Streckenbelastung

2.5 Definition der Schnittstellen zwischen dem Verkehrsmodell und den Emissionsmodellen

Nach Festlegung der Datenstrukturen und der zwischen den Modellen auszutauschenden Daten wurde beschlossen, dass der Austausch der Netzgraphen am besten in Form von Shapefiles erfolgen kann und dass die Netzdaten in Listenform, getrennt für die beiden Modelle NEMO-Road und NEMO-Rail, übergeben werden sollten. Die IDs für die gerichteten Kanten der Strecken wurden aus den Knoten- und Streckennummern gebildet. Die zu übergebenden Daten für die Berechnung der Straßenverkehrsemissionen sind:

- Kanten-ID
- Strecken-ID
- VonKnoten-ID
- NachKnoten-ID
- Streckenpolygon
- Streckentyp
- Streckenlänge [km]
- Streckenlängsneigung [%]
- Streckenfahrleistung gesamt pro Jahr[Kfz/a]
- Streckenfahrleistungsanteile je Kfz-Kategorie (Pkw, Lieferwagen, Lkw, Linienbus) [%]
- Mittlere Geschwindigkeit je Kfz-Kategorie (Pkw, Lieferwagen, Lkw, Linienbus) [km/h]

Für die Schiene (Eisenbahn, Tram und U-Bahn) wurden folgende Attribute festgelegt:

- Kanten-ID
- Strecken-ID
- VonKnoten-ID
- NachKnoten-ID
- Streckenpolygon
- Streckentyp
- Streckenlänge [km]
- Streckencharakteristik (BS, IAS, FLS, NS, HGS, TR, UB) [-]
- Anzahl Fahrten je Zugtyp (IC, RE, SB, Tram, U-Bahn) verschnitten mit Antriebsart (EL, D) [Fahrplanfahrten/a]

2.5.1 Hochrechnung der Werktagsverkehre auf Jahreswerte

Das Austrian Institute of Technologie (AIT) erstellt seit mehreren Jahren den Emissionskataster für die Stadt Wien. Für den Verkehrssektor werden dabei ebenfalls Daten aus dem Werktagsmodell der Stadt Wien verwendet. Um dessen Ergebnisse mit denen aus STREET 2030 vergleichen zu können ist es

sinnvoll, den selben Faktor für die Hochrechnung des Werktagsverkehrs auf Jahreswerte zu Grunde zu legen, weshalb der Wert von 332[21] vom AIT übernommen wurde.

2.6 Aufbereitung der Verkehrsmodelldaten für die Energie- und Emissionsmodellierung

Zur Demonstration der Modellkette von STREET 2030 und der Forschungs- bzw. Entwicklungsergebnisse aus den einzelnen Arbeitspaketen liegen Daten aus zwei Verkehrsmodellen vor (siehe oben); einerseits aus dem VMÖ und andererseits aus dem Verkehrsmodell der Stadt Wien – MA18. Da im Verkehrsmodell der Stadt Wien der Eisenbahn-Fernverkehr nicht abgebildet ist und andererseits im VMÖ der Bahnverkehr vollständig implementiert ist wurde beschlossen, die Daten für die Bahn aus dem VMÖ und die Daten für Pkw, Lieferwagen, Lkw, Linienbusse, Straßen- und U-Bahnen aus dem Verkehrsmodell der Stadt Wien zu verwenden. Die für die Datenausgabe und -aufbereitung erforderlichen Attributierungen mussten somit in beiden Netzmodellen erfolgen.

2.6.1 Straßengebunde Verkehrsmittel

2.6.1.1 Ermittlung der Fahrleistung

Die Gesamtfahrleistung kann aus einem Verkehrsmodell durch Aufsummieren der Fahrleistungsanteile

1. im Streckennetz,
2. auf den Anbindungen als Verbindung zwischen Modellzonen und Streckennetz,
3. sowie dem nicht umlegbaren Zellbinnenverkehr berechnet werden.

Zur Berechnung der Fahrleistung im Streckennetz wird die Streckenbelastung je Verkehrsmittel mit der Streckenlänge multipliziert. Für die Verkehrsmittel Pkw, Lieferwagen und Lkw ist die Streckenbelastung ein direktes Ergebnis der Umlegung im Verkehrsmodell, für Linienbusse wird dafür die Anzahl der Servicefahrten je Buskategorie verwendet.

Dasselbe Schema kann prinzipiell für die Berechnung der Fahrleistung auf den Anbindungen verwendet werden. Es wird die Anzahl der Quell- und Zielfahrten je Anbindung mit der Anbindungslänge multipliziert.
Für den Zellbinnenverkehr wird bei der Nachfragerechnung die Anzahl der Fahrten je Verkehrsmittel berechnet, über die tatsächliche Verteilung der Weglängen ist jedoch wenig bekannt (vgl. Kapitel 2.3.3). Für die Abschätzung der Fahrleistung im Zellbinnenverkehr werden die Distanzen je Zonentyp aus der Nachfragerechnung übernommen.

Das verwendete Energie- und Emissionsmodell NEMO ist ein streckenbezogenes Modell, weshalb die Verkehrsaktivitäten Streckencharakteristiken zugeordnet werden müssen. Für das Streckennetz liegen nach der Umlegung Streckenbelastungen je Kategorie vor; ebenso für die Anbindungen für die

[21] Persönliches Gespräch mit Herrn Orthofer, AIT, am 3.4.2013

Zuordnung der Fahrleistungsanteile im Zellbinnenverkehr müssen Annahmen getroffen werden. Diese basieren auf folgenden Überlegungen:

- Im verwendeten Verkehrsmodell ist die Stadt Wien in 1.532 Zonen aufgelöst und es kann davon ausgegangen werden, dass der Zellbinnenverkehr nur dem Lokalverkehr zugeordnet werden kann, der hauptsächlich im niederrangigen Netz abgewickelt wird. Somit sollen die Fahrleistungen der Anbindungen und des Zellbinnenverkehrs auch Streckenkategorien mit dieser Energie- und Emissionscharakteristik zugeordnet werden.
- Die reale Geschwindigkeit im Lokalverkehr und am untergeordneten Netz ist relativ niedrig.
- Die Zonengröße, die Raumstruktur (Nutzungsdichte und -mischung) und das Verkehrsangebot einer Zone wirken sich auf die Weglängenverteilung der auf diese Zone bezogenen Wege aus. Da die Stadt Wien in dieser Hinsicht nicht homogen ist, sollen die Fahrleistungen des Zellbinnenverkehrs und der Anbindungen nicht gleichmäßig über das gesamte Modellgebiet verteilt werden, sondern nach Möglichkeit Strecken im direkten Umfeld des Entstehungsorts zugeordnet werden.
- Das Verkehrsaufkommen verteilt sich im Streckennetz analog der Netzhierarchien; je höher der Rang einer Straße, desto höher ist tendenziell auch das Verkehrsaufkommen. In Zusammenschau mit der erforderlichen räumlichen Abstrahierung bei Verkehrsmodellen wird der Zellbinnenverkehr somit dem untergeordneten Netz als Funktion der Streckenbelastung (im untergeordneten Netz) zugeordnet.

Daraus wurden folgende Randbedingungen für die Zuteilung der Fahrleistung auf den Anbindungen und im Zellbinnenverkehr definiert:

- Das untergeordnete Streckennetz wird aus folgenden Streckentypen des Verkehrsmodell Wien gebildet: 0-14, 16-31, 36-38, 40-43, 50, 60, 63-66, 69-72, 74-89;
- Zusätzlich werden nur Strecken mit einbezogen, deren Pkw-Geschwindigkeit im unbelasteten Netz (v_0) mit kleiner/gleich 45 km/h parametrisiert sind;
- Es werden nur Strecken berücksichtigt, wo Pkw-Verkehr erlaubt ist[22];
- Die Fahrleistung im Zellbinnenverkehr und auf den Anbindungen wird je politischem Bezirk aufsummiert und dem untergeordneten Streckennetz des Bezirks zugeordnet.
- Die Fahrleistung im Zellbinnenverkehr und auf den Anbindungen wird dem untergeordneten Netz aliquot den, mit dem Verkehrsmodell ermittelten Streckenbelastungen, zugeordnet.

Über die Zonenanbindungen wird das Verkehrsangebot mit den Zonen verbunden beziehungsweise wird die Verkehrsnachfrage auf das Streckennetz umgelegt. In der Realität entsprechen die Anbindungen den Grundstückszufahrten oder den Eingängen. Da im Netzmodell Abstrahierungen vorgenommen werden müssen (Zonen, modellierungsrelevantes Streckennetz) werden im Verkehrsmodell über die

[22] Eine zusätzliche Differenzierung für Lieferwagen und Lkw ist nicht notwendig, da die Verkehre diese beiden Kategorien methodisch als Anteil am Pkw-Verkehr berechnet werden.

Anbindung die durchschnittlichen Widerstände (Distanzen, Zeiten) zwischen den Quell/Zielorten und dem implementierten Verkehrsangebot abgebildet. Für die Energie- und Emissionsberechnung mit NEMO müssen auch die Verkehre auf den Anbindungen Streckencharakteristiken zugeordnet werden. Sinngemäß gelten dafür dieselben Überlegungen und damit Annahmen, wie sie für den Zellbinnenverkehr angestellt wurden. Deshalb erfolgte die Streckenzuordnung analog dem Zellbinnenverkehr.

2.6.1.2 Ermittlung der „emissionsmodellierungs-relevanten“ Geschwindigkeiten

Der Abbildung der realen Geschwindigkeit kommt bei der Emissionsmodellierung eine große Bedeutung zu. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, wird sie aus der Streckenfahrzeit, der Streckenlänge und den Abbiegerströmen des Folgeknotens sowie den zugehörigen Verlustzeiten je Abbieger berechnet.

Für die Validierung der modellierten Streckenfahrzeit bzw. der Streckengeschwindigkeit wurden dem Konsortium im Rahmen von STREET 2030 unter anderem Daten der automatischen Zählanlagen der Stadt Wien, MA46 – Verkehrsorganisation und technische Verkehrsangelegenheiten, aus dem Jahr 2010 zur Verfügung gestellt. Diese enthalten unter anderem:

- Verkehrsbelastungen für Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge in 24 1-Stunden-Zeitscheiben für Montag bis Freitag (DTV);
- In Abhängigkeit der verwendeten Zählanlage Geschwindigkeiten für Pkw-ähnliche und Lkw-ähnliche Fahrzeuge bzw. für Pkw ohne Anhänger, Lkw ohne Anhänger und Lieferwagen je Stunde der ersten Oktoberwoche aus dem Jahr 2010.

Für die Emissionsmodellierung wird für einen durchschnittlichen Werktag die über den Tagesgang der Belastung gewichtet gemittelte Geschwindigkeit benötigt. Somit wurde als erster Schritt aus den Zähldaten für jede der 116 zur Verfügung gestellten Zählstellen eine Belastungs-Ganglinie erstellt.
Bei den Geschwindigkeitsdaten traten im Gegensatz zu den Belastungs-Ganglinien vereinzelt Lücken auf. Hätte man bei der Auswertung die Werte aller Zählstellen mit Lücken in der Geschwindigkeitsaufzeichnung weggelassen, wäre es nicht möglich gewesen, aus den verbleibenden Daten repräsentative Durchschnittsgeschwindigkeiten zu berechnen. Aus diesem Grund hat man sich dazu entschlossen, die Lücken durch Interpolation aus den Werten der angrenzenden Stunden und der Entwicklung an den anderen Wochentagen zu schließen. Als Ergebnis konnten für 91 Zählstellen Geschwindigkeitsganglinien ermittelt werden.
Aus diesen Daten wurde für jede Zählstelle eine gewichtet gemittelte Geschwindigkeit berechnet. Diese Werte wurden als Grundlagendaten für zukünftige Kalibrierungen des Umlegungsmodells in das Netzmodell eingepflegt.

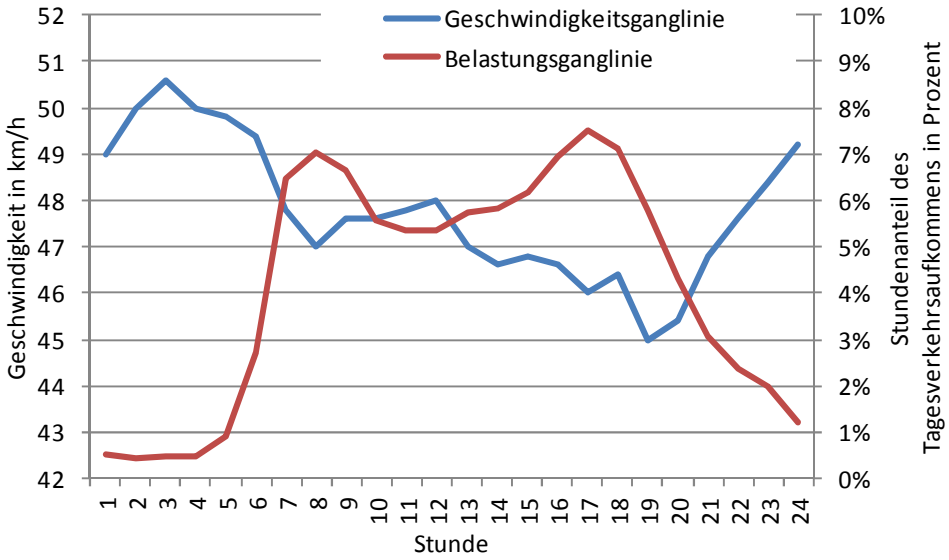


Abbildung 4: Belastungs- und Geschwindigkeitsganglinie für Pkw der Zählstelle 913.3 in der Erzherzog-Karl-Straße in Fahrtrichtung stadtauswärts

Im nächsten Schritt wurden die modellierten Geschwindigkeiten aus VISUM mit den gemessenen Pkw-Geschwindigkeiten verglichen. Die Zuordnung der Daten musste einerseits händisch erfolgen, da keine einheitlichen und richtungsbezogenen Zählstellenbezeichnungen zwischen den Daten der MA46 und dem Netzmodell zur Verfügung standen. Andererseits mussten Zählstellen im Netzmodell ergänzt werden. Der Vergleich der Daten zeigte, dass die modellierten Geschwindigkeiten jeweils kleiner oder gleich wie die gemessenen waren.

Durch weiterführende Analysen und – entsprechend der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche – durchgeführter Clusterungen der Streckentypen konnten die Streuungen der Abweichungen deutlich eingegrenzt werden. Als Ergebnis wurden Anpassungsfaktoren für die Streckengeschwindigkeit aus dem Verkehrsmodell je Streckenklasse ermittelt, die mit deren statistischen Maßzahlen in folgender Tabelle 3 zusammengestellt sind. Im Gegensatz zu der in der Literatur empfohlenen Unterscheidung zwischen radial und tangential verlaufenden Straßenzügen konnten bei dieser konkreten Spezifikation keine besseren Ergebnisse ermittelt werden. Obwohl die Stichprobe insbesondere bei den Kategorien Autobahn 50 km/h und Landesstraße 100 km/h sehr klein ist, scheinen die errechneten Werte in Zusammenschau mit den im Netzmodell attributierten Geschwindigkeiten im unbelasteten Netz (v_0) durchaus erklärbar und plausibel. Es ist gut vorstellbar, dass Tempo 50 auf den Stadtautobahnen bei ungestörtem Verkehrsfluss nicht eingehalten wird, andererseits ist im Wiener Stadtgebiet auch auf Landesstraßen nur Tempo 50 erlaubt.

Für alle anderen im Wiener Stadtgebiet verwendeten Streckentypen wurde der Faktor 1,0 verwendet, da einerseits keine Messdaten für eine Anpassung vorhanden sind, andererseits handelt es sich bei den verbleibenden Strecken zum Großteil um schwach belastete Nebenstraßen, wo von geringer Auslastung und somit von freiem Verkehrsfluss auszugehen ist.

Tabelle 3: Verwendete Anpassungsfaktoren je Streckenklasse

Streckenklasse[23]	Korrektur-faktor	Mittelwert	Anzahl Messwerte	Standard-abweichung	Median
Autobahn 50 km/h	1,20	1,19	6	0,04	1,20
Landesstraße 100 km/h	0,50	0,50	8	0,08	0,47
Landesstraße 50 km/h und 60 km/h	1,00	1,03	48	0,16	1,03
Sammelstraße 50 km/h	1,00	1,00	29	0,14	1,03
Sonstige Straßen im Wiener Stadtgebiet	1,00	Annahme			

Für die Berechnung der „emissionsmodellierungs-relevanten“ Pkw-Geschwindigkeit $v_{EM,\ Pkw}$ sind zusätzlich die Verlustzeiten an den Knoten erforderlich. Im verwendeten Verkehrsmodell der Stadt Wien sind diese attributiert und können aus dem Modell je Knoten und Abbiegerichtung ausgelesen werden. Zur Validierung stehen derzeit keine aufbereiteten Daten zur Verfügung. Es wurde diskutiert, die Verlustzeiten an Ampeln aus Aufzeichnungen der VLSA-Steuerung zu schätzen. Das würde einen relativ großen Arbeitsaufwand bedeuten und die erforderlichen Daten hätten nicht zeitgerecht für die Verwendung in diesem Projekt generiert werden können. Zudem stünden in diesem Fall für nicht-lichtsignalgeregelte Kreuzungen keine Validierungsdaten zur Verfügung. Somit wurden die parametrisierten Werte aus dem Verkehrsmodell unverändert übernommen und für die Berechnung der „emissionsmodellierungsrelevanten“ Gechwindigkeit $v_{EM,\ Pkw}$ verwendet.

Im Verkehrsmodell der Stadt Wien werden von den straßengebundenen Individualverkehrsmitteln nur Pkw-Lenker in Form einer Nachfragerechnung ermittelt und auf das Netz umgelegt. Im Gegensatz dazu werden die für die Abbildung realer Netzwiderstände erforderlichen Fahrzeugkategorien Lkw und Lieferwagen nicht aus einer Nachfragerechnung ermittelt, sondern aus Belastungsanteilen nach Straßentypen berechnet. Aufgrund der praktisch identen Fahrdynamik von Lieferwagen und Pkw wurde für Lieferwagen die „emissionsmodellierungs-relevante“ Geschwindigkeit der Pkw direkt übernommen.
Für Lkw war die Anzahl der auswertbaren Geschwindigkeiten deutlich geringer als für Pkw. Durch die Analyse der Geschwindigkeits- und Belastungsdaten an repräsentativen Zählstellen wurde festgestellt, dass die Lkw-Geschwindigkeiten bei allen Zählstellen praktisch in derselben Größenordnung wie die der Pkw liegen; der Lkw-Verkehr „schwimmt“ im Stadtverkehr also im Verkehrsfluss mit. Daher wurden für die Geschwindigkeit der Lkw die Werte der Pkw übernommen. Ausnahmen bilden vereinzelte Streckenabschnitte, wo die Anpassungsfaktoren auf Basis der Messdaten und eines expert judgment auf den Wert 1 gesetzt wurden.

Die für die Emissionsmodellierung verwendeten Geschwindigkeiten der Linienbusse wurden grundsätzlich aus den Fahrplandaten abgeleitet und entsprechen somit den Reisegeschwindigkeiten.

[23] Die Bezeichnung der Streckenklassen wurde auf Grund der Streckentypenbezeichnung im Verkehrsmodell Wien – MA18 gewählt.

Zunächst wurde im Verkehrsmodell die Streckenfahrzeit aus der Linienfahrzeit berechnet. Diese Fahrzeit wurde anschließend mit den für Pkw ermittelten Geschwindigkeit verglichen und gegebenen Falls auf diese abgemindert. Mit der Ausnahme von Busspuren ist es nicht realistisch, dass sich Linienbusse schneller durch das Netz bewegen als Pkw. Unterstrichen wird diese Annahme dadurch, dass die Haltezeiten im implementierten Fahrplan jeweils mit 0 Minuten belegt sind.[24]

Eine umfassende Beschreibung der Datenanalyse, der ergänzten Daten im Netzmodell, sowie der Ergebnisse und der ermittelten Anpassungsfaktoren wurde der Stadt Wien – MA18 in Form eines Berichts übergeben.

2.6.1.3 Ermittlung der Streckenlängsneigungen

Bei der Emissionsberechnung mit NEMO muss für eine realitätsnahe Modellierung ua die Streckenlängsneigung berücksichtigt werden. Maßgebend auf die Emissionen ist sie vor allem bei steileren Straßenabschnitten und asymmetrischen Verkehrsbelastungen. Die Streckenlängsneigung war im Verkehrsmodell Wien bis dato nicht parametrisiert und sollte im Rahmen der Bearbeitung ermittelt und in das Netzmodell implementiert werden.

Methodisch werden die Höhenkoten durch Verschneiden des Netzgraphen des Verkehrsmodells mit einem digitalen Geländemodell ermittelt. Als Höhenmodell wurden die SRTM-Daten[25] mit einer Flächenauflösung von 70 x 70 Metern und einer Höhenauflösung von einem Meter verwendet.
Um Höheninformationen von Flächenzellen (Rasterzellen) auf Linien zu übertragen, wurden die Start und Endpunkte der Linien bestimmt. Diesen Punkten wurden anschließend die Höhen aus dem Raster, in dem sich die Punkte befinden, zugewiesen. Dies geschah unter Verwendung einer Bereichsfunktion, welche ebenfalls die Höhe der benachbarten Rasterzellen in die Höhenbestimmung einbezieht. Durch die räumliche Assoziation dieser beiden Datensätze war es möglich, die Höhen des Start- und Endpunkts jedes Liniensegmentes zu bestimmen. Folgende Abbildung 5 illustriert die Beziehung zwischen Liniengraph, den Start- bzw. Endpunkten und dem Höhenraster.

[24] Die Fahrplandaten in dieser Form in städtische Modelle einzupflegen ist Stand der Technik, da dadurch einerseits alle, die Nachfragerechnung betreffenden Parameter abbildbar sind und andererseits der Aufwand für die Datenpflege geringer gehalten werden kann.
[25] Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 2000

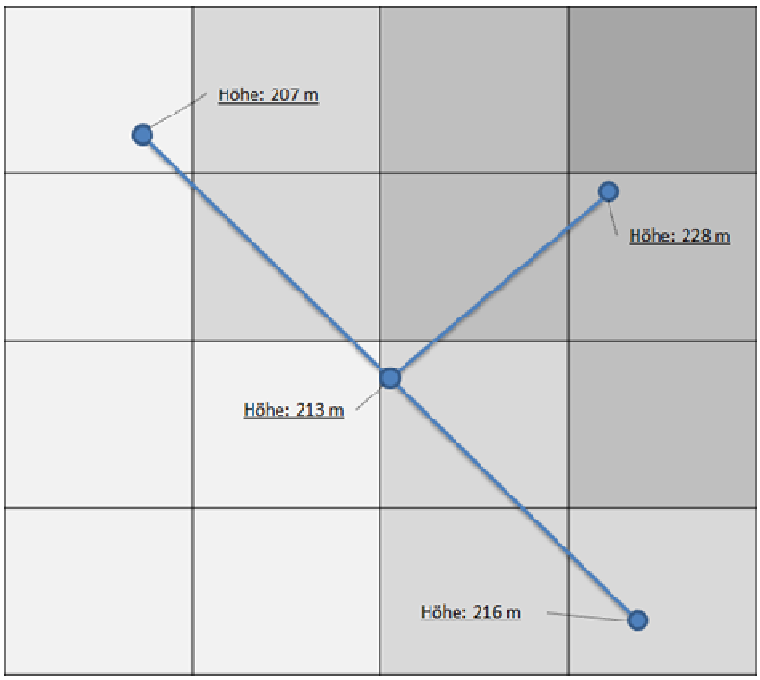


Abbildung 5: Schema zur Berechnung der Höhenkoten

Zu beachten:

Eine Übertragung von Höhendaten auf ein räumliches Liniennetzwerk ist grundsätzlich nur in Fällen möglich, wo davon ausgegangen werden kann, dass die Straßen des Netzwerks tatsächlich auf im Höhenmodell abgebildeter Oberfläche liegen. Dies ist nicht der Fall bei Unter- bzw. Überführungen, Terrasierungen, Tunneln und Brücken. Diese baulichen Maßnahmen treten besonders häufig und intensiv im höherrangigen Streckennetz und in den bergigen Regionen auf. Da Höhenmodelle nur selten über eine Auflösung verfügen, die hoch genug ist, um diese baulichen Details zu berücksichtigen (welche für die gegenständliche Fragestellung jedoch wichtig sind), ist davon auszugehen, dass es in diesen Bereichen zur Übertragung falscher Höheninformationen kommt (Abbildung 6).

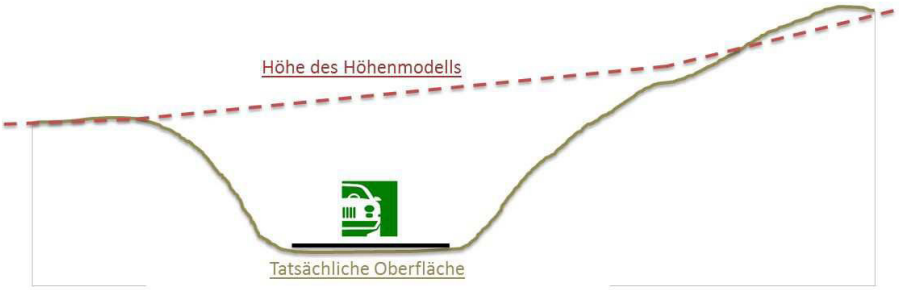


Abbildung 6: Beispiel 1 für eine fehlerhafte Übertragung von Höhendaten auf ein räumliches Liniennetzwerk

Darüber hinaus berücksichtigt die beschriebene Methode der Höhenübertragung nur die Höhe der jeweiligen End- und Startpunkte der Linien. Längsneigungen zwischen diesen Punkten werden nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund sind Streckennetze mit langen Streckenlängen weniger geeignet, da

in diesem Fall zu erwarten ist, dass nur ein Anteil der tatsächlichen Neigung berücksichtigt werden kann (Abbildung 7).

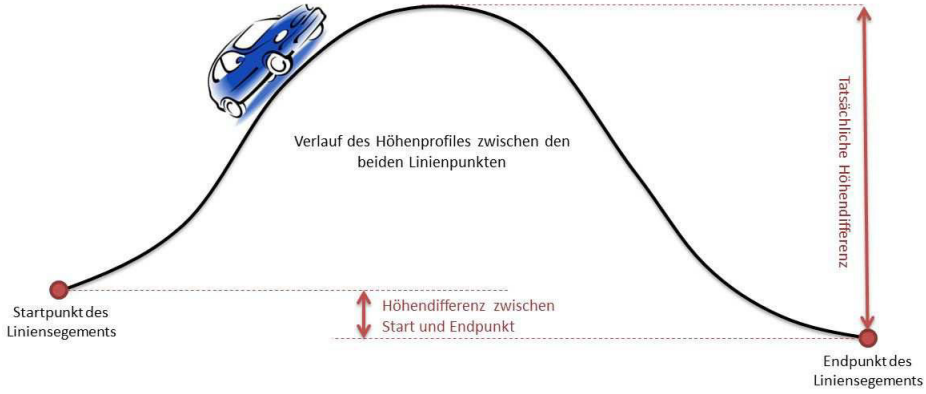


Abbildung 7: Beispiel 2 für eine fehlerhafte Übertragung von Höhendaten auf ein räumliches Liniennetzwerk

Die Längsneigungen der Strecken wurden im Verkehrsmodell schließlich mit der implementierten Sonderfunktion über die Polygonlänge der Stecken und die Höhendifferenz der betreffenden Netzknoten ermittelt und dem VISUM-Streckenattribut „Steigung“ zugeordnet. Somit kann diese Information von der Stadt Wien für weitere Verfeinerungen des Verkehrsmodells verwendet werden.

2.6.2 Schienengebundene Verkehrsmittel

Für die Energie- und Emissionsberechnung ist von Relevanz, welche Charakteristik die betroffenen Strecken aufweisen. Bei der Entwicklung und Kalibrierung des Emissionsmodells wurden die in Tabelle 4 zusammengestellten Streckentypen verwendet[26]. Daher wurden die betroffenen Schienenstrecken im Netzmodell entsprechend dieser Kategorisierung attributiert. Dem Bahnnetz im Wiener Raum wurde generell das Attribut „Flachlandstrecke“ vergeben. Ausnahme bilden die nicht elektrifizierten Abschnitte, die als „Nebenstrecken“ attributiert wurden, und die neue Westbahnstrecke, die als „Hochgeschwindigkeitsstrecke“ attributiert wurde. Die Zuordnung der TRAM- und U-Bahnstrecken war für den Wiener Raum eindeutig. Bei der Wiener Lokalbahn wurde zusätzlich berücksichtigt, dass sie abschnittsweise auf Straßenbahn- und Bahngleisen geführt wird.

Tabelle 4: Streckentypen im Schienengebundenen Verkehr

Streckentypen	ID	Streckentypen	ID
Bergstrecke	BS	Hochgeschwindigkeitsstrecke	HGS
Inneralpine Strecke	IAS	TRAM	TR
Flachlandstrecke	FLS	U-Bahn	UB
Nebenstrecke	NS		

[26] Verweis auf Beschreibung NEMO-RAIL

Die Eigenschaften des Rollmaterials wurden über die benutzerdefinierte Attribute der Linienrouten attributiert. Dadurch ist gewährleistet, dass alle Fahrplanfahrten mit dem Streckennetz verknüpft und somit der Energieeinsatz und die Emissionen verortet werden können.
In der Praxis kommt es vor, dass dieselbetriebene Loks und Triebwagen auf elektrifizierten Strecken eingesetzt werden. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Antriebsart ebenfalls über die Linienroute und nicht über die Strecke (elektrifiziert, nicht elektrifiziert) zu attributieren. Da keine exakten Daten darüber vorliegen, welches Rollmaterial im Jahr 2010 auf welchen Streckenabschnitten wie oft im Einsatz war wurde als Näherung angenommen, dass alle Züge (Linienrouten), die zumindest teilweise auf nicht elektrifizierten Strecken geführt werden, dieselbetrieben sind und alle übrigen elektrisch. Nach Rücksprache mit dem Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der Technischen Universität Graz ist diese Näherung durchaus vertretbar. Sollten jedoch bei zukünftigen Arbeiten genauere Daten dazu vorliegen, können sie durch die angewandte Datenstruktur eingepflegt und bei der Energie- und Emissionsmodellierung berücksichtigt werden.
Die Angebotsform aus dem Netzmodell wurde wie in Tabelle 6 zusammengestellt mit der Parametrisierung des Energie- und Emissionsmodells verknüpft und ebenfalls über die Linienroute parametrisiert.

Tabelle 5: Antriebsarten im schienengebundenen Verkehr

Antrieb	ID
Elektrisch	E
Diesel	D

Tabelle 6: Angebotsformen im schienengebundenen Verkehr und Zuweisung der Verkehrssysteme aus dem Netzmodell

Angebot	ID	Verkehrssystem im Netzmodell
Intercity-Zug	IC	Fernverkehr
Regionalzug	RE	Nahverkehr
S-Bahn	RB	S-Bahn
TRAM	Tram	Tram
U-Bahn	U-Bahn	U-Bahn

Anhand dieser Attributierung kann nach der Berechnung der betrieblichen Kenngrößen mit der Modellierungssoftware die Streckenbelastung als Fahrplanfahrt je Rollmaterial-Streckenkombination in der, in Kapitel 2.5 beschriebenen Form, aus dem Netzmodell ausgelesen werden.

3 Emissionsmodell NEMO

Das Modell NEMO (Network Emission Model) wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz für die Berechnung von Emissionsausstoß und Energieverbrauch auf Verkehrsnetzwerken nach dem aktuellsten Stand der wissenschaftlichen Methoden entwickelt. NEMO verknüpft eine detaillierte Berechnung der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte mit fahrzeugfeiner Verbrauchs- und Emissionssimulation. Das Modell vereint Flexibilität in den berechenbaren Szenarien sowie benutzerfreundliche und effiziente Bedienung. NEMO wurde ursprünglich rein für die Simulation von Straßennetzwerken konzipiert. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde diese NEMO Berechnungsmethodik so erweitert, dass alle in der in der Literatur als relevant eingestuften Mechanismen auf Energieverbrauch und Emissionsausstoß des Straßenverkehrs im Modell abgebildet werden („NEMO-Road"). Zusätzlich wurde der Anwendungsbereich von NEMO erweitert um die Verkehrssektoren Bahn („NEMO-Rail") und Binnenschifffahrt („NEMO-Ship"). Untenstehend werden die wesentlichsten Modellansätze sowie die im Rahmen von STREET2030 implementierten Modellerweiterungen beschrieben. Eine vollständige Dokumentation des Modells NEMO erfolgt in der derzeit noch in Arbeit befindlichen Dissertation (Dippold, 2014).

3.1 NEMO-Road

Das Modell zur Berechnung von Straßennetzwerken (NEMO-Road) wurde bereits mehrfach international publiziert, z.B. in (Dippold, 2012) und (Rexeis, 2008). In einem ersten Schritt berechnet NEMO-Road die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte nach Bestands- und Fahrleistungsanteilen. Die Unterteilung der Fahrzeugflotte in sog. Fahrzeugschichten erfolgt dabei nach folgenden emissions- bzw. energieverbrauchs-relevanten Kriterien:

- Fahrzeugkategorie (z.B. PKW, leichte Nutzfahrzeuge, Solo LKW, ...)
- Antriebsart (z.B. Ottomotoren, Dieselmotoren, elektrische Antriebe)
- Größenklasse (Unterscheidungsmerkmal z.B. Hubraum oder höchstzulässiges Gesamtgewicht)
- Technologieklasse (i.A. Gesetzgebung, nach der das Fahrzeug erstzugelassen wurde ggf. in Kombination mit der eingesetzten Technologie, z.B. bei SNF: „EURO V mit SCR")
- Zusätzlich (nachgerüstete) Abgasnachbehandlungssysteme (z.B. Partikel-Katalysator)
- verwendeter Kraftstoff

Eine Fahrzeugschicht ist z.B. „Solo LKW mit Dieselmotor, höchstzulässiges Gesamtgewicht zwischen 7.5 und 15 Tonnen, Technologiestufe „EURO V mit SCR", betrieben mit handelsüblichem Tankstellendiesel.

Für den Emissionsausstoß auf Straßennetzwerken sind die Fahrleistungsanteile der einzelnen Fahrzeugschichten relevant. Die Berechnung dieser Anteile erfolgt in Abhängigkeit von Bezugsjahr und Straßenkategorie nach folgenden Schema:

(1) Hochrechnung des Kfz-Bestandes nach dem Jahrgang der Erstzulassung, Motortyp und sonstigen Unterscheidungsmerkmalen (Hubraum oder zulässiges Gesamtgewicht) aus der Bestandsstruktur des Vorjahres mittels alters- und fahrzeuggrößenabhängigen Ausfallwahrscheinlichkeiten.
(2) Abschätzung der spezifischen Jahresfahrleistungen der Kfz nach Zulassungsjahrgängen und sonstigen Unterscheidungsmerkmalen mittels alters- und hubraum- bzw. masseabhängigen Fahrleistungsfunktionen.
Für sämtliche Fahrzeugschichten werden von NEMO für die auf den einzelnen Streckenabschnitten gegebenen Fahrzuständen die entsprechenden Emissionsfaktoren simuliert. Grundlage ist dabei die Ermittlung der zyklusdurchschnittlichen normierten Motorleistung aus Fahrzeugdaten sowie aus Parametern die den „durchschnittlichen" Fahrzustand auf dem Streckenabschnitt beschreiben. Diese Parameter sind Fahrbahnlängsneigung, Durchschnittsgeschwindigkeit, Stillstandsanteil sowie die durchschnittliche Bremsverzögerung. Die Einteilung des Straßennetzwerkes in Streckenabschnitte hat dabei mindestens so fein zu erfolgen, dass innerhalb eines Streckenabschnitts homogene Verhältnisse für die wesentlichen Randbedingungen (Längsneigung, Geschwindigkeit, Verkehrsmengen) herrschen.
Die Parametrierung des spezifischen Emissions- und Verbrauchsverhaltens der verschiedenen Antriebskonzepte erfolgt mit Hilfe des ebenfalls am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik entwickelten Modells PHEM (Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model; detaillierte Simulation von Energieverbrauch und Emissionen von PKW und Nutzfahrzeugen, z.B. (Luz, 2013) und (Hausberger, 2012)) mit dem auch die Emissionsfaktoren für das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) berechnet werden. Dazu wurde eine eigene Schnittstelle programmiert, die die komplexeren Verbrauchs- und Emissionskennfelder aus PHEM in die entsprechenden Kennlinien in NEMO überführt.
Im Gegensatz zu NEMO basiert PHEM auf einem zeitaufgelösten Berechnungsansatz (i.A. wird in 1s Schritten gerechnet). Der PHEM-Ansatz eignet sich vor allem für komplexe Berechnungsaufgaben (z.B. Forschung und Entwicklung, Ableitung von Emissionsfaktoren aus In-Use Emissionsmessungen für div. nicht vermessene Fahrsituationen) bringt aber keine Vorteile in der Abbildung von ausgedehnten Straßennetzwerken, da für diese üblicherweise keine Detailinformationen über die Fahrzustände der einzelnen Fahrzeuge (z.B. Fahrzeuggeschwindigkeit und eingelegter Gang in 1Hz) bekannt sind. In diesen Fällen bietet der NEMO-Ansatz einen sehr guten Kompromiss zwischen Bedatungsaufwand und Berechnungsgenauigkeit. Im Vergleich zur Verwendung von „fixen" Emissionsfaktoren (wie sie zum Beispiel aus dem HBEFA entnommen werden können) bietet NEMO dahingehend einen Vorteil, dass nicht nur diskrete Fahrzustände sondern beliebige Kombinationen von Längsneigungen und Durchschnittsgeschwindigkeiten (z.B. aus der Verkehrsüberwachung oder abgeleitet aus Verkehrsmodellen) abgebildet werden können. Zusätzlich können auch in Szenarienrechnungen die zentralen Fahrzeugspezifikationen (z.B. Massen, Nennleistung, Nebenverbraucher) angepasst werden.
Die gesamten Emissionen auf einem in NEMO-Road spezifiziertem Streckenstück berechnen sich dann aus den Fahrleistungen der einzelnen Fahrzeugschichten multipliziert mit deren Emissions- bzw. Verbrauchsfaktoren. NEMO erzeugt dann räumlich aufgelöste Ergebnisse für das Straßennetzwerk z.B. zur Darstellung in ein GIS System oder als Input für die Luftgütesimulation (Schnittstelle zum Modell „GRAL" der TU Graz) sowie zusätzlich die Summen für Energieverbrauch und Emissionen der einzelnen

Fahrzeugschichten. Abbildung 8 gibt einen vereinfachten Überblick über die Modellstruktur von NEMO-Road.

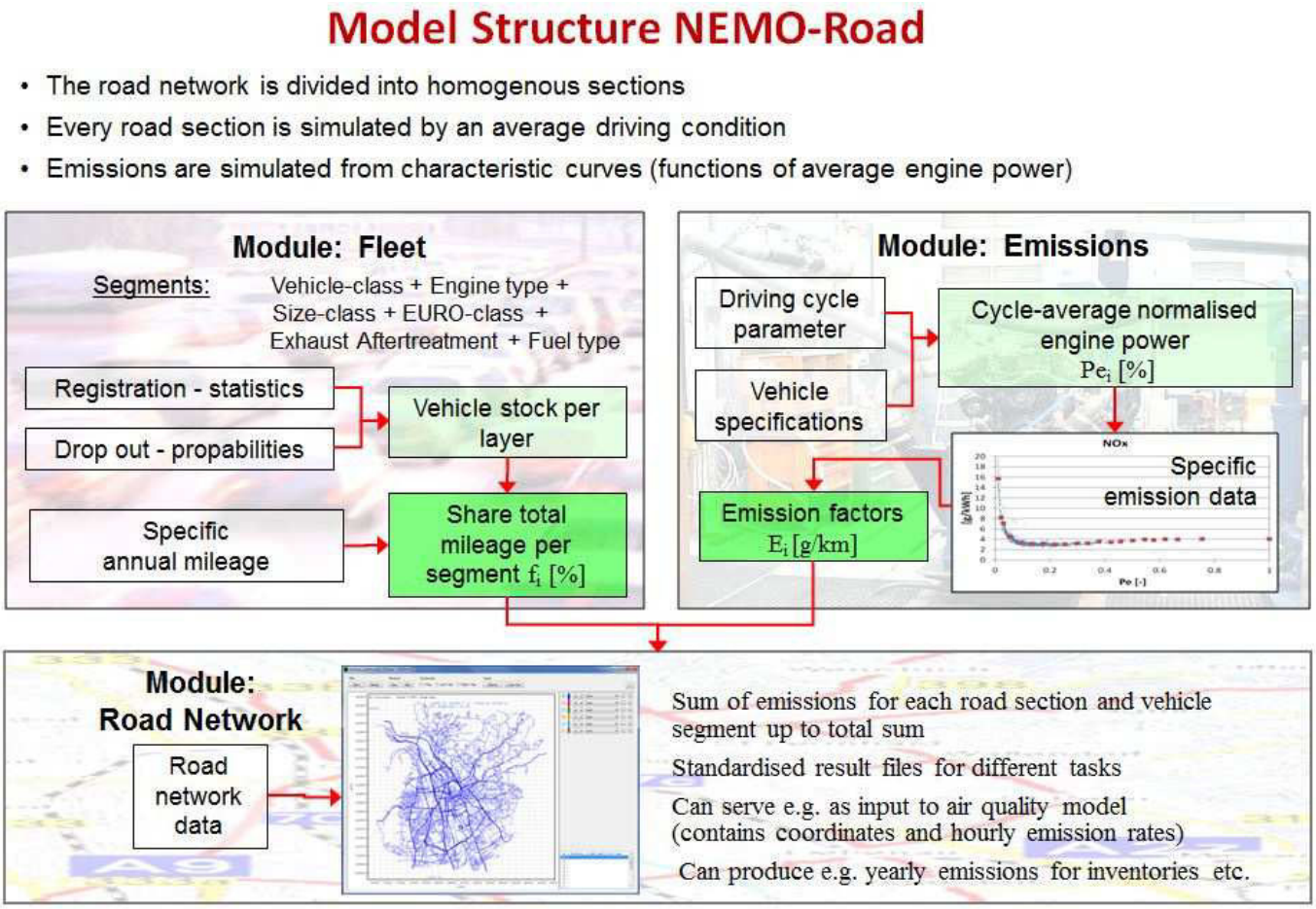


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Modellstruktur von NEMO-Road

In den folgenden Abschnitten werden die Arbeiten dokumentiert in im Rahmen von STREET2030 an NEMO-Road durchgeführt wurden.

3.1.1 Aktualisierung der Modellbedatung für konventionelle Antriebstechnologien

Es wurde die Modellbedatung für Verbrauchs- und Emissionsverhalten konventioneller Antriebstechnologien auf den aktuellsten Stand gebracht. Dieser entspricht im Wesentlichen der aktuellen Version des HBEFA3.1, welches im Frühjahr 2010 veröffentlicht wurde. Das HBEFA3.1 deckt bei PKW und LNF Emissionsstufen bis EURO 4 mit Messungen ab, bei SNF liegen Emissionsmessungen bis inkl. EURO V Fahrzeugen vor. Zusätzlich wurden im Rahmen von STREET2030 verfügbare aktuellere Emissionsmessungen an 10 PKW zertifiziert nach EURO 5 und zwei Fahrzeugen zertifiziert nach EURO 6 verarbeitet. Dabei zeigte sich als ein wesentliches Ergebnis, dass bei den aktuell vermessenen EURO 5 Diesel-PKW (Baujahre ab 2010) wie schon bei den Vorgängermodellen die Senkung der Grenzwerte für NOx im Typprüfzyklus NEDC nicht im realen Emissionsniveau niederschlägt (siehe Abbildung 9). Die vermessenen bereits nach Euro-6 zertifizierten

Fahrzeuge (Abgasstandard verpflichtend ab 2014/15) waren demgegenüber jedoch auch im realen Betrieb sehr sauber. Allerdings wurden erst zwei Euro-6 Diesel-PKW vermessen.[27]

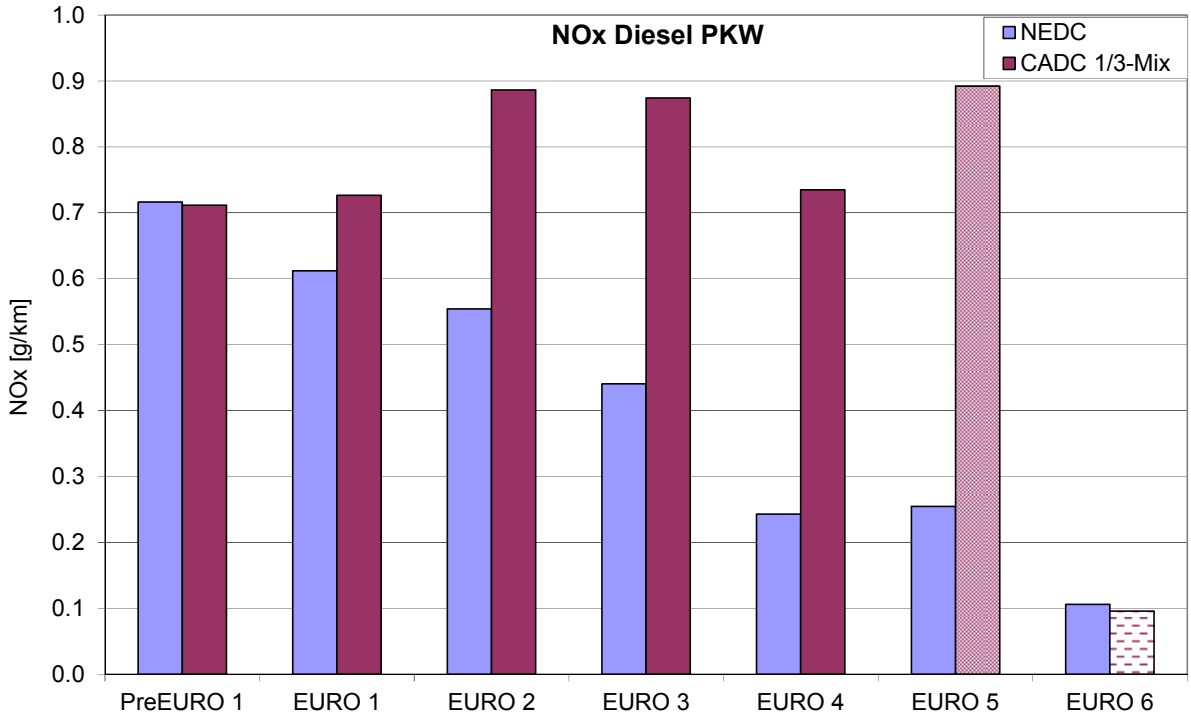


Abbildung 9: Vergleich NOx-Emissionsniveau von Diesel-PKW unterschiedlicher Abgasstandards (NEDC = Typprüfzyklus, CADC = realer Fahrzyklus)

Daten zum Emissionsverhalten von konventionellen Antrieben mit alternativen Kraftstoffen wurden - soweit verfügbar - aus am Institut verfügbaren Messdaten erarbeitet. So wurde beispielsweise das Emissionsverhalten der von den Wiener Linien eingesetzten LPG-Busflotte aus einer Messserie im Auftrag der Wiener Linien abgeleitet, in der verschiedene Bustechnologien unter vergleichbaren Einsatzbedingungen (gefahrene Linien, Fahrzeugbeladung) mit Hilfe von PEMS-Technologie (Portable Emission Measurement Systems) auf der Straßen vermessen wurden. Die NEMO Emissions-Kennlinien für LPG Busse wurden dann anhand des Vergleichs der Messwerte von konventioneller EURO V/EEV Diesel-Technologie mit den Messergebnissen der EEV LPG Busse erstellt. Dabei ergaben sich im Vergleich für LPG deutliche Vorteile für NOx (ca. -65% gegenüber EURO V/EEV Diesel) und PM (ca. -98% gegenüber EURO V/EEV Diesel ohne geschlossenen Partikelfilter) jedoch auch recht deutliche Nachteile im CO2-Ausstoß (ca. +40% gegenüber EURO V/EEV Diesel; hier überwiegt offenbar der Wirkungsgradnachteil des Ottomotors gegenüber dem etwas geringeren Kohlenstoffanteil im LPG). Diese Vergleichswerte gelten allerdings nur für EURO V/EEV Technologie.

[27] Die in Abbildung 9 dargestellten Emissionsfaktoren entsprechen dem Stand zu Redaktionsschluss für die NEMO Bedatung im Rahmen von STREET2030. Zum Zeitpunkt der Erstellung des Endberichts liegen weitere Emissionsmessungen an EURO 5 und EURO 6 Fahrzeugen vor. Dabei bestätigt sich das in Abbildung 9 dargestellte hohe NOx-Niveau für EURO 5 Diesel PKW. Für die erste Generation an EURO 6 Diesel PKW ergibt sich gemäß aktuellster Messungen im CADC im Durchschnitt ein NOx-Ausstoß von rund 0.5g/km was deutlich höher ist als in dieser Studie angenommen. Für valide Emissionsfaktoren sind jedoch noch zusätzliche Messdaten erforderlich.

Weiters wurden in der Bedatung von NEMO Ergebnisse aus aktuellen Untersuchungen zum Leistungsbedarf von Nebenverbrauchern im Fahrzeug (wie z.B. Klimaanlage) berücksichtigt. Dadurch erhöht sich im Vergleich zum HBEFA3.1 der Motorleistungsbedarf, was sich v.a. in Fahrsituationen im Innerortsbereich in geringfügig höherem Kraftstoffverbrauch und Emissionsausstoß äußert.
Für die Berechnung der PM10 Emissionen des Straßenverkehrs werden in NEMO auch die PM_{10} Emissionen durch Aufwirbelungs- und Abriebsprozesse ausgegeben („PM10 non-exhaust“). In NEMO wurden diesbezüglich analog zur Vorgangsweise in der Österreichischen Luftschadstoffinventur Emissionsfaktoren aus (Dühring, 2004) übernommen. Hier ist insbesondere zu beachten, dass diese Werte bei der Umlegung auf lokale und saisonale Gegebenheiten mit großen Unsicherheiten behaftet sind. In diesem Zusammenhang bietet NEMO dem User die Möglichkeit, auch individuelle Faktoren für PM10 non-exhaust vorzugeben.
In der Parametrierung der Flottenzusammensetzung für NEMO-Road wurden aktuelle statistische Daten berücksichtigt, die im Rahmen von (Schwingshackl, 2012) erhoben wurden. Der wesentlichste Unterschied zum HBEFA3.1 zeigt sich hier in geringeren Anteilen der Diesel-PKW an den Neuzulassungen in den Jahren 2008 bis 2011. Diese Werte stammen im HBEFA3.1 noch aus einer Prognose. Durch den aktuell beobachteten rückläufigen Trend bei den Dieselneuzulassungen wurde in STREET2030 auch die Prognose dieses Wertes für die kommenden Jahre überarbeitet. Es wird jetzt davon ausgegangen dass sich die Anteile der Otto- und Diesel-PKW an den Neuzulassungen bei rund 50% einpendeln.

3.1.2 Vervollständigung der Fahrzeugkategorien

Emissionsausstoß und Energieverbrauch von Zweirädern waren zu Projektbeginn von STREET2030 noch nicht in NEMO abgebildet, da die entsprechenden Emissionsfaktoren des HBEFA nicht mittels PHEM berechnet werden, sondern mittels eines vereinfachten Ansatzes direkt aus Emissionsmessungen abgeleitet wurden. Somit konnte das Standardverfahren der NEMO Bedatung nicht verwendet werden. Im Rahmen von STREET2030 wurden nun auch die Zweiräder in NEMO aufgenommen. Analog zum HBEFA wurden folgende drei Zweirad Kategorien in NEMO definiert:

- Kleinkrafträder („Mopeds“)
- Motorräder mit 4-taktmotor
- Motorräder mit 2-taktmotor

In NEMO wurde die im HBEFA vorgenommene weitere Unterscheidung dieser Kategorien in Hubraumklassen analog zur Vorgangsweise bei PKW vereinfacht und pro Zweirad-Kategorie und Emissionsstandard jeweils ein flottendurchschnittliches Fahrzeug definiert. Für diese flottendurchschnittlichen Zweiräder wurden in einem ersten Schritt repräsentative Fahrzeugspezifikationen (Massen, Motorisierung, Fahrwiderstandparameters) recherchiert. Mit diesen Parametern wurde mittels Längsdynamiksimulation in PHEM für alle HBEFA Zyklen die zyklusdurchschnittliche Motorleistung simuliert. Durch die Zusammenführung der im HBEFA 3.1 angegebenen Emissionsfaktoren mit den Simulationsergebnissen aus PHEM konnten schließlich die NEMO Emissionskennlinien für alle Zweiradkategorien parametriert werden.

Die Parametrierung des NEMO Flottenmodells (z.B. Bestandsentwicklung, Ausfallwahrscheinlichkeiten, Fahrleistungsverteilungen etc.) erfolgte für Zweiräder durch die Übernahme der Daten aus der österreichischen Luftschadstoffinventur (Schwingshackl, 2012). Damit sind nun alle Fahrzeugkategorien des Straßenverkehrs vollständig in NEMO-Road abgebildet.

3.1.3 Berücksichtigung des Alterungseinflusses auf das Emissionsverhalten

Das Emissionsverhalten von Kfz wird auch durch das Fahrzeugalter bzw. den Kilometerstand beeinflusst. Der maßgebliche Mechanismus dafür ist vor allem die Alterung der Katalysatoren welche mit fortschreitender Lebensdauer an katalytischer Aktivität verlieren. Dieser Effekt ist bei neuen Fahrzeuggenerationen weniger ausgeprägt als bei Fahrzeugmodellen zu Beginn des Katalysatorzeitalters, da mittlerweile vom Gesetzgeber strenge Richtlinien für die Lebensdauer sowie für die Selbstdiagnose der emissionsrelevanten Fahrzeugsysteme erlassen wurden.
Um diesen Einfluss der Kilometerfahrleistung von Fahrzeugen in NEMO berücksichtigen zu können wurde ein Alterungsmodell integriert. Dabei wurde der in (Geivandis, 2004) vorgeschlagene Ansatz eines linearen Modells für den Alterungseinfluss, als Funktion des Kilometerstands, übernommen. Dazu wird in NEMO in einem ersten Schritt für das Berechnungsjahr der durchschnittliche Kilometerstand für jede Fahrzeugschicht ermittelt. Die Berücksichtigung des Alterungseinflusses erfolgt dann durch lineare Korrektur des Basisemissionsfaktors aus den Emissionskennlinien, wobei der Basiswert für das Emissionsverhalten für eine Laufleistung von 50 000km steht.
Derzeit sind aus der Literatur (Geivandis, 2004) lediglich Daten für den Alterungseinfluss bei PKW-Ottofahrzeugen bis zum Emissionsstandard EURO 4 (Baujahre bis 2004) vorhanden. Diese wurden in NEMO integriert. Für neuere Fahrzeuggenerationen und Dieselfahrzeugen wird in NEMO analog zur Vorgangsweise im HBEFA3.1 mangels verfügbarerer Daten kein Alterungseinfluss angenommen.

3.1.4 Vorgabe einer Verteilung an verfahrenen Kraftstoffen je Fahrzeug- und Antriebskategorie

In der Realität können von bestimmten Antriebskonzepten in der Fahrzeugflotte verschiedene Kraftstoffe verwendet werden die sich in Punkto Energieverbrauch [in J], CO_2-Emissionen sowie Emissionsverhalten bei einzelnen Schadstoffkomponenten unterschieden. Als Beispiel dafür seinen hier Ottomotoren genannt, die mit Benzin, E85 oder CNG betrieben werden können. Um diese Aufteilung der in der Flotte verfahrenen Kraftstoffe in den Berechnungen berücksichtigen zu können wurde NEMO so erweitert, dass je Kombination aus Fahrzeug- und Antriebskategorie sowie Berechnungsjahr eine Verteilung an verwendeten Kraftstoffe vorgegeben werden kann. Dabei werden in den Berechnungen folgende Kraftstoffspezifikationen berücksichtigt:

- unterer Heizwert [kWh/kg]
- Gehalt an fossilen Kohlenstoff angegeben in [kg CO2/kg Kraftstoff]
- geändertes Emissionsverhalten bei regulierten Abgaskomponenten im Vergleich zum Referenzkraftstoff der Antriebskategorie

In der Modellbedatung wurden folgende Kombinationen aus Antriebskategorien und Kraftstoffen hinterlegt:

- Ottofahrzeuge: handelsüblicher Benzin (Beimischung an Biokraftstoffen variiert dabei die Kraftstoffspezifikation über die Jahre), Bioethanol (E85), Erdgas (CNG), Flüssiggas (LPG)
- Dieselfahrzeuge: handelsüblicher Benzin (Beimischung an Biokraftstoffen variiert dabei die Kraftstoffspezifikation über die Jahre), reiner Biodiesel (RME), Pflanzenöl

Es besteht die Möglichkeit beliebige weitere Kraftstoffe in die NEMO Berechnungen mitaufzunehmen.

3.1.5 Parametrierung von Kraftstoffverbrauch und CO2-Ausstoß anhand Daten aus dem CO2-Monitoring der Neuzulassungen

Der Kraftstoffverbrauch (KV) und damit verbunden die CO2-Emissionen eines Neuzulassungsjahrgangs lassen sich mit fixen Modellparametern für die einzelnen Fahrzeugschichten (d.h. den Kennlinien in NEMO für jede EURO-Klasse) nicht hinreichend genau abbilden. Ursachen dafür sind die fortschreitende technologische Entwicklung sowie Abweichungen der tatsächlich in der Flotte zugelassenen Fahrzeuge vom Durchschnittsfahrzeug im Berechnungsmodell (z.B. bei Fahrzeugmassen, Motorisierung etc.). Daher wurde in NEMO ein Algorithmus implementiert, der eine Kalibrierung des Modells für KV und CO2 anhand von Zielwerten für jeden Neuzulassungsjahrgang ermöglicht. Als Vorgabe dienen dabei die im Rahmen des CO2-Monitorings der Statistik Austria für PKW erhobene Daten zum Kraftstoffverbrauch in der Typprüfung. Für die Extrapolation des Trends auf zukünftige Jahre eignen sich die Vorgaben der Europäischen Kommission bzw. daraus abgeleitete Szenarien zum CO2-Ausstoß der zukünftigen Neuzulassungsjahrgänge.

Eine mittlerweile internationale oft publizierte Tatsache ist die Diskrepanz zwischen KV und CO2 in der Typprüfung und im realen Betrieb der Fahrzeuge, z.B. (Mock, 2013). Da für die Ergebnisse der NEMO Berechnungen ausschließlich die realen Werte relevant sind, die Zielwerte sich jedoch auf die Typprüfung beziehen, werden in NEMO noch zusätzlich Faktoren für die Diskrepanz von Typprüfung und realem Fahren berücksichtigt. Diese Faktoren sind als Funktion des Berechnungsjahrs vorzugeben und wurden in der aktuellen NEMO Parametrierung aus (Schwingshackl, 2013) entnommen.

Der Algorithmus zur Parametrierung von KV und CO2-Emissionen ist im Modell für alle Fahrzeugkategorien hinterlegt, wurde aber in der vorliegenden Studie nur für PKW verwendet.

3.1.6 Verdunstungsemissionen

Verdunstungsemissionen sind Kohlenwasserstoffemissionen die aus dem Tanksystem eines Fahrzeugs entweichen. Diese sind aufgrund der Kraftstoffspezifikationen nur bei Benzinkraftstoffen relevant (Beginn der Siedekurve knapp über Umgebungstemperatur). Im Rahmen von STREET2030 wurde in NEMO das Berechnungsmodell für Verdunstungsemissionen aus (Mellios, 2009) integriert. Dieses Modell findet ebenfalls im HBEFA Anwendung.

In den Berechnungen wird dabei unterschieden zwischen Verdunstungsemissionen während Parkvorgängen und während des Betreibens des Fahrzeuges. Dabei gehen die monatlichen Minimal- und Maximaltemperatur sowie eine tageszeitdurchschnittliche Parkdauerverteilung mit ein. Zusätzlich abhängig sind die Verdunstungsemissionen jeder Fahrzeugkategorie vom Tankvolumen, dem durchschnittlichen Tankbefüllungsgrad, dem Vorhandensein von speziellen Kraftstoffleitungssystemen und dem Aktivkohlefilter sowie der jeweiligen Aktivkohlefiltergröße.

Die so erhaltenen Verdunstungsemissionen werden im Modell über alle Monat, separat für Parkverdunstungen und Betriebsverdunstungen, gemittelt. Während die Parkverdunstungen in NEMO separat ausgewiesen werden, werden die Betriebsverdunstungen über eine durchschnittliche Tagesfahrtlänge in g/km umgerechnet und direkt auf die HC Emissionen aus dem Verbrennungsprozess aufgeschlagen.

3.1.7 Abbildung zukünftiger Antriebstechnologien

Ein zentraler Punkt der Arbeiten in STREET2030 war die Erweiterung des Berechnungsmodells um nicht konventionelle (d.h. nicht rein auf einem Verbrennungsmotor basierende) Antriebskonzepte. Input für diese Modellerweiterungen kam aus WP3 („Technological development – vehicle and fuel technology) in dem die Rahmenbedingungen für zukünftige Entwicklungen bei Antriebssystemen recherchiert wurden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus WP3 ist im Anhang dokumentiert.
Folgende Antriebstechnologien wurden als relevant für die derzeit absehbare Entwicklung der Fahrzeugflotte angesehen und in NEMO integriert:

3.1.7.1 Hybridfahrzeuge (HEV, Hybrid Electric Vehicles)

Hybridfahrzeuge besitzen neben dem Verbrennungsmotor (VKM) noch zusätzlich (mindestens) einen Elektromotor (EM) sowie einen zusätzlichen elektrischen Energiespeicher. Dabei sind verschiedene Konfigurationen des aus VKM und EM bestehenden Antriebsstrangs möglich (parallel, leistungsverzweigt oder seriell, siehe Anhang). Die Abgrenzung von Hybridfahrzeugen gegenüber den weiter unten beschriebenen Plug-In-Hybrid bzw. Range-Extender Fahrzeugen erfolgt dadurch, dass HEV nicht mit externem Strom versorgt werden. Gegenüber rein mit VKM betriebenen Fahrzeugen ergeben sich für HEV Verbrauchs- und Emissionsvorteile durch Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation), Lastpunktverschiebung (VKM wird durch Interaktion mit dem EM in günstigeren Betriebspunkten betrieben) sowie durch teilweise Abschaltung des VKM in ungünstigen Betriebspunkten. Nachteile gegenüber konventionellen VKM-Fahrzeugen entstehen für HEV Konzepte unter Umständen durch das höhere Fahrzeuggewicht.
Eine detaillierte Abbildung des komplexen Antriebsstrangs von HEV mit den damit verbunden Betriebsstrategien im fahrzeugflotten-orientierten Modell NEMO erschien nicht zielführend und auch nicht möglich. Stattdessen wurden im Detailmodell PHEM generische HEV Fahrzeuge erzeugt (PKW-Otto, PKW-Diesel, Stadtbus). Mit diesen – als parallel hybrid ausgelegten – Fahrzeugen wurden alle Fahrzyklen des HBEFA simuliert. Die so erstellten Ergebnisse für KV und Emissionen wurden über die Standardschnittstelle in NEMO importiert und in die Kennlinien für spezifischen Kraftstoffverbrauch und spezifische Emissionen über zyklus-durchschnittliche Antriebsleistung umgewandelt. Weiters waren die Fahrzeugspezifikationen der HEV-Klassen in NEMO zu bedaten (Mehrgewicht gegenüber konventionellem Antrieb durch elektrischen Antriebsstrang, zum Teil kompensiert durch kleineren VKM). Mit diesem Ansatz konnte das Verhalten von Hybridfahrzeugen in guter Näherung abgebildet werden.[28]

[28] Bei Gegenüberstellung vergleichbarer reiner VKM Fahrzeuge der gleichen Fahrzeuggeneration ergeben sich im Modell Verbrauchseinsparungen für HEV von knapp 20% bei Innerortsfahrten sowie einigen wenigen Prozent bei Autobahnfahrt (Werte für Otto-PKW). Die entsprechenden Verbrauchsvorteile für Diesel-PKW sind um einige Prozentpunkte geringer. Dieser Vergleich wird auch maßgeblich davon beeinflusst, welche Annahmen zu dem im reinem VKM Fahrzeug eingesetzten

Weiters besteht im Modell auch die Möglichkeit, das Potenzial zur Verbrauchs- und CO2-Reduktion in der Fahrzeugflotte durch HEV Technologie explizit über das Modul „CO2-Kalibierung“ (siehe Abschnitt 3.1.5) vorzugeben und nicht implizit über die Vorgabe von Neuzulassungsanteilen an HEV Fahrzeugen abzubilden. Diese Option wurde in den berechneten Szenarien in dieser Studie für die Fahrzeugkategorie PKW gewählt.

3.1.7.2 Plug-In Hybride (PHEV) bzw. Range extender electric vehicles (REEV)

Plug-In Hybride bzw. Range-Extender Fahrzeuge können sowohl mit extern eingespeistem Strom als Elektrofahrzeug als auch mittels VKM betrieben werden. Dabei unterschieden sich die beiden Fahrzeugkonzepte vor allem in der Auslegung der einzelnen Antriebskomponenten (PHEV ausgestattet sowohl mit vollwertigem EM- als auch vollwertigem VKM-Antrieb; REEV vorwiegend ausgelegt auf EM-Betrieb, VKM dient nur in seltenen Fälle als Reichweitenverlängerer).
In NEMO wird diese Antriebstechnologie durch eine Kombination der Berechnungsmethodik für VKM/HEV und für E-Fahrzeuge (Beschreibung siehe nächster Absatz) simuliert. Eine zentrale Rolle in der Simulation von PHEV Fahrzeugen auf Straßennetzwerken besteht in der Zuweisung der Betriebsmodi (E-betrieb oder VKM-betrieb) auf die einzelnen Streckenabschnitte bzw. Fahrzustände. Ob ein PHEV/REEV Fahrzeug auf einem bestimmten Streckenabschnitt entweder elektrisch oder mittels VKM betrieben wird hängt von vielen Randbedingungen ab, u.a.:

- Elektrische Reichweite und Betriebsstrategie des Fahrzeugs
- Nutzung des Fahrzeugs (bereits zurückgelegte Fahrtstrecke)
- Verfügbarkeit einer Ladestation beim letzten Parkvorgang

Im Emissionsmodell muss diese Aufteilung zwischen elektrischem Fahren bzw. VKM-Betrieb für die auf einem konkreten Streckenabschnitt verkehrenden Fahrzeugflotte beantwortet werden. Eine detaillierte Modellierung würde somit Daten benötigen die einem Emissionsmodell im Allgemeinen nicht zur Verfügung stehen. Weiters stehen auch noch keine Daten zur typischen Nutzung von PHEH Fahrzeugen zur Verfügung. In den Berechnungen mussten daher vereinfachte Annahmen zur Aufteilung zwischen elektrischem Fahren bzw. VKM-Betrieb getroffen werden. Dabei wurde eine fixe Verteilung zwischen E-Betrieb und VKM als Funktion der Straßenkategorie vorgegeben, siehe Tabelle 7. Diese Werte wurden sehr grob aus angenommener elektrischer Reichweite der Fahrzeuge (50 km), und einer durchschnittlichen Fahrtlängenverteilung geschätzt. PHEV Antriebe sind im Modell nur für PKW und LNF angelegt, für andere Fahrzeugkategorien erscheint dieses Antriebskonzept aus derzeitiger Sicht nicht relevant.

Tabelle 7: Anteile elektrisches Fahren im Betrieb von PHEV Fahrzeugen

innerorts	außerorts	Autobahn
70%	25%	15%

Technologien getroffen werden (Anteile Start/Stopp-Systeme in der Flotte, „Mikro-hybrid“-Systeme). Für Stadtbusse wurden Verbrauchsvorteile von rund 10% von HEV gegenüber konventioneller Dieseltechnologie ermittelt.

3.1.7.3 Elektrofahrzeuge ((B)EV , (Battery) Electric Vehicles)

Elektrofahrzeuge verwenden zum Betrieb ausschließlich elektrische Energie. Diese wird in der Regel in einer Batterie gespeichert bzw. z.B. bei Oberleitungsbussen permanent von außen zugeführt. Die Abbildung des Energieverbrauchs dieses Antriebstyps erfolgt in NEMO in einem dreistufigen Ansatz:

1. Simulation des zyklusdurchschnittlichen Bedarfs an Antriebsleistung aus den Kennwerten des Fahrzustandes und der Fahrzeugspezifikationen
2. Ermittlung des Stromverbrauchs aus einer Kennlinie für den Gesamtwirkungsgrad des Antriebs (inkl. Verluste beim Laden der Batterie aus dem Netz) als Funktion der durchschnittlichen normierten E-Motorleistung
3. Addition des Stromverbrauchs der Nebenverbraucher im Fahrzeug (unter Berücksichtigung der Ladeverluste der Batterie)

Die Kennlinien für Punkt 2. wurden anhand von Simulationsergebnissen für ein durchschnittliches Elektrofahrzeug berechnet mit PHEM erstellt. In PHEM stehen für die Simulation von Elektrofahrzeugen eigene Modelle für E-Motor, Batterie und Betriebsstrategie (Rekuperation) zur Verfügung. Ein wichtiger Parameter bei der Ermittlung des Stromverbrauchs von E-Fahrzeugen ist der Betrieb von Zusatzverbrauchern im Fahrzeug. So muss z.B. für die Beheizung des Innenraums eines E-Fahrzeuges eine beträchtliche Menge Strom aus der Batterie entnommen werden, während bei konventionellen Fahrzeugen diesbezüglich zum größten Teil die Abwärme des VKM verwendet wird. Die in dieser Studie getroffenen Annahmen bezüglich der Bedatung des durchschnittlichen E-PKW sind kompatibel mit den Ergebnissen aus (Kühlwein, 2012). Der durchschnittliche E-PKW hat im Modell eine Leergewicht von 1400kg, eine E-Motor Nennleistung von 60kW und einen durchschnittlichen Verbrauch an Netzstrom von 0,2kWh/km bei Innerortsfahrt sowie ca. 0,29kWh/km bei Autobahnfahrt.

Reine Elektrofahrzeuge wurden in NEMO für die Fahrzeugkategorien PKW, LNF sowie Zweiräder bedatet. Bei schweren Nutzfahrzeugen sind rein elektrische betriebene Fahrzeugkonzepte derzeit technologisch nicht absehbar (bzw. bei Stadtbussen O-Busse in den gerechneten Szenarien nicht enthalten).

3.1.7.4 Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV, Fuel Cell Electric Vehicles)

Brennstoffzellenfahrzeuge sind E-Fahrzeuge bei denen die benötigte elektrische Energie direkt an Bord mithilfe von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle erzeugt wird. Als Treibstoff können entweder direkt Wasserstoff oder andere Stoffe verwendet werden, aus denen Wasserstoff an Bord mittels eines Reformers gewonnen werden kann (z.B. Ethanol). Im Rahmen von STREET2030 wurden in NEMO die Vorbereitungen zur Abbildung von Brennstoffzellenfahrzeugen getroffen (Simulationsansatz, Erweiterung des Flottenmodells). Da diese Antriebstechnologie jedoch für die gerechneten Szenarien als nicht relevant eingeschätzt wurde erfolgte keine Bedatung der Modellelemente.

3.1.8 Koppelung Emissionsmodell – Verkehrsmodell

Die Charakterisierung des Fahrzustandes ist ein entscheidender Parameter in der Berechnung von Energieverbrauch und Emissionen des Straßenverkehrs. Vor allem wenn hohe Anforderungen an die örtliche Auflösung der Ergebnisse gegeben sind (z.B. bei nachfolgender Modellierung der Luftgüte) ist eine korrekte Zuweisung der Verkehrsverhältnisse an lokale Gegebenheiten wichtig.

In nahezu allen Anwendungen einer räumlich aufgelösten Emissionsmodellierung kommen Verkehrsmodelle zur Verwendung, um die Verteilung der Verkehrsleistungen am Straßennetz zu ermitteln. Die dabei angewendete Routensuche, -bewertung und -auswahl basiert auf den ermittelten belastungsabhängigen Netzwiderständen, die sich für die Netzelemente Anbindung, Strecke und Knoten aus mehreren Größen (Distanz, Zeit, Kosten, Streckencharakteristik, etc.) zusammensetzen. Wesentlich für die Energie- und Emissionsmodellierung generell ist die realitätsnahe Abbildung der Kfz-Geschwindigkeit im Wegenetz und – für die Kopplung mit NEMO im Speziellen – dass die Knotenverlustzeiten über die Verlustzeiten der Strecken mit ausgegeben werden können. Dazu wurde in Kapitel 2.4 (Entwicklung der Methode zur Berechnung der emissionsmodellierungs-relevanten Geschwindigkeit) eine Methode ausgearbeitet und bei der Datenaufbereitung für die Kopplung mit NEMO angewandt.

3.2 NEMO-Rail

Bei der Ermittlung von Energieverbrauch und Emissionsausstoß der Bahn basieren die derzeit verfügbaren Methoden im Wesentlichen auf der Eisenbahnstatistik (Stromverbrauch, Dieselverbrauch) und deren Extrapolation. In den Berechnungen mit dem STREET2030 Gesamtmodell sollten diese Werte methodisch sauber und in den Szenarien flexibel ermittelt werden können. Für diese Aufgabenstellung wurde analog zur Modellkette PHEM – NEMO-Road für den Straßenverkehr die Modellkette RECEM – NEMO-Rail für die Abbildung des schienengebundenen Verkehrs geschaffen. RECEM (Railway Energy Consumption and Emission Model) ist ein Tool zur detaillierten zeitaufgelösten Simulation von Energieverbrauch und Emissionsausstoß von Schienenfahrzeugen, wobei beliebige Zugtypen abgebildet werden können. NEMO-Rail dient somit zur Umlegung der Ergebnisse aus RECEM auf große Schienennetze.

3.2.1 Das Modell RECEM

Das Modell RECEM ist analog zu PHEM ein Längsdynamikmodell in dem jedoch speziell die Charakteristika des Schienenverkehrs bezüglich Fahrzeug- und Antriebskonfigurationen sowie Fahrverhalten abgebildet sind. In RECEM können alle Typen an Schienenfahrzeugen (Elektro-, Diesel- sowie dieselelektrischer Antrieb; Personen- und Güterverkehr) simuliert werden.
Das Fahrverhalten im klassischen Zugverkehr unterscheidet sich signifikant vom dem des Straßenverkehrs. So ist der Fahrgeschwindigkeitsverlauf bei Schienenfahrzeugen im Wesentlichen durch folgende Einflussgrößen bestimmt:

- die Streckencharakteristik (bestimmt durch das „VzG“ (Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten und das Höhenprofil)
- vorgeschriebene Stopps (Bahnhöfe, Ausweichen)
- die Zugspezifikationen (Massen, Leistungsvermögen der Lokomotive(n), eingesetzte Waggons)

Der individuelle Fahrstil des Lokführers hat weit weniger Einfluss auf das Fahrverhalten (und damit auf den Energieverbrauch und den Emissionsausstoß) als im Straßenverkehr. In RECEM wurde eine

Methodik entwickelt, mit der anhand der oben genannten Eingangsparameter realistische Geschwindigkeitsprofile für beliebige Fahrstrecken und Zugtypen erzeugt werden. Diese sind dann die Grundlage für die nachfolgende Berechnung von Energieverbrauch und den Emissionen. In den RECEM Rechnungen können jedoch auch Ist-Geschwindigkeitsverläufe, die z.B. in Messfahrten aufgezeichnet wurden, vorgegeben werden. Diese Methodik wurde z.B. zur Simulation des Straßenbahnverkehrs verwendet, wo der Geschwindigkeitsverlauf im Gegensatz zum klassischen Zugverkehr auch maßgeblich von anderen Verkehrsteilnehmern beeinflusst wird.
Das Programm wurde in VB.net umgesetzt und kann vom Benutzer über eine grafische Oberfläche gesteuert werden (Abbildung 10).

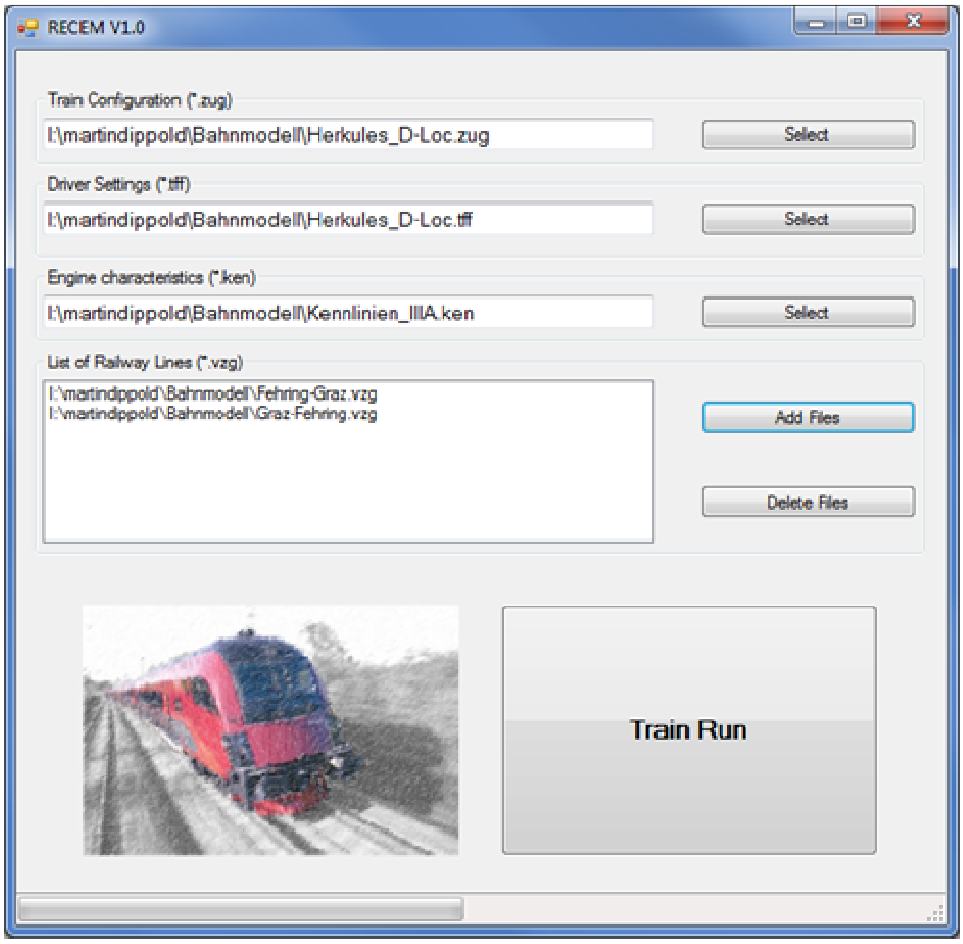


Abbildung 10: RECEM Oberfläche

In die Berechnung gehen folgende vier Eingabedatensätze ein:

1. Zug-Konfiguration

   Es sind die Spezifikationen der Lok(s) und der Waggons vorzugeben. Diese sind u.a. das Antriebskonzept der Lok inklusive der damit verbundenen Kennzahlen (Zugkraftkennlinie, Motornennleistung, Rekuperationsfähigkeit etc.) sowie Massen, Fahrwiderstände und max. zulässige Fahrgeschwindigkeit der Waggons.
2. Spezifikation des Fahrverhaltens

Diese Parameter werden im Fahrermodell zur Berechnung des Ist-Geschwindigkeitsverlaufes aus dem VzG-Signal verwendet. Die wichtigsten Kennwerte sind:

- Zielwerte für Beschleunigung und Verzögerung als Funktion der Fahrgeschwindigkeit
- minimale Verweilzeit bei einer Fahrgeschwindigkeit, als Kriterium ob bei einer kurzzeitigen Erhöhung der zulässigen Geschwindigkeit ein Beschleunigungsvorgang durchgeführt wird oder nicht
- Ausnutzungsgrad des Rekuperationsvermögens durch den Lokführer

3. Motorcharakteristik des Verbrennungskraftmotors

   Kommt im Antriebskonzept des Zuges ein Verbrennungskraftmotor zum Einsatz sind Kennlinien für Kraftstoffverbrauch (FC), Stickstoffoxid (NOx), Kohlenwasserstoff (HC), Kohlenmonoxid (CO) und die Partikelmasse (PM) als Kennlinie über die normierte Leistung vorzugeben.

4. Strecken-Charakteristik

   Wie bereits oben erläutert kann in RECEM die Strecke auf zwei verschiedene Methoden angegeben werden:

   - „VzG"-Modus: Es sind die „örtlich zulässige" Geschwindigkeit", das Höhenprofil sowie die Haltezeiten über der Streckenlänge vorzugeben. RECEM berechnet dann mittels Fahrermodell und Längsdynamik den Verlauf der Fahrgeschwindigkeit.
   - Ist-Geschwindigkeits-Modus: Eingelesen werden die Ist-Geschwindigkeit als Vorgabe sowie das Höhenprofile jeweils als Funktion der Fahrzeit.

Mit diesen Eingabedaten berechnet RECEM zeitaufgelöst (Zeitschritte im Bereich von 1Hz bis 10Hz) die benötigte Antriebsleistung, den Energieverbrauch sowie im Falle eines VKM Kraftstoffverbrauch und Emissionen. Zusätzlich wird die durch Rekuperation des E-Antriebs gewonnene überschüssige und wieder ins Stromnetz der Bahn eingespeiste elektrische Energie ausgewiesen.

RECEM wurde anhand von Messfahrten an einem ÖBB Intercity sowie an einer Rangierlok der Steiermärkischen Landesbahnen im Rangierbetrieb validiert. Beispielhaft sind nachfolgend die Ergebnisse für den ÖBB Intercity erläutert. Bei der Messfahrt von HBF Graz nach Bahnhof Wiener Neustadt wurden Fahrgeschwindigkeit mittels GPS aufgezeichnet sowie die von der E-Lok angezeigte vom Netz entnommene bzw. wieder ins Netz eingespeiste Energie am Führerstand der Lokomotive mitnotiert. Als Input für die RECEM Simulation dienten Lok- und Passagierwagendaten sowie Daten zu VzG und Höhenprofil der Südbahn, die vom Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz zur Verfügung gestellt wurden. Abbildung 11 zeigt den Vergleich zwischen Messung und Simulation für elektrischen Energieverbrauch über der Fahrtstrecke. Messung und Simulation liegen im Bereich von +/-5% und können gut durch Unsicherheiten in den Eingangsparametern (genaues Zuggewicht, Fahrwiderstandsparameter, Umgebungsbedingungen etc.) erklärt werden.

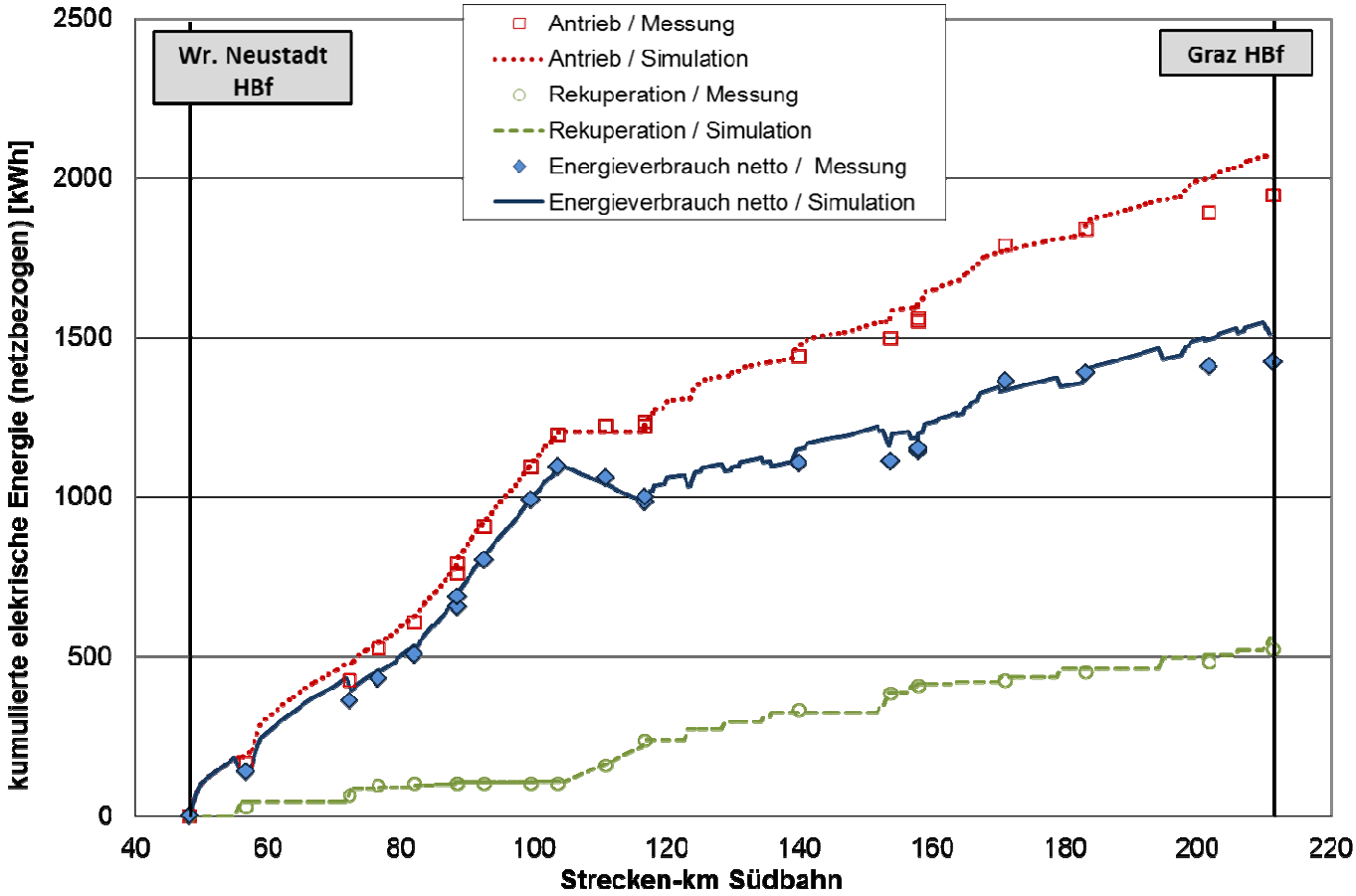


Abbildung 11: Vergleich von berechnetem und gemessenem elektrischen Energieverbrauch für einen Intercity Personenzug

3.2.2 Abbildung des Schienenverkehrs in Österreich durch die Modellkette RECEM – NEMO-Rail

Prinzipiell kann mit RECEM jede beliebige Kombination aus Zugtyp und Bahnstrecke simuliert werden. Für die Berechnung von Energieverbrauch und Emissionen auf großen Schienennetzwerken bzw. des gesamten Bahnsektors wäre diese Vorgangsweise jedoch zu aufwändig. Daher wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz typische Zug- und Streckentypen definiert. Für diese wurden in RECEM Faktoren für Energieverbrauch und Emissionen simuliert. Diese Faktoren haben die Einheit [kWh/km] bzw. [g/km] im Personenverkehr bzw. [kWh/t-km] bzw. [g/t-km] im Güterverkehr.[29] Diese Faktoren sind der Ausgangspunkt für die Abbildung eines Schienennetzwerkes in NEMO-Rail. Dazu müssen in NEMO-Rail das Streckennetz aufgeschlüsselt nach Streckentypen spezifiziert und die Zugzahlen nach Zugtypen eingegeben werden. Nachfolgend sind die in NEMO-Rail verwendeten Zug- und Streckentypen näher erläutert.

[29] Sonderfall ist Rangierbetrieb: Hier werden die Faktoren in [kWh/h] bzw. [g/h] angegeben.

Tabelle 8 zeigt die Einteilung nach Zugtypen. Der Personenverkehr wird (inkl. Tram und U-Bahn) mit insgesamt zehn verschiedenen Kombinationen aus Zugtypen und Traktionsart abgebildet. Zusätzlich stehen ein Güterzug (Elektro- bzw. Dieseltraktion) und Faktoren für Rangierbetrieb zur Verfügung.

Tabelle 8: Zugtypen in NEMO-Rail

Zugbeschreibung		**Traktionsart** (E = elektrisch, D= Diesel)	**Kürzel**
Railjet (Hochgeschwindigkeit)		E	RJ
Intercity/Railjet		E	IC
Regionalzug		E / D	RE
Nahverkehr / S-Bahn	kurze Garnitur (2-teilig)	E / D	RB(k)
	lange Garnitur (4-teilig)	E / D	RB(l)
Tram		E	Tram
U-Bahn		E	U-Bahn
Güter		E / D	G
Rangieren	ohne Last (nur Lok)	D	R(oL)
	Unter Last	D	R(mL)

Tabelle 9 zeigt die Einteilung nach Streckentypen in NEMO-Rail. Für die Simulation jedes Streckentyps wurde entweder ein charakteristischer VzG-Verlauf aus den Streckendaten der ÖBB ausgesucht oder Fahrgeschwindigkeitsprofile durch Messungen ermittelt. Für den Streckentyp „Hochgeschwindigkeitsstrecke“ stand zum Zeitpunkt der Modellerstellung noch kein VzG-Verlauf zur Verfügung (dieser Streckentyp wurde in den Modellrechnungen für Wien auch nicht benötigt).

Tabelle 9: Streckentypen in NEMO-Rail

Streckentyp	**steht für**	**mit RECEM simuliert anhand von**	**Bemerkung**
Flachlandbahn	Westbahn St.Pölten-Wels, Wiener Nordbahn, Wiener Ostbahn, Südbahn Wien-Gloggnitz, Graz-Spielfeld	VzG St.Pölten - Ybbs	simuliert in beide Fahrtrichtungen; Faktoren in NEMO-Rail werden fahrtrichtungsgemittelt verwendet
Bergstrecke	Arlberg, Tauern, Brenner, Semmering, Pyhrn, Wechsel	VzG Bad Gastein - Kolbnitz	
Inneralpine Strecke	Rest der Hauptverkehrs-	VzG Mürzzuschlag -	

	strecken	Bruck/Mur	
Nebenstrecke		VzG Fehring - Graz	
Rangierstrecke		gemessener v-Verlauf Rangierbahnhof Graz	kein Höhenprofil berücksichtigt
Tramstrecke		gemessener v-Verlauf Linie 6 Graz	kein Höhenprofil berücksichtigt
U-Bahnstrecke		VzG U-Linie 6 Strecke Wien	simuliert mit konst. Stg. in beide Fahrtrichtungen, anschl. gemittelt
Hochgeschwindigkeits-strecke	Wien- St.Pölten, Innsbruck-Kufstein	---	dzt. kein VzG verfügbar

Für die Simulation der Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren waren für jede relevante Kombination aus Zug- und Streckentypen wichtige Rahmenbedingungen wie z.B. Zuggewichte, zugspezifische höchstzulässige Geschwindigkeiten sowie der Haltstellenabstand zu bestimmen. Letzterer ist eine besonders wichtige Einflussgröße aus Energieverbrauch und Emissionen des Schienenverkehrs. Tabelle 10 zeigt die gewählten Abstände zwischen den Stopps. Aus der Tabelle kann auch ersehen werden welche Zugtypen im Modell auf welchen Streckentypen fahren.

Tabelle 10: Haltestellenabstande nach Zug- und Streckentypen (Werte in Kilometer)

	Zugtyp							
Streckentyp	RJ	IC	RE	RB	G (elektr.)	G (Diesel)	Tram	U-Bahn
Flachlandbahn	---	46,6	7,5	3,5	140	---	---	---
Bergstrecke	---	60,2	7,5	---	180	---	---	---
Inneralpine Strecke	---	58,4	7,5	---	58	---	---	---
Nebenstrecke	---	---	7,5	3,5	58	58	---	---
Tram	---	---	---	---	---	---	ca. 0,38	---
U-Bahn	---	---	---	---	---	---	---	0,75
Hochgeschwindigkeits-strecke	ca. 150	---	---	---	---	---	---	---

Für Diesellokomotiven waren weiters die Charakteristiken für Kraftstoffverbrauch und Emissionsausstoß zu ermitteln. Dies erfolgte anhand von in (Knörr, 2003) veröffentlichten Daten sowie am Institut für Verbrennungskraftmaschinen verfügbaren Messungen an entsprechenden Forschungsmotoren. Insgesamt wurde das Modell für Motoren der Abgasgesetzgebungsklassen „Pre Stufe III“, IIIA, IIIB sowie eine Prognose für Stufe IV anhand den Rahmenbedingungen aus der Abgasgesetzgebung bedatet.

Weiters sind in NEMO-Rail Grundannahmen zur Flottenzusammensetzung nach Antriebstechnologien für die einzelnen Zugtypen, als Funktion des Berechnungsjahrs hinterlegt. Dies betrifft bei Dieselloks die Zusammensetzung der Flotte nach Emissionsstandards, sowie bei Elektrolokomotiven das Rekuperationsvermögen. Diese Daten wurden anhand von im Internet zugänglichen Zahlen zur Flotte der Bahnbetreiber in Österreich[30] sowie Daten zur Lebensdauer der Schienenfahrzeuge erstellt.

Um in NEMO-Rail Energieverbrauch und Emissionen auf einem Schienennetz zu berechnen sind neben dem Berechnungsjahr vom Benutzer lediglich folgende Informationen für die einzelnen Streckenabschnitte einzugeben:

- Streckenlänge
- Streckentyp (gemäß der Einteilung in Tabelle 9)
- Zugzahlen nach Zugtypen (gemäß der Einteilung in Tabelle 8) in Fahrten pro Tag bzw. für Rangierbetrieb in Stunden pro Tag

Optional können zum Einbinden ins GIS die Streckenkoordinaten angegeben werden. Das Programm ermittelt mit diesen Daten für jeden angegebenen Streckenabschnitt die sich ergebenden Emissionen je Zugkategorie. Dazu wird die Anzahl des jeweiligen Zug Typs mit dem zugehörigen Durchschnittsemissionsfaktor je Streckentyp und der Streckenlänge multipliziert.
Sollen konkrete Bahnstrecken im Detail abgebildet werden, kann natürlich jederzeit auf die Simulation mit RECEM zurückgegriffen werden. Dazu sind aber detaillierte Daten zur Strecke und zu den eingesetzten Zügen erforderlich.

3.3 NEMO-Ship

Für die Berechnung der Emissionen aus der Binnenschifffahrt wurde in NEMO ein eigenständiges Modell integriert („NEMO-Ship“). Dieses basiert auf dem im Rahmen des ARTEMIS-Projektes entwickelten Berechnungsansatzes (Georgakaki, 2004), welcher auf Grundlage von Schiffs- und streckenspezifischen Angaben die nötige Motorleistung und den Kraftstoffverbrauch bestimmt. Die Berechnung der Emissionen erfolgt in Abhängigkeit vom Kraftstoffverbrauch über Faktoren [g Emission/kg Diesel].
Basierend auf den im ARTEMIS-Modell enthaltenen Schiffstypen und Angaben zu Schiffdaten aus (Via Donau, 2012) wurden zur Abbildung der Donauschifffahrt in NEMO-Ship sieben Schiffstypen parametriert. Die wichtigsten im Modell hinterlegten Parameter sind in Tabelle 11 dargestellt.

[30] z.B. http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Lokomotiven_und_Triebwagen_der_%C3%96BB

Tabelle 11: Schiffstypen in NEMO-Ship für die Donauschifffahrt

Schiffstyp	Länge	Länge zwischen Loten	Breite	max. Tiefgang	max. Tragfähig-keit	Ist-Tiefgang / max. Tiefgang	Leistung
	[m]	[m]	[m]	[m]	[t]	[-]	[kW]
Gütermotor-schiff	95,0	94	11	2,7	1800	0,66	220
Tankmotor-schiff	106,0	105	11	2,4	1500	0,66	1030
Schubleichter 1x1	111,1	110	11	2,8	1850	0,66	1760
Schubleichter 2x1	187,6	185	11	2,8	3700	0,66	1760
Schubleichter 2x2	187,6	185	23	2,8	7400	0,66	1760
Schleppschiff	80,0	79	10	1,9	900	0,66	1000
Fahrgastschiff	48,4	48	9	1,3	203	0,5	810

Das Modell wurde mittels Vergleich der berechneten Kraftstoffverbräuche mit Information von Via Donau für die obere Donau kalibriert.

Folgende Eingabegrößen werden von NEMO-Ship benötigt um Kraftstoffverbrauch und Emissionen auf einem Flussabschnitt zur berechnen:

- Streckenlänge
- Fließgeschwindigkeit des Gewässers (Fahrt „zu Berg“: Werte <0, „zu Tal“: Werte >0)
- Wassertiefe
- Wasserbreite
- Schiffsverkehr [Schiffe pro Tag] nach Schiffskategorien
- Fahrgeschwindigkeit der Schiffe relativ zum Wasser nach Schiffskategorien

Optional können zum Einbinden in ein GIS die Streckenkoordinaten angegeben werden.

Für die Anwendung des Modells auf die Donauschifffahrt wurden weiters aus (Via Donau, 2012) die Schiffszahlen und beförderten Tonnagen je Flussabschnitt und Fahrtrichtung ermittelt.

4 Ökobilanzmodell GEMIS

Im Rahmen dieses Projekts werden neben den direkten Emissionen auch die Gesamtemissionen inklusive Fahrzeugherstellung und Energiebereitstellung ermittelt (Well to Wheel Analyse). Dies ermöglicht einen Emissionsvergleich zwischen unterschiedlichen Transportsystemen (Bahn/Straße/Schiff/Flugverkehr) bzw. Energiebereitstellungssystemen und Energieträgern (etwa Diesel, Biokraftstoffen, Wasserstoff, Strom etc.), welche zukünftig verstärkt im Verkehrssektor eingesetzt werden.

4.1 GEMIS

Für Daten verschiedener allgemeiner Prozesse wie Rohstoffvorketten, allgemeine Energiebereitstellung oder Transporte werden das Softwaretool **G**lobales-**E**missions-**M**odell-**I**ntegrierter-**S**ysteme (GEMIS) und Ergebnisse aus vorgehenden Arbeiten des Umweltbundesamtes zugrunde gelegt.

Das Ökoinstitut e. V. und die Gesamthochschule Kassel (GhK) hat die GEMIS Basisversion in den Jahren 1987–1989 entworfen und seitdem kontinuierlich zu der neuesten Version 4.8 weiterentwickelt. GEMIS berücksichtigt für Produkte, Prozesse und Szenarien alle wesentlichen Schritte von der Primärenergie- bzw. Rohstoffgewinnung bis zur Nutzenergie bzw. Stoffbereitstellung und bezieht auch den Hilfsenergie und Materialaufwand zur Herstellung von Energieanlagen und Transportsystemen mit ein. Die Umweltauswirkungen von erneuerbaren Energieträgern und fossilen Brenn- und Treibstoffen können nun noch detaillierter berechnet werden.
Das Umweltbundesamt erstellt seit dem Jahr 1997 Ökobilanzen mittels GEMIS, entwickelt österreich-spezifische Prozesse weiter, wartet und aktualisiert die GEMIS-Datenbasis mit Bezug auf Österreich regelmäßig.
Auf Basis österreichspezifischer Daten berücksichtigt GEMIS somit die wichtigsten Prozesse und bietet die Möglichkeit, neben den direkten Emissionen auch vorgelagerte Prozessemissionen in die Kalkulation aufzunehmen. Die Nutzung bestimmter Produkte bzw. Dienstleistungen (Wärme, Strom, Mobilität, Güter) verbraucht nicht nur direkt eingesetzte Energie, sondern auch jene, die für Herstellung, Anlieferung und Entsorgung benötigt wird. Daher ist oft nicht sofort erkennbar, welches Produkt letztendlich das umweltverträglichste ist.

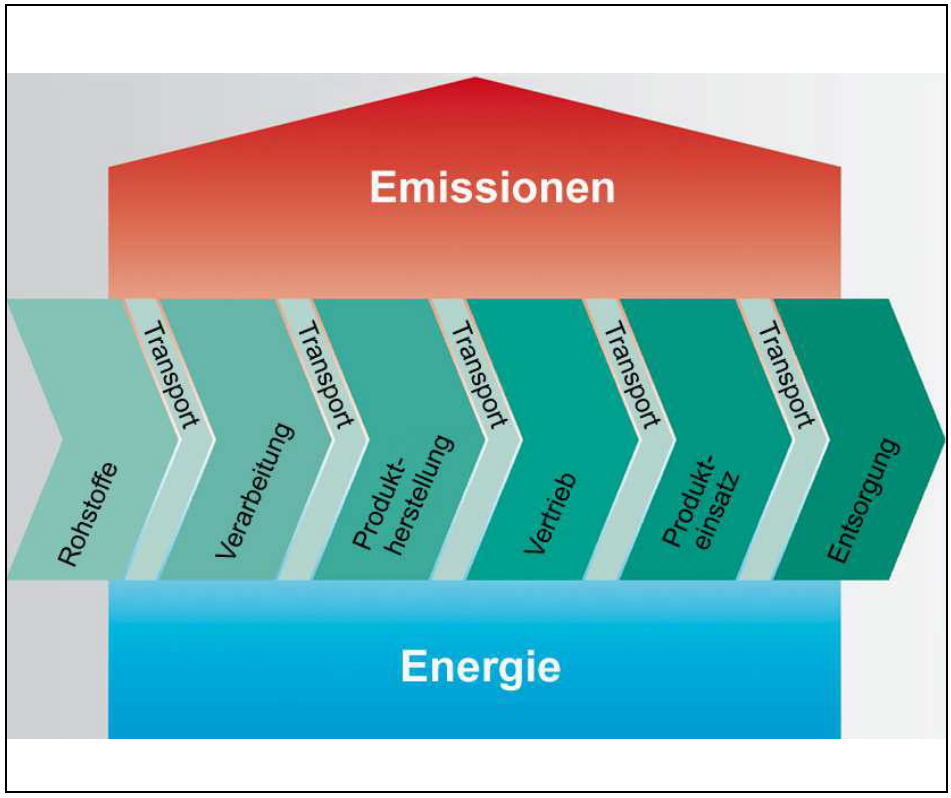


Abbildung 12: Schematische Darstellung einer Prozesskette nach GEMIS

4.2 Emissionsfaktoren

Die Ökobilanz mittels GEMIS-Österreich beinhaltet neben der Fahrzeugherstellung die Energieumwandlung für den Betrieb der Fahrzeuge – von Rohöl zu Diesel und Benzin oder z. B. die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom mittels Photovoltaik-Anlagen sowie die Bereitstellung anderer Energieformen. Die dafür erforderliche Infrastruktur ist ein wesentlicher Bestandteil der Analyse. Die Lebensdauer der notwendigen Infrastruktur fließt in die Ökobilanz ein und hat starke Auswirkungen auf die gesamten Prozessemissionen.

Die Emissionen aus dem Betrieb des Kraftfahrzeuges, also die direkten Emissionen, werden der Software HBEFA 3.1. entnommen. Das Handbuch der Emissionsfaktoren dient diesem Projekt als Ausgangsbasis bei der Festlegung der direkten Fahrzeugemissionen und Energieverbräuche. Detaillierte Beschreibungen der getroffenen Annahmen sind dem Anhang zu entnehmen. Die Bewertung von Technologien mittels Ökobilanzierung ist direkt von der vorhandenen Datenqualität, den getroffenen Annahmen und den Systemgrenzen abhängig.
In der folgenden Abbildung 13 wird die hier betrachtete Prozesskette für ein Kraftfahrzeug dargestellt.

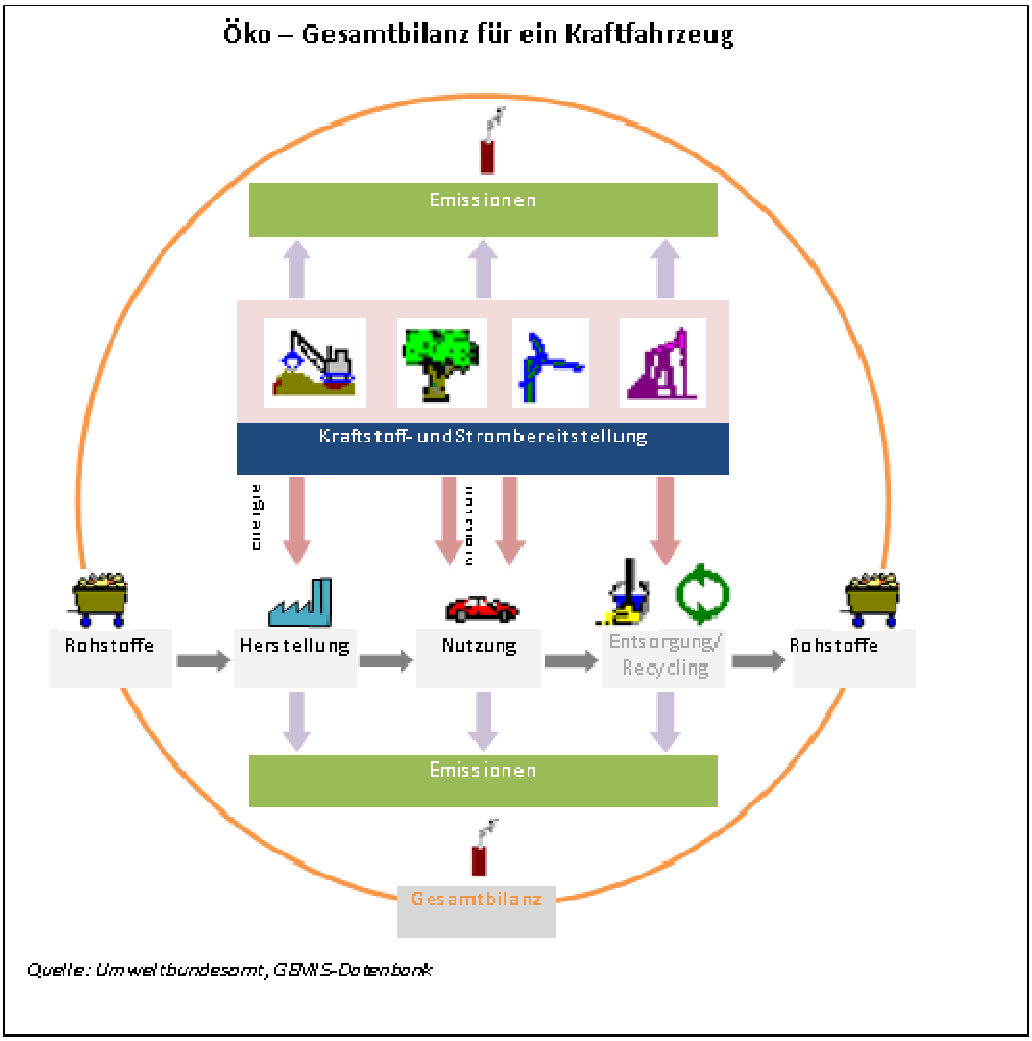


Abbildung 13: Betrachtete Prozesskette für ein Kraftfahrzeug

Für diese Bilanz wesentliche Ergebnisse des GEMIS-Modells sind der kumulierte Energieaufwand (KEA), die Menge an klimarelevanten Emissionen und die Luftschadstoff-Emissionen.

Zur Berechnung klimarelevanter Emissionen aggregiert GEMIS klimarelevante Luftschadstoffe zu CO_2-Äquivalenten. Dabei werden die Treibhausgase Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O), Hydrierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC, HFCKW), Perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF_6) berücksichtigt. Je nach betrachtetem Material und Produktionsverfahren sind nur die relevanten Treibhausgase in GEMIS abgebildet.

Innerhalb der Systemgrenze der Lebenszyklusbetrachtung befinden sich die wesentlichsten energie- und emissionsrelevanten Prozesse. Bezogen auf die betrachteten Fahrzeugkonzepte liegen Produktion und Nutzung innerhalb der Systemgrenzen. Die Lebensdauer der Fahrzeuge wie auch der Akkumulatoren in den Elektrofahrzeugen wird – übereinstimmend mit generellen automotiven Lebensdaueranforderungen – mit zehn Jahren festgesetzt. Die Materialaufwendungen für die Herstellung der Akkumulatoren werden in die Lebenszyklusanalyse aufgenommen.

Da speziell im Bereich alternative Antriebs- und Energieversorgungssysteme wenige Studien und somit kaum Daten und Informationen zu Entsorgungs- oder Recyclingverfahren (etwa von Akkumulatoren und Photovoltaik-Anlagen) im großindustriellen Maßstab vorliegen, befindet sich eine etwaige Verwertung bzw. Entsorgung der betrachteten Fahrzeuge, Akkumulatoren und Anlagen außerhalb der Systemgrenze dieser Studie. Für konventionelle Fahrzeuge ist die Datenlage zwar deutlich besser, aufgrund der Vergleichbarkeit ist es jedoch unerlässlich, die gleiche Systemgrenze für alle Technologien und Antriebsarten zu wählen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dies zu keiner wesentlichen Veränderung in den Gesamtergebnissen führt. Ebenso außerhalb der Betrachtungsgrenze liegt eine verlängerte Nutzung der Fahrzeuge, welche sich tendenziell positiv auf das Ergebnis auswirkt.

Die Gesamtemissionen der Energiebereitstellung ergeben sich aus direkten sowie vorgelagerten Emissionen, wobei die direkten CO_2-Emissionen der biogenen Kraftstoffe mit null bilanziert werden. In der nachfolgenden Tabelle finden sich die GEMIS-Datensätze zur Treibstoff- bzw. Energiebereitstellung pro Kilowattstunde, welche in der Lebenszyklusbetrachtung Verwendung finden.
Für die Zeitreihe bis 2030 konnten im Computermodell GEMIS konnten nicht für alle Kraftstoffe Emissionsfaktoren für die Treibstoffproduktion und Energiebereitstellung gefunden werden. Die angeführten Varianten stellen den derzeitigen Wissensstand dar.
Es ist ersichtlich, dass die unterschiedlichen Formen der Energiebereitstellung signifikant unterschiedliche vorgelagerte Emissionen produzieren.

4.2.1 Zusammenfassung EFA:

Die konventionellen Kraftstoffe Benzin und Diesel und auch Erdgas erzeugen in der Vorkette relativ geringe Emissionen. Voraussetzung dafür ist, dass das Rohöl bzw. -gas auf konventionellem Weg gewonnen wird.
Bei den unterschiedlichen Biokraftstoffen gibt es, abhängig von den Ausgangsrohstoffen, eine große Bandbreite an Emissionen, je nachdem wie energieintensiv die Aufbereitung auf Marktqualität ist.
Der österreichische Strommix ist trotz hohem Anteil an erneuerbaren Energien mit in diesem Vergleich hohen Emissionen behaftet. Ökostrom verursacht hingegen sehr geringe Emissionen. Im Jahr 2011 wird die Stromaufbringung in die Berechnungen aufgenommen. Somit sind die Emissionen der Stromproduktion in Österreich und die Stromimporte berücksichtigt. Für das Jahr 2020 ist im Computermodell GEMIS jedoch nur die Stromproduktion in Österreich abgebildet. Für das Jahr 2030 gibt es keine verfügbaren Daten.

Tabelle 12: Treibstoffproduktion und Energiebereitstellung - vorgelagerte Emissionen (Quelle: eigene Berechnungen).

Kraftstoff	vorgelagerte Emissionen			
	THG	E kum	PM	NO_x
	g/kWh	kWh/kWh	g/kWh	g/kWh
Benzin 2011	66	1,24	0,02	0,19
Benzin 2030	74	1,25	0,03	0,21
SuperEthanol (E85)	157	1,44	0,04	0,38
Diesel 2011	37	1,07	0,01	0,12
Diesel 2030	35	1,06	0,01	0,12
Raps-Methyl-Ester (RME)	102	1,76	0,02	0,17
Erdgas (CNG) 2011	70	1,23	0,01	0,16
Erdgas (CNG) 2030	65	1,20	0,01	0,15
AUT-Stromaufbringung 2011	322	1,83	0,03	0,48
AUT Strommix 2020	172	2,39	0,03	0,68
AUT Ökostrom 2011	23	1,04	0,01	0,49

Diesel verursacht im Vergleich zu anderen Kraftstoffen sowohl im Jahr 2011 als auch im Jahr 2030 niedrigere vorgelagerte Emissionen. Dies resultiert aus den vergleichsweise geringen Energieeinsätzen in der Förder- und Verarbeitungsindustrie und den effizienten Transportmöglichkeiten bei flüssigen Kraftstoffen mit hoher Energiedichte. In Österreich wird im Jahr 2011 in überwiegendem Ausmaß Dieselkraftstoff eingesetzt. Ein Umstieg auf andere Kraftstoffarten bedeutet somit, einen Anstieg der vorgelagerten Emissionen aus der Treibstoffproduktion. Diese Daten beziehen sich auf konventionelle Fördertechnologien, wie sie derzeit hauptsächlich Anwendung finden. Mit zunehmender Rohstoffverknappung werden speziell bei fossilen Kraftstoffen die Fördertechnologien zunehmend energie- und emissionsintensiver, etwa bei Ölsand- bzw. Ölschiefergewinnung. Dieser Aspekt findet derzeit noch kaum Berücksichtigung, da zu wenige Daten für die Bilanzierung vorliegen. Zukünftig ist dies verstärkt zu berücksichtigen.
Die niedrigsten Gesamtenergieeinsätze sowie Treibhausgasemissionen bei den vorgelagerten Prozessemissionen weist in Österreich Ökostrom auf.

Die Materialeinsätze legen ein mittleres österreichisches Fahrzeug zugrunde. Unterschiedliche Massen ergeben sich durch teilweise höhere Materialaufwände für alternative Antriebsstränge und Speichertechnologien.
Für die Dimensionierung der Fahrzeuge wurden aus der GEMIS-Datenbank die passenden Prozesse für die Herstellung der verschiedenen Komponenten ausgewählt. Jeweilige typspezifische Änderungen resultieren aus eigenen Recherchen

Tabelle 13: Fahrzeugherstellung pro Fahrzeugkilometer im Straßenverkehr- vorgelagerte Emissionen (Quelle: eigene Berechnungen).

Fahrzeugtyp	vorgelagerte Emissionen			
	THG	E kum	PM	NO_x
	g/km	kWh/km	g/km	g/km
PKW (Durchschnitt)	19	0,09	0,02	0,05
LNF (Durchschnitt)	25	0,10	0,04	0,05
LKW (Durchschnitt)	31	0,12	0,05	0,05
LSZ (Durchschnitt)	65	0,22	0,10	0,11
Moped/Motorrad	3	0,01	0,003	0,006
PKW Plugg-In-Hybrid	41	0,20	0,06	0,12
PKW Elektrofahrzeug	31	0,13	0,04	0,09
Elektromoped	4	0,02	0,003	0,009

Tabelle 14: Fahrzeugherstellung pro Personenkilometer im Schienenverkehr - vorgelagerte Emissionen (Quelle: eigene Berechnungen).

Fahrzeugtyp	vorgelagerte Emissionen			
	THG	E kum	PM	NO_x
	g/Pkm	kWh/Pkm	g/Pkm	g/Pkm
Schienenverkehr Personen	1,26	0,004	0,001	0,003

Tabelle 15: Fahrzeugherstellung pro Tonnenkilometer im Schiffsverkehr - vorgelagerte Emissionen (Quelle: eigene Berechnungen).

Fahrzeugtyp	vorgelagerte Emissionen			
	THG	E kum	PM	NO_x
	g/tkm	kWh/tkm	g/tkm	g/tkm
Güterschiff (Binnenverkehr)	0,63	0,002	0,0007	0,04

4.3 Schnittstelle zu Emissionsmodell

Die Datengrundlagen für die Emissionsbilanzierung, Ergebnisse aus dem Modell NEMO, wurden vom Projektpartner TU Graz zur Verfügung gestellt. Die direkten Emissionsmengen gegliedert nach Fahrzeugkategorien (z. B. PKW, LNF, etc.) und Abgasklassen (z. B. EURO 2, EURO 3) sind in ausreichender Genauigkeit geliefert worden. Die vorgelagerten Emissionen der Energiebereitstellung wurden auf Basis der Einsatzmengen der jeweiligen Kraftstoffe ermittelt. Die vorgelagerten Emissionen der Fahrzeugherstellung wurden auf Basis der gefahrenen Fahrzeugkilometer der jeweiligen Fahrzeugkategorien berechnet. Die Summe der vorgelagerten Emissionen der Fahrzeugherstellung und Energiebereitstellung sind in Relation zu den direkten Emissionen gesetzt worden.

Beim Schienen- und Schiffsverkehr sind die Tonnen- und Personenkilometer für die Fahrzeugherstellung herangezogen worden. Die Herstellung von Transportsystemen mit großen Transportkapazitäten (über 100 t) kann bilanztechnisch nur auf den Dienstleistungsfaktor (Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer) bezogen werden. Diese Vorgangsweise ist deshalb sinnvoll, da die Transportkapazität tendenziell immer hoch und somit nahe an der Vollauslastung sein wird.

Die vorgelagerten Emissionsmengen wurden ins Verhältnis zu den direkten Emissionen vom Modell NEMO gestellt. Die Bereitstellungsemissionen für Fahrzeuge und Energieträger betragen je nach System etwa zwischen 10 % und 25 % der Gesamtemissionen inklusive Energieeinsatz. Die Ausnahme ist natürlich bei Antriebssystem die keine direkten Emissionen verursachen (z. B. Elektromobilität).

5 Plannullfall (BAU) und Szenarien

5.1 Definition des Plannullfalls

Der Plannullfall setzt sich aus den Daten zwei unterschiedlicher Verkehrsmodelle zusammen, folgende Tabelle zeigt die Quelle je Verkehrsmittel.

Tabelle 16: Quelle der Modelldaten für den Plannullfall

Verkehrssystem	Verkehrsmittel	Quelle (Verkehrsmodell)
IV	Pkw	VM-Wien
	LW	VM-Wien
	Lkw	VM-Wien
	Reisebusse	VM-Wien und OLI[31]
	Motorisierte Zweiräder	VM-Wien und OLI
ÖV	Bahn	VM-STREET, VM-Wien[32]
	U-Bahn	VM-Wien
	Straßenbahn	VM-Wien
	Linienbus	VM-Wien

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wurde der tatsächliche Bahnfahrplan aus dem Jahr 2010 vollständig in das Verkehrsmodell STREET 2030 implementiert. Daraus werden alle relevanten Daten für die Energie- und Emissionsmodellierung des Verkehrssystems Bahn exportiert. Das Verkehrsmodell der Stadt Wien wird in Abhängigkeit der Datenverfügbarkeit und der vorhandenen Ressourcen für die Modellpflege aktuell gehalten. Das derzeit implementierte Verkehrsangebot bildet die nachfragemodellierungsrelevante Angebotsqualität im IV und ÖV aus dem Frühjahr 2013 ab[33]. Die Quellen der wichtigsten Strukturdaten und Potentiale für die Wegezwecke sind in Tabelle 17 zusammengestellt.

[31] Die Verkehrsleistung von Reisebussen sowie Zweirädern wurde pauschal über Verhältnisfaktoren zur PKW-Verkehrsleistung als Funktion der Straßenkategorie abgeschätzt. Die Werte wurden aus dem entsprechenden Verhältnis der Fahrleistungen aus der Österreichischen Luftschadstoffinventur (Schwingshackl, 2013) berechnet.
[32] Die Daten des Streckenabschnitts Wien Schedifkaplatz – Wien Oper der Wiener Lokalbahn wurde aus dem VM-Wien exportiert.
[33] Persönliches Gespräch mit Herrn Roman Riedel und Paul Holzapfel, Stadt Wien, MA-18, am 21. März 2013

Tabelle 17: Quellen der wichtigsten Strukturmerkmale

Strukturmerkmal	Quelle, Bemerkung	
	Wien	Umland
Einwohner nach Gruppen	Volkszählung 2008, Kfz-Statistik 2008	Volkszählung 2001
Arbeitsplatzpotentiale	Volkszählung 2001	Volkszählung 2001
Einkaufspotentiale	Arbeitsplätze, Volkszählung 2001	Arbeitsplätze, Volkszählung 2001
Freizeitpotentiale	eigene Erhebungen, laufende Aktualisierungen	Volkszählung 2001
Studienplätze Wien	Universität Wien, 2004	-
Schulplätze, unterschieden nach Schulstufen	Stadtschulrat Wien (2000/2001, 2010/2011)	Schulmatrix 2002/2003

Quelle: Holzapfel P. und Riedel R. 2013

Anhand der oben beschriebenen Verkehrsdaten wurde der Energieverbrauch und die Emissionen der Verkehrssektoren Straßenverkehr, Bahn und Schiff auf dem Wiener Stadtgebiet für das Basisjahr 2011 berechnet. Um das Potenzial des erstellten Emissionsmodells durch Maßnahmensimulationen demonstrieren zu können wurden für den Straßenverkehr weiters auch für die Prognosehorizonte 2015, 2020 sowie 2030 simuliert. Die Fahrleistungen auf dem Straßennetz wurden dabei aufgrund der Rahmenbedingungen aus der Verkehrsmodellierung gegenüber dem Basisjahr gänzlich unverändert übernommen. Die Berechnungsergebnisse für die Zukunft sollen einen Ausblick auf die Emissionsentwicklung in der Fahrzeugflotte in den zukünftigen Jahren geben und dienen weiters als Vergleichsbasis für die simulierten Maßnahmen.

In den Berechnungen zum Straßenverkehr im Basisfall wurde mit den Daten bzw. Prognosen zur österreichischen Flottenzusammensetzung aus der österreichischen Luftschadstoffinventur (Schwingshackl, 2012) bzw. aus dem Input zur Grundlagenstudie für den Monitoring Mechanism 2013[34] (Schwingshackl, 2013) gerechnet. Zusätzlich wurden die Besonderheiten der Wiener Linienbusflotte (Wiener Linien verwenden zurzeit LPG-Busse) berücksichtigt.

Insbesondere in dieser Arbeit von Relevanz sind die Annahmen zur Entwicklung der Elektromobilität. In der Entwicklung für den Planfall wurden in der vorliegenden Arbeit die Annahmen aus dem „WEM"-Szenario („With Existing Measures") der Grundlagenstudie für den Monitoring Mechanism 2013 übernommen. In diesem Szenario wird angenommen, dass allgemeine Maßnahmen zur Förderung der

[34] Als Grundlage für die Diskussion über die nationale Klimaschutzpolitik und zur Erfüllung der Berichtspflicht im Rahmen des „Monitoring Mechanisms" berechnete das Umweltbundesamt auf Basis energiewirtschaftlicher Grundlagendaten THG-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030 (Krutzler et al, 2013): Das Szenario WEM enthält nur bereits implementierte Maßnahmen, das Szenario WAM auch in Diskussion befindliche Maßnahmen, etwa aus der Energiestrategie oder den Verhandlungsgruppen zum Klimaschutzgesetz.

Elektromobilität (z.B. finanzielle Unterstützung bei Forschungsförderungsprojekten, Förderung von Elektromobilitäts-Modellregionen, Entwicklung eines Masterplans Elektromobilität etc.) existent sind.
Weiters wird von deutlichen Senkungen der Batteriekosten bzw. Nutzungsbeschränkungen für konventionelle Kfz z.B. in ausgewählten innerstädtischen Bereichen ausgegangen, auch in Wien. Im Basisszenario liegt der Fahrzeugbestand an PKW die mit Netzstrom fahren (PHEV und EV Konzepte) im Jahr 2020 bei rund 60.000 Fahrzeugen. Dies entspricht 1 % der österreichischen Gesamtflotte bzw. einem Anteil von 8% an den Pkw-Neuzulassungen. Nachdem mit NEMO im Gegensatz zum in der Grundlagenstudie für den Monitoring Mechanism 2013 eingesetzten Modell GLOBEMI alternative Antriebskonzepte für alle Fahrzeugkategorien abbildbar sind, waren in den Berechnungen zusätzliche Annahmen zur Zukunftsentwicklung für mit Netzstrom fahrenden Elektrofahrzeugen zu unterstellen. Folgende Entwicklungen wurden angenommen:

Leichte Nutzfahrzeuge:
Die Anteile an PHEV und EV an den Neuzulassungen betragen 20% der Werte bei PKW.
Schwere Nutzfahrzeuge:
Es werden keine PHEV und EV Fahrzeuge eingesetzt. Zur Anwendung kommen HEV-Antriebe in verschiedenen Anwendungen.
Zweiräder:
Bei Mopeds nehmen die Neuzulassungsanteile der Elektrofahrzeuge ausgehend vom aktuellen Wert von gut 5% linear zu bis zu 40% ab Mitte des nächsten Jahrzehnts. Bei Motorrädern erreicht der Elektroantrieb einen Anteil von max. 10%.

Energieverbrauch und Emissionen der Bahn wurden für den Planfall gemäß dem in Abschnitt 3.2 NEMO-Rail beschriebenem Modell NEMO-Rail gerechnet. Für die Verteilung der eingesetzten Dieselloks nach Emissionsstandards wurde die für das Österreichmodell erarbeitete Bedatung für das Jahr 2011 verwendet. Der Sektor Bahn wurden nur für den Plannullfall im Basisjahr gerechnet.[35]

Für die Berechnung der Emissionen der Binnenschifffahrt wurden Daten zur Donauschifffahrt aus (Via Donau, 2012) aufbereitet. Dabei erfolgte eine Bestimmung der Schiffszahlen nach Schiffstyp und Fahrtrichtung sowie der durchschnittlichen Beladungen. Die Berechnungen für die Binnenschifffahrt erfolgten ebenfalls nur für das Basisjahr aufgrund der unsicheren Datenlage zum Emissionsverhalten der eingesetzten Dieselmotoren und der zu erwartenden sehr langsamen Flottenerneuerung.

[35] Bei der Bahn entfallenen rund 98% der in Wien gefahrenen Kilometer auf Elektrotraktion. Somit ergeben sich unter der Rahmenbedingung konstanter Zugzahlen keine relevanten Änderungen bei Energieverbrauch und Emissionen für die Prognosehorizonte.

5.2 Szenario Forcierung der Elektromobilität

5.2.1 Direkte Emissionen:

Im Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ wurde angenommen, dass die Nachfrageseite nach Elektrofahrzeugen besonders stark ausgeprägt ist. Dieses Szenario orientiert sich an dem politischen Zielwert für rein elektrische PKW und Plug-in Hybrid-PKW im Jahr 2020 in der Höhe von 250.000 Kfz gemäß Energiestrategie Österreich [BMWFJ & BMLFUW (2010)]. Das Modell wurde dabei gemäß dem „WAM“-Szenario (With Additional Measures) aus der MonMech-Studie bedatet.
In den Berechnungen ergibt sich für das Jahr 2020 bei PKW ein Bestand an PHEVs von ca. 155.000 Fahrzeugen sowie von rund 52.000 reinen Elektro-PKWs. Dies entspricht in Summe ca. 4% der österreichischen Gesamtflotte. Bis zum Jahr 2030 steigt der Bestand auf rund eine Million PHEVs sowie zusätzlich knapp 600.000 reine Elektrofahrzeuge an, was in Summe einem Anteil an der österreichischen PKW Gesamtflotte von ca. 27% entspricht.
Es ist darauf hinzuweisen, dass die hier im Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ unterstellten Anteile an Elektrofahrzeugen nur dann realistisch sind, wenn die Preise für Batterien deutlich sinken und deutliche ökonomische, rechtliche und bewusstseinsbildende Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität umgesetzt werden. Die Bestandszahlen für E-PKW erfordern entsprechend noch drastischere Änderungen in Preis- und/oder Nutzungsstrukturen und sollten nicht als einfach realisierbar interpretiert werden. Die Ergebnisse können aber gut als Maximalszenario für die Einführung elektrische Antriebe im Straßenverkehr interpretiert werden. Zusätzlich zu den für PKW übernommenen Randbedingungen aus dem WAM Szenario der Monmech-Studie wurden in NEMO für das Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ noch folgende Randbedingungen vorgegeben:

Leichte Nutzfahrzeuge:
Die Anteile an PHEV und EV an den Neuzulassungen betragen 40% (statt 20% im Basisszenario) der Werte bei PKW.
Schwere Nutzfahrzeuge:
Es werden verstärkt HEVs eingesetzt. Relevante Anteile an mit Netzstrom fahrende SNF in der Flotte kommen auch im Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ nicht vor.
Zweiräder:
Bei Mopeds erreichen die Neuzulassungsanteile der Elektrofahrzeuge 40% im Jahr 2020 und steigen auf 80% im Jahr 2030. ab Mitte des nächsten Jahrzehnts. Bei Motorrädern erreicht der Elektroantrieb einen Anteil von 20%.

5.2.2 Vorgelagerte Emissionen

Die vorgelagerten Emissionen im Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ unterscheiden 2 Varianten der Energiebereitstellung von Strom in Österreich. Eine Variante berücksichtigt die Stromproduktion in Österreich (im Jahr 2011 Stromproduktion inkl. Importe, im Jahr 2030 Stromproduktion in Österreich),

die andere Variante weist die Bereitstellungsemissionen von Ökostrom aus. Da keine direkten Emissionen durch die Elektrofahrzeuge verursacht werden, sind die gesamten vorgelagerten Emissionen aus der Energie- und Fahrzeugherstellung entscheidend, ob eine Einsparung der gesamten (direkte und vorgelagerte) Emissionen durch die Elektromobilität zu erwarten ist.

Die Strombereitstellungsemissionen sind auf Grund der hohen Wasserkraftanteile in Österreich als niedrig zu bewerten. Durch ausschließlichen Einsatz von Ökostrom wird der Vorteil der emissionsarmen Energieproduktion im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen noch deutlicher. Bei den Treibhausgasemissionen ist dennoch ein Reduktionspotential der wasserkraftgetriebenen österreichischen Stromproduktion durch Ökostrom vorhanden.

Die Elektrofahrzeugherstellung ist im Vergleich zu konventionellen Antrieben mit höheren Bereitstellungsemissionen verbunden. Trotzdem sind die gesamten Emissionen der Elektromobilität deutlich niedriger als bei Antriebssystemen mit fossilen Energieträgern. Die Emissionseinsparungen sind über alle Technologieoptionen am höchsten wenn bei reinen Elektrofahrzeugen Ökostrom eingesetzt wird.
Die Strombereitstellung mit dem österreichischen Strommix führt zu einer Erhöhung des kumulierten Energieeinsatzes. Auf Grund der Stromleitungsverluste und der Umwandlungsverluste der Wärmekraftwerke führt Elektromobilität in der Energiebereitstellung. Durch regionale und erneuerbare Stromerzeugung werden die vorgelagerten Energieeinsätze deutlich reduziert und liegen unter jenen für fossile Kraftstoffe.

5.3 Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen

Auf der Luftgüteseite ist derzeit neben dem Feinstaub die Konzentration an Stickoxiden und insbesondere an NO2 kritisch. Hauptemittenten dieses Schadstoffs sind die Dieselfahrzeuge aus dem Straßenverkehr während moderne ottomotorisch betriebene Fahrzeuge durch Drei-Wege-Kat Technologie ein sehr niedriges Emissionsniveau aufweisen.In der Prognose für Entwicklung der NOx-Emissionen für die nächsten 5 Jahre ist keine signifikante Entspannung der Situation zur zu erwarten da die realen NOx Emissionen der aktuellsten dieselbetriebenen PKW und LNF nicht in dem Maß abnehmen wie anhand der Grenzwerte in der Typprüfung vorgegeben (siehe auch Abschnitt 3.1.1).
Eine konkrete Maßnahme zur Senkung der lokalen NOx-Emissionen des Straßenverkehrs ist Dieselfahrzeuge durch ottomotorisch betriebene Fahrzeuge zur ersetzen. Einen besonders hohen Anteil hat der Dieselantrieb bei LNF (Neuzulassungsanteile über 90%). Aus Sicht der Fahrzeugbetreiber bestehen die Nachteile von Fahrzeugen mit Ottomotor vor allem aus höheren Kraftstoffkosten (bei Benzinbetrieb) bzw. aus höheren Anschaffungskosten sowie der geringeren Reichweite bei gleichzeitig schlechterer Tankstelleninfrastruktur (bei Erdgasbetrieb). Bezüglich Kraftstoffkosten haben Erdgasfahrzeuge sowohl gegenüber Benzin- aber auch gegenüber Dieselfahrzeugen erhebliche Vorteile (Erdgas ist in Österreich mit der Energieabgabe belastet, jedoch von der Mineralölsteuer befreit).
Durch die Maßnahme wird der Einsatz von Erdgasfahrzeugen bei Leichten Nutzfahrzeugen forciert. Dies geschieht einerseits durch die Festschreibung der steuerlichen Vorteile von Erdgas als Kraftstoff analog zum Nachbarland Deutschland sowie durch Gewährung einer Förderung (z.B. €2000.-) bei Neukauf eines Leichten Nutzfahrzeuges mit Erdgasantrieb. Mit der hier diskutierten Förderung von €2000.- sowie der in Österreich von den Erdgasversorgungsunternehmen in Form von Betankungsgutscheinen gewährten Prämie von €1000.- wird der Preisnachteil der Erdgasfahrzeuge bei der Anschaffung weitgehend kompensiert. Bei den Betriebskosten ergibt sich aufgrund der niedrigeren Kraftstoffkosten ohnehin ein Kostenvorteil für Erdgas. Bei der Maßnahmenberechnung wird von einer Einführung zu Beginn des Jahres 2014 bei einem Neuzulassungsanteil an Erdgasfahrzeugen von 50% an den LNF ausgegangen.

Berechnet wurden die Auswirkung der Maßnahme auf die Jahre 2015 sowie 2020.

6 Ergebnisdarstellung im GIS

6.1 ArcGIS

Geoinformationssysteme (GIS) sind Software-Applikationen zur Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation räumlicher Daten. Geoinformationssysteme umfassen die dazu benötigte Hardware, Software, Daten und Anwendungen.

ArcGIS ist der Oberbegriff für verschiedene GIS-Softwareprodukte des Unternehmens ESRI für Windows-basierte Computer.

Im gegenständlichen Projekt wurde ArcGIS Desktop 10.2 sowohl für räumliche Analysen als auch zur räumlichen Darstellung der Modellergebnisse herangezogen.

6.2 Schnittstelle zu Emissionsmodell und Methodik

4 verschiedene räumliche Netzwerke (räumliche Datensätze) aus dem Wiener Verkehrsmodell der MA 18 liegen STREET 2030 zu Grunde:

- Straßennetz
- Eisenbahnnetz
- U- Bahn-Netz
- Straßenbahnnetz

Als Netzwerke werden Systeme bezeichnet, deren zugrundeliegende Struktur sich mathematisch als Graph modellieren lässt und die über Mechanismen zu ihrer Organisation verfügen. Der Graph besteht aus einer Menge von Elementen (Knoten bzw. Punkte), die mittels Verbindungen (Kanten bzw. Linien) miteinander verbunden sind. Dies bedeutet im konkreten Fall, dass die einzelnen Strecken räumlich zusammenhängen (sich berühren). Ein GIS ist in der Lage Länge und Widerstand der Kanten eines Netzwerkes zu analysieren und verschiedene Fragestellungen zu bearbeiten.
Die 4 Netze, genauer deren einzelne Kanten, wurden mit entsprechenden eindeutigen IDs (basierend auf Start und Endpunkt der Linien) versehen.
Die so entstandenen Tabellen wurden im ersten Schritt mit verkehrsrelevanten Daten aus dem Wiener Verkehrsmodell von Komobile befüllt. Im zweiten Schritt dann in das Modell NEMO der TU Graz eingelesen, um streckengenaue Emissionen zu berechnen.

Die Ergebnisse aus NEMO, in Textfiles übermittelt, wurden in eine Datenbank integriert, entsprechend aufbereitet, in ArcGIS Desktop basierend auf dem ursprünglichen Netzwerkgraphen visualisiert.

7 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass der verfolgte Ansatz – die Modellkette Verkehrsmodell-Emissionsmodelle-GIS-Analyse/-Visualisierung – für die Berechnung des Energieeinsatzes und der Emissionen des Verkehrssektors sowie die Bewertung von Maßnahmen funktioniert und sinnvolle Analyseergebnisse liefert. Die dafür notwendigen Strukturen wurden entwickelt und die Modellkette wurde exemplarisch anhand der Daten des Verkehrsmodells der Stadt Wien-MA18 erprobt.

Es hat sich herausgestellt, dass die Anpassung des Netzmodells und die Erstellung des Masternetzes nicht, wie ursprünglich im Antrag dargelegt, erfolgen konnten. Für die Verfeinerung des Netzmodells wurden während des Projekts verschiedene Ansätze verfolgt und - gut begründet - die Verwendung unterschiedlicher Datengrundlagen (kommerzielle Graphen, GIP Österreich, GIP Ostregion) angestrebt. Die Entscheidungen, auf Basis welches Netzgraphen und auf welchem Planungsraum gearbeitet werden sollte, musste mehrfach an die gewonnen Erkenntnisse, den tatsächlich zur Verfügung gestellten Daten bzw. entsprechend der Zeitachse angepasst werden.

Schlussendlich konnte das Verkehrsmodell Österreich nicht für STREET 2030 angepasst werden und die Modellstruktur von STREET wurde anhand von Daten aus dem Verkehrsmodell der Stadt Wien-MA18 demonstriert.

Demgegenüber konnte das Energie- und Emissionsmodell wie geplant entwickelt werden.

Um die im Antrag dargelegte Modellkette – Verkehrsmodell-Emissionsmodelle-GIS-Analyse/-Visualisierung – dennoch zeigen zu können, wurde als Verkehrsinput auf das Verkehrsmodell der Stadt Wien – MA18 zurückgegriffen.

7.1 Die Modellkette im Detail

7.1.1 Input Verkehrsmodell

- Verkehrsangebot (IV und ÖV),
- Raumstrukturdaten je Verkehrszelle (Bevölkerung, Quell- und Ziel- Attraktivität für alle betrachteten Wegzwecke),
- Mobilitätsdaten je mobilitätsverhaltenshomogener Personengruppe (Aktivitäten, Verkehrsmittel- und Zielwahlpräferenzen, Ganglinien, etc.),
- Mobilitätskosten (fahrleistungsabhängige Kosten, Parkgebühren, ÖV-Tarife),
- Längsneigungen (Die Längsneigungen gehen in die Verkehrsmodellierung nicht ein. Es ist aber sinnvoll sie in den Verkehrsmodellgraphen einzupflegen, damit die korrekte Zuordnung bei Änderungen am Netzmodell erhalten bleibt.)

7.1.2 Output Verkehrsmodell

Generell:

- Belastetes Wegenetz im IV und ÖV,
- Quell-Ziel-Beziehungen (Matrizen, diese können in Form von Spinnen (Wunschlinien) visualisiert werden) je Verkehrsmittel, Personengruppe und Wegezweck, verschiedenste Auswertungs- und Interpretationsmöglichkeiten.

Die zu übergebenden Daten für die Berechnung der Straßenverkehrsemissionen je Strecke sind:

- Kanten-ID
- Strecken-ID
- VonKnoten-ID
- NachKnoten-ID
- Streckenpolygon
- Streckentyp
- Streckenlänge [km]
- Streckenlängsneigung [%]
- Streckenfahrleistung gesamt pro Jahr[Kfz/a]
- Streckenfahrleistungsanteile je Kfz-Kategorie (Pkw, Lieferwagen, Lkw, Linienbus) [%]
- Mittlere Geschwindigkeit je Kfz-Kategorie (Pkw, Lieferwagen, Lkw, Linienbus) [km/h]

Für die Schiene (Eisenbahn, Tram und U-Bahn) wurden folgende Attribute festgelegt:

- Kanten-ID
- Strecken-ID
- VonKnoten-ID
- NachKnoten-ID
- Streckenpolygon
- Streckentyp
- Streckenlänge [km]
- Streckencharakteristik (BS, IAS, FLS, NS, HGS, TR, UB) [-]
- Anzahl Fahrten je Zugtyp (IC, RE, SB, Tram, U-Bahn) verschnitten mit Antriebsart (EL, D) [Fahrplanfahrten/a]

Weitere Details siehe Kapitel 2.5 und 2.6.

7.1.3 Input Emissionsmodell

= Output Verkehrsmodell + zusätzlich Anzahl geparkter Fahrzeuge auf den Streckenabschnitten.

Daten zur Fahrzeugflotte

- für alle Fahrzeugkategorien

- Entwicklung Gesamtbestand, Neuzulassungsanteile nach Fahrzeugschichten (EURO-Klasse, Technologie), Ausfallwahrscheinlichkeiten etc.
- Fahrzeugdaten (Massen, Fahrwiderstände, Motorisierung, Nebenverbraucher etc.)
- Daten zum Emissionsverhalten

- Split verfahrene Kraftstoffe in der Flotte nach Fahrzeugkategorie

7.1.4 Output Emissionsmodell

Nemo liefert für jedes Szenario und jedes berechnete Jahr 2 Ergebnisfiles (nem und sum).
Das „*.nem"-File listet jeden Streckenabschnitt einzeln auf mit der Einheit für Emissionen in Kilogramm pro Kilometer und Stunde [kg/km*h] bzw. für Energie in Kilowattstunden pro Kilometer und Stunde [kWh/km*h].
Das „*.sum"-File liefert Gesamtemissionen aufsummiert über das ganze Netz mit der Einheit für Emissionen in Tonnen pro Jahr [t/a] bzw. für Energie in Gigawattstunden pro Jahr [GWh/a].

Das *.Nem File setzt sich wie folgt zusammen

- Streckenbeschreibende Daten
- Gesamtemissionen auf dem Streckenstück (CO2, NOx, PM10_Exhaust, PM10_NonExhaust, FC, FC_el, HC, CO, NO2, SO2, N2O, NH3, CH4, NMHC, Benzol, HC_evap_Park)
- Verkehrsaufkommen je Fahrzeugkategorie (Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke DTV in Fahrzeuge pro Tag)
- Gefahrene Geschwindigkeit und Status der Berechnung je Fahrzeugkategorie
- Genaue Aufschlüsselung der Gesamtemissionen auf die einzelnen Fahrzeugkategorien auf dem Streckenstück

Das *.Sum File setzt sich wie folgt zusammen

- Gesamtemissionen auf dem berechneten Verkehrsnetz je Fahrzeugkategorie
- Detailergebnisse für jede Fahrzeugkategorie unterteilt nach Antriebssystem, Größenklasse und genutztem Kraftstoff
- Des Weiteren unterteilen sich die Detailemissionen dann noch nach den zusätzlich ausgerüsteten Abgasnachbehandlungssystemen

7.1.5 Input GEMIS

Für die Berechnung der vorgelagerten Emissionen werden die *.Sum Files aus NEMO herangezogen. Direkte Emissionsmengen gegliedert nach:

- Fahrzeugkategorien (z. B. PKW, LNF, etc.) und
- Abgasklassen (z. B. EURO 2, EURO 3).

Die vorgelagerten Emissionen der Energiebereitstellung wurden auf Basis der Einsatzmengen der jeweiligen Kraftstoffe ermittelt.
Die vorgelagerten Emissionen der Fahrzeugherstellung wurden auf Basis der gefahrenen Fahrzeugkilometer der jeweiligen Fahrzeugkategorien berechnet.

Beim Schienen- und Schiffsverkehr sind die Tonnen- und Personenkilometer für die Fahrzeugherstellung herangezogen worden.

7.1.6 Input GIS

Die streckenbeschreibenden Daten aus dem Verkehrsmodellgraphen (dem Netz) als Shape File werden kombiniert mit den streckenbeschreibende Daten aus dem Emissionsmodell die mit Emissionen und Verkehrsaufkommen auf dem Streckenstück verknüpft sind.

7.2 Zugrundeliegendes Straßennetzwerk

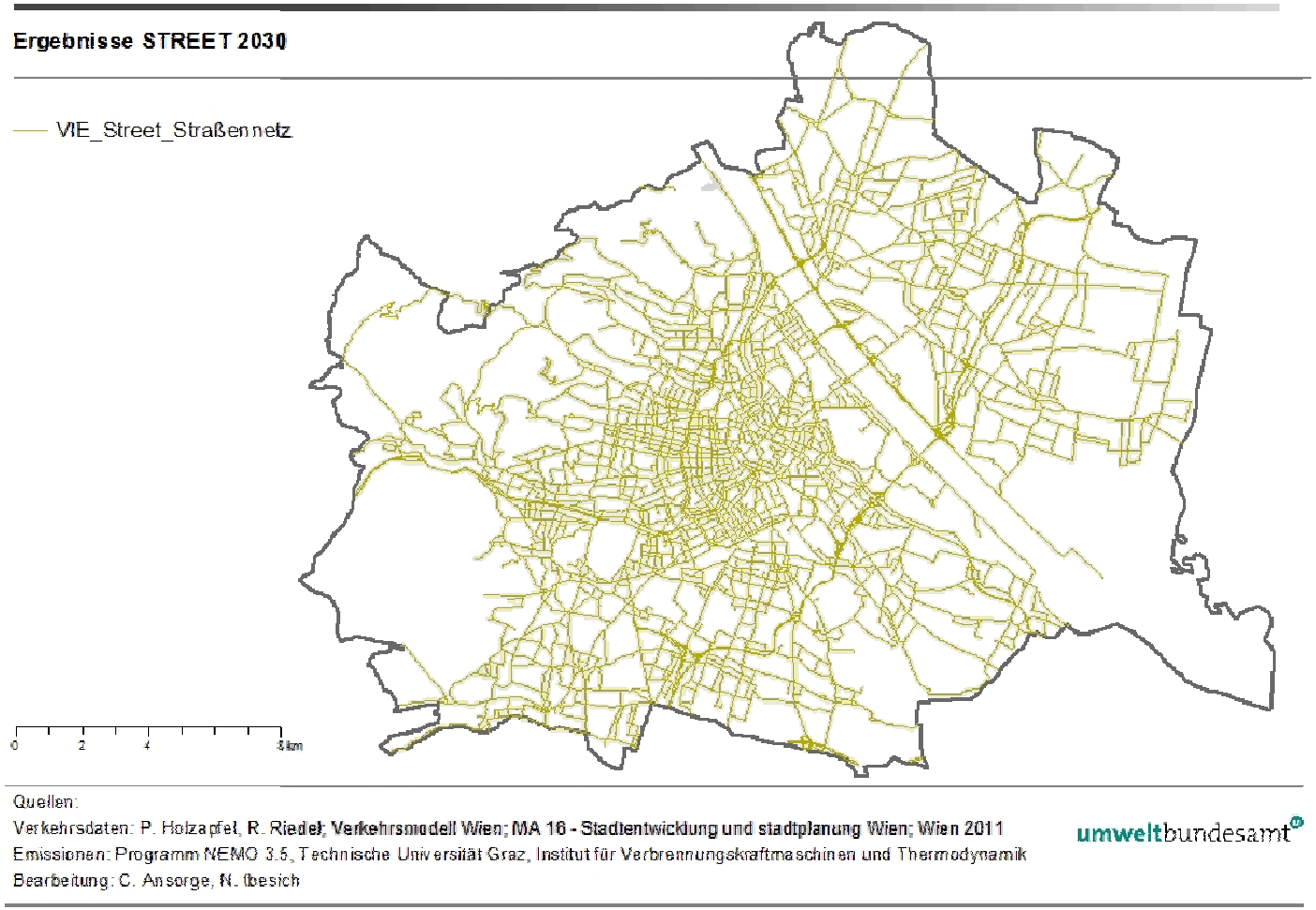


Abbildung 14: Straßennetz Wien

7.3 Verkehrsmengen

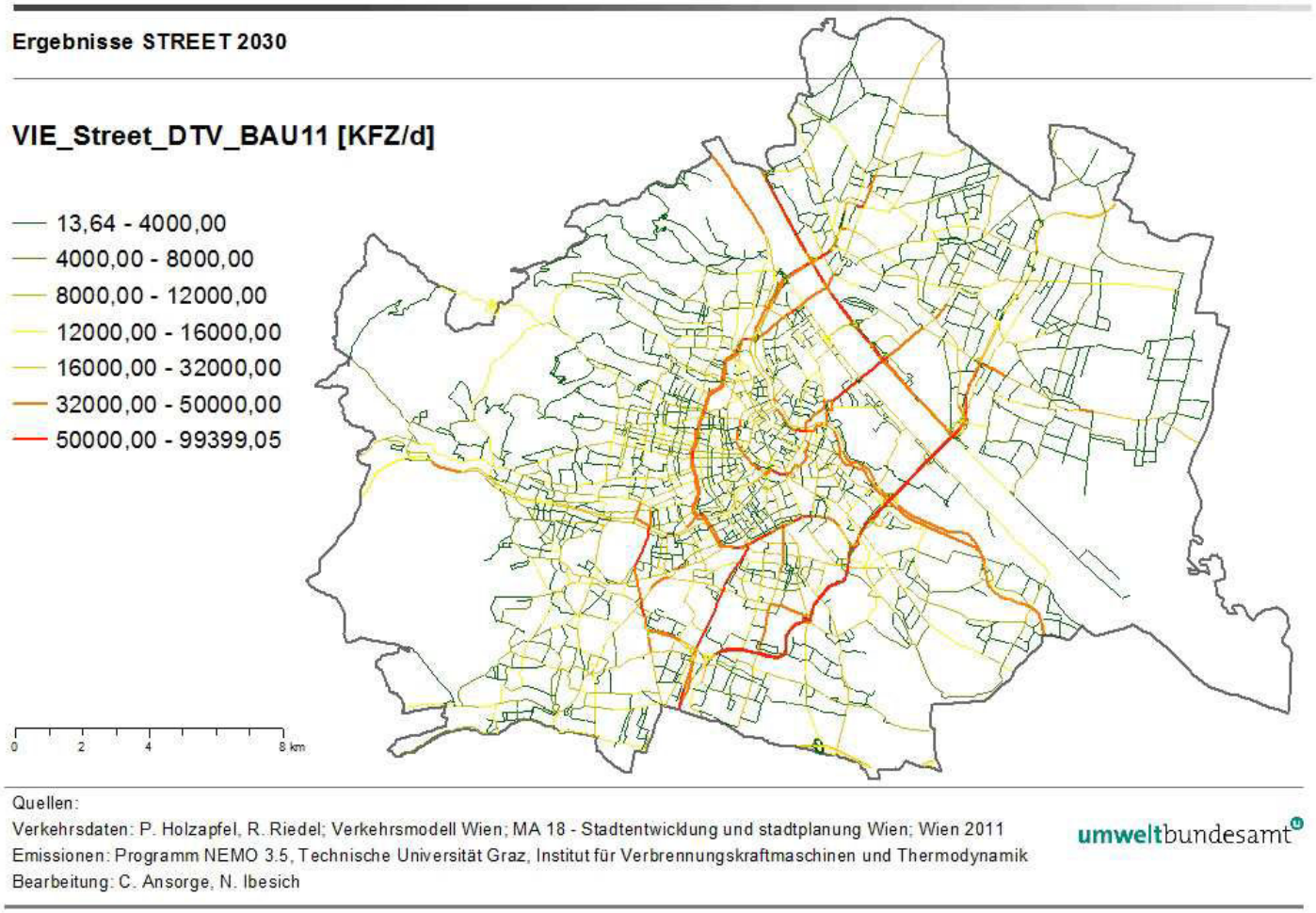


Abbildung 15: Durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV) in Kfz/d im Jahr 2011 in Wien

7.4 Energie

Bei denjenigen Verkehrsmitteln, die hauptsächlich elektrisch angetrieben werden, wie Straßenbahn, U-Bahn und Bahn, ist vor allem der Primärenergieverbrauch interessant, da hier größtenteils nur vorgelagerte Emissionen entstehen. Die Ausnahme sind direkte Emissionen, die durch Abrieb bzw. Aufwirbelung. verursacht werden. Diese sogenannten „non-exhaust"-Emissionen sind aber momentan noch nicht seriös abzuschätzen.

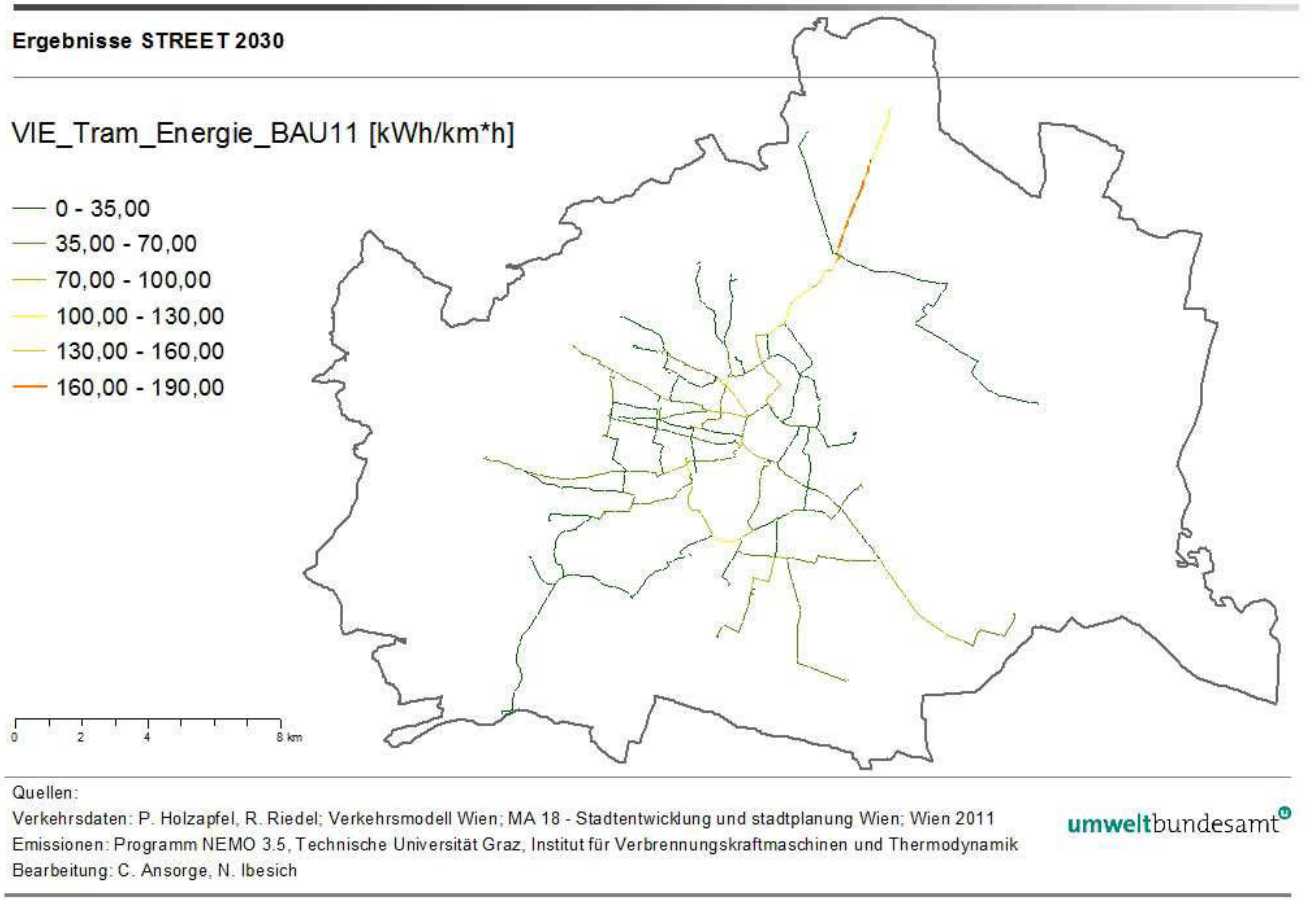


Abbildung 16: Energieverbrauch in kWh/k*h der Straßenbahnen in Wien im Jahr 2011

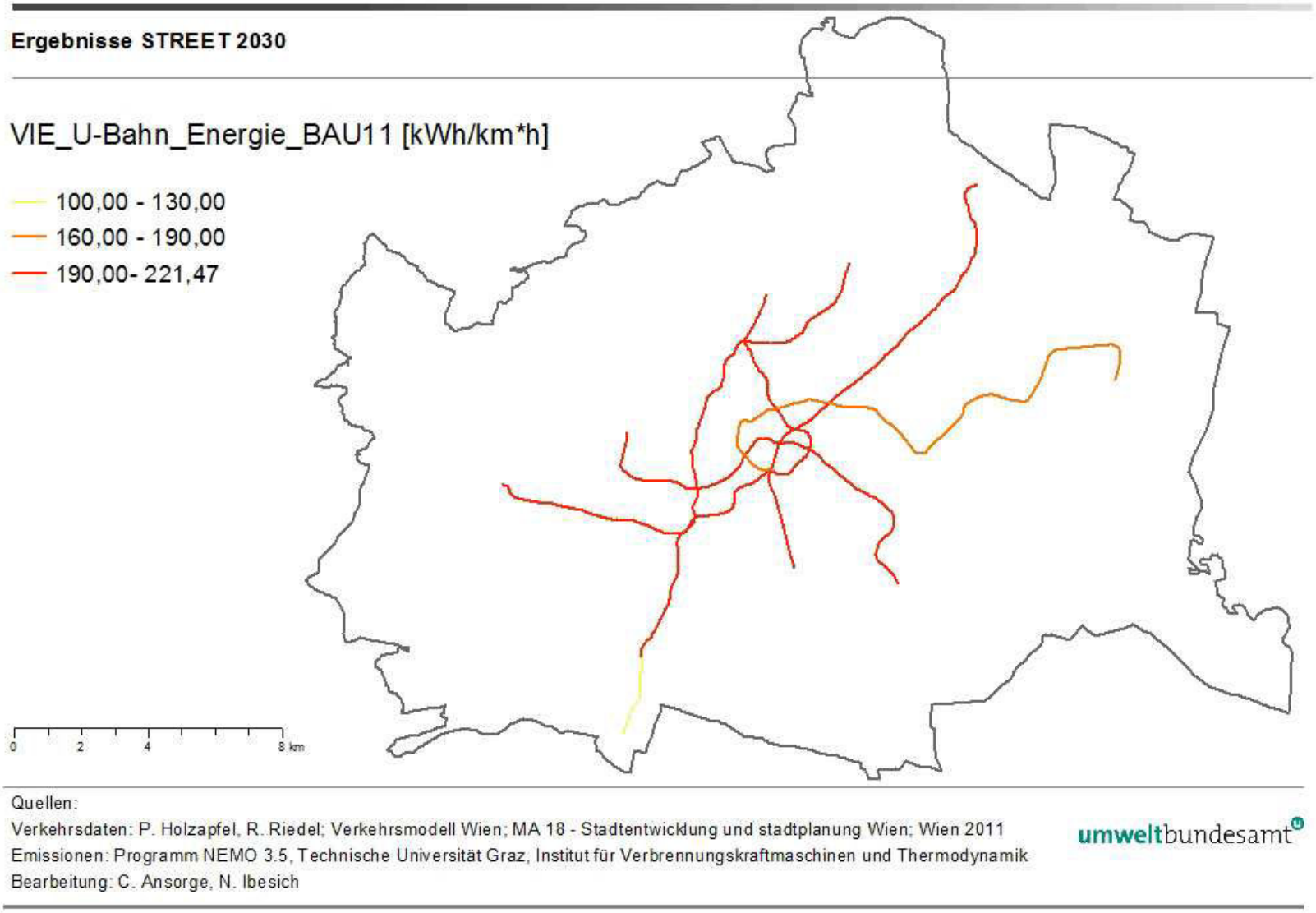


Abbildung 17: Energieverbrauch in kWh/k*h der U-Bahnen in Wien im Jahr 2011

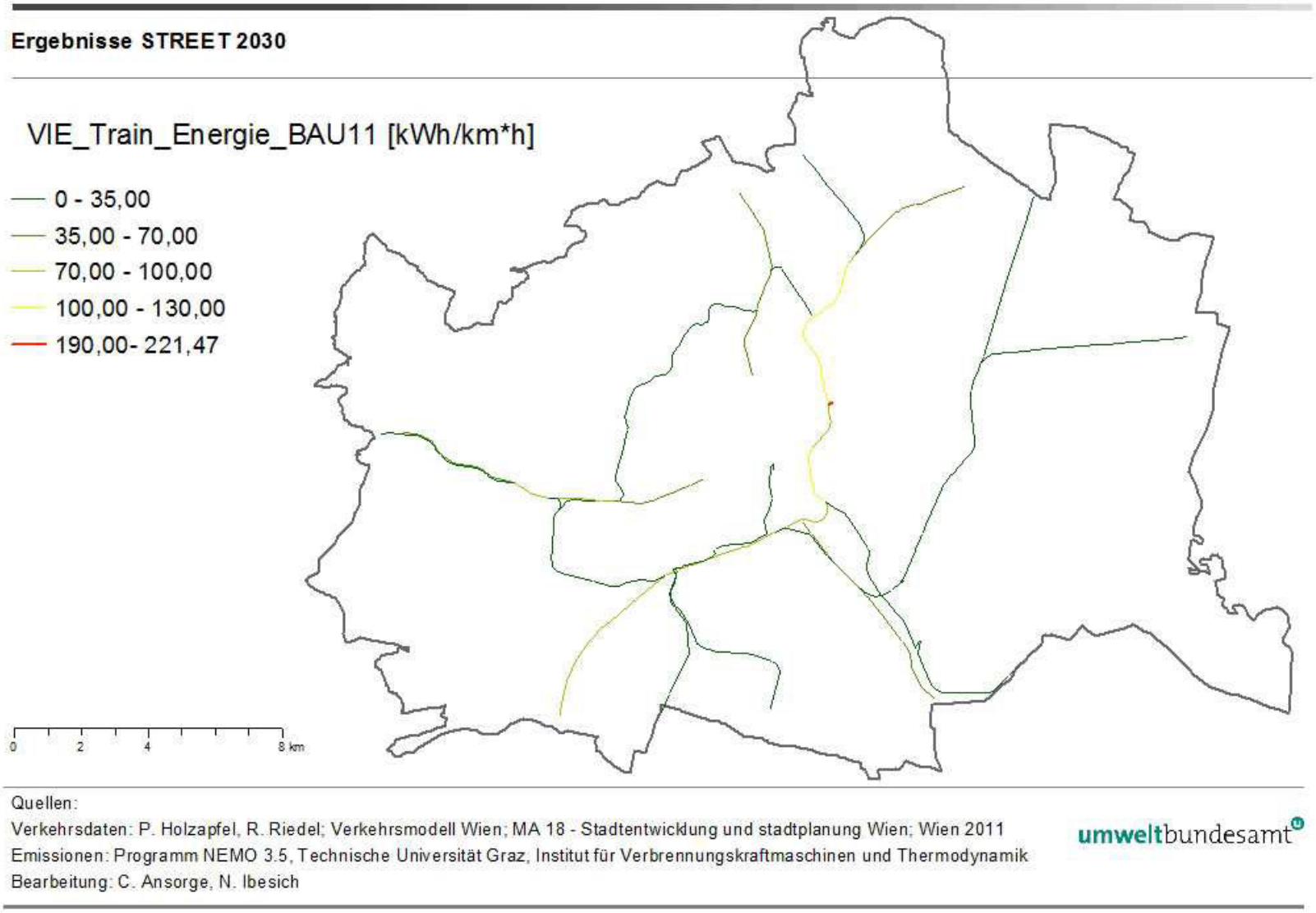


Abbildung 18: Energieverbrauch in kWh/k*h Züge in Wien im Jahr 2011

7.5 Direkte Emissionen

7.5.1 Ergebnisse für alle Straßen - Fahrzeugkategorien

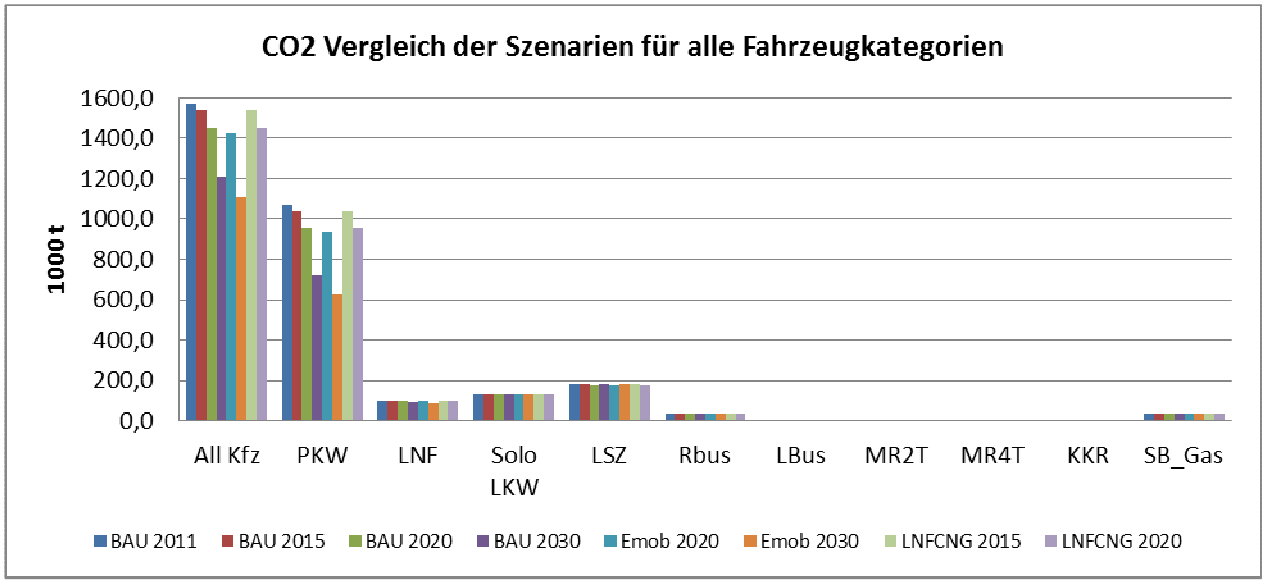


Abbildung 19: CO2 - Vergleich der Szenarien für alle Jahre und Fahrzeugkategorien

Abbildung 19: CO2 - Vergleich der Szenarien für alle Jahre und Fahrzeugkategorien zeigt die jährlichen Gesamtemissionen an direktem CO_2 des Straßenverkehrs für alle berechneten Szenarien. Im Bild werden die Emissionsmengen weiters nach Fahrzeug-Kategorien aufgeschlüsselt.

Im Basisszenario 2011 verteilt sich der Gesamt-CO_2 Ausstoß des Straßenverkehrs am Wiener Stadtgebiet von 1,57 Mio. Tonnen pro Jahr auf 68% von PKW, 6% von Leichten Nutzfahrzeugen („LNF“) und rund 20% von Lastkraftwagen („Solo LKW“ und Last- und Sattelzügen „LSZ“). Linienbusse haben einen Anteil von knapp 3% am CO_2-Ausstoß, wobei davon 2,4%-Punkte auf die LPG-Busse der Wiener Linien entfallen („SB_Gas“). Weitere 2,5% der direkten CO_2 Emissionen entfallen auf Reisebusse („Rbus“), dieser Wert ist allerdings unsicher da die Verkehrsleistung der Reisebusse für Wien aus dem Flottenmodell für Österreich abgeleitet wurde. Zweiräder (Kleinkrafträder „KKR“, Motoräder mit 4-Taktmotor „MR4T“ sowie Motoräder mit 2-Taktmotor „MR2T“) tragen ca. 0,4% zum Gesamt-CO_2-Ausstoß im Basisjahr 2011 bei.

In der Interpretation aller Ergebnisse für die Jahre 2015 bis 2030 ist zu beachten, dass die Berechnungen die Rahmenbedingung konstanter Verkehrsmengen enthalten. Im „Business As Usual“-Szenario sinken damit die CO_2-Gesamtemissionen rein durch technologische Änderungen in der fahrzeugflotte um 2% bis 2015, ca. 7,5% bis 2020 und um gut 22% bis 2030. Der Großteil dieser Co2-Einsparungen entfällt auf die Fahrzeugkategorie PKW durch die erwartete Effizienzsteigung bei den Antrieben aber vor allem durch die auch bereits im „BAU“ angenommenen starken Zuwächse in der Elektromobilität. Diese Entwicklung zeigt sich in einem verstärkten Ausmaß im Szenario „forcierte Elektromobilität“ (Emob). Dort wurden Reduktionen für den direkten CO_2-Ausstoß von 9% für 2020 sowie 29% für 2030 berechnet (jeweils im Vergleich mit dem Basisjahr 2011). Wie in Abschnitt 5.2 beschrieben

sind für diese Entwicklung aber auf technologischer Sicht deutliche Reduktionen v.a. bei den Anschaffungskosten und entsprechende Rahmenbedingungen auf politischer Seite notwendig. Das Szenario „Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen“ (LNFCNG) ist weitgehend CO_2-neutral.

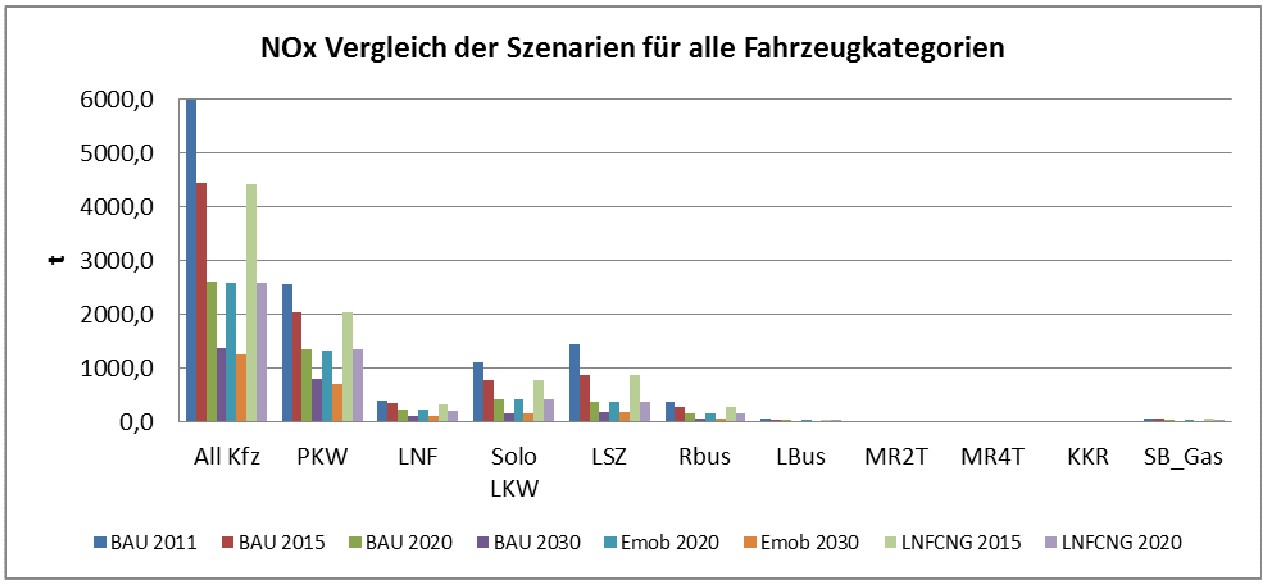


Abbildung 20: NOx - Vergleich der Szenarien für alle Jahre und Fahrzeugkategorien

Abbildung 20 zeigt die Mengen an direkten Stickoxid-Emissionen (NOx) in den einzelnen Berechnungsfällen. Im Basisjahr 2011 verteilen sich die NOx-Emissionen zu 43% von PKW, knapp 7% von LNF und den restlichen 50% von Schweren Nutzfahrzeugen (LKW und Bussen).

In der Emissionsentwicklung im BAU Szenario ergeben sich bezogen auf das Basisjahr 2011 Reduktionen im NO_x-Ausstoß von 26% bis 2015, 56% bis 2020 sowie 77% bis 2030. Dabei sind – vor allem kurz- und mittelfristig – stärkere relative NO_x-Reduktionen bei Schweren Nutzfahrzeugen als bei PKW und LNF zu erwarten.[36] So nimmt der Anteil der Schweren Nutzfahrzeuge an den NO_x-Emissionen bis 2020 auf unter 40% ab. Für das Szenario „forcierte Elektromobilität“ ergeben sich erwartungsgemäß etwas stärkere Reduktionen im NO_x Ausstoß als in der BAU-Entwicklung (57% bis 2020 sowie 79% bis 2030). Eine nicht unerhebliche Reduktion des NO_x-Ausstoßes wird mittelfristig auch durch die Maßnahme „Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen“ erreicht. So ergeben sich jeweils im Vergleich mit demselben Jahr in der BAU Entwicklung in diesem Szenario eine Reduktionen der NOx Gesamtemissionen von 0,4% im Jahr 2015 sowie von 0,8% im Jahr 2020.

[36] Die Berechnungen wurden mit dem Datenstand zu Emissionsverhalten von PKW gemäß Frühjahr 2013 gerechnet. Bis zum Zeitpunkt der Endberichtserstellung wurde die Prognose für NO_x-Emissionen von EURO6 Diesel-PKW nach oben korrigiert, dementsprechend würden sich gemäß aktuellsten Datum geringere NO_x Reduktionen für die Zeithorizonte 2015 und 2020 ergeben.

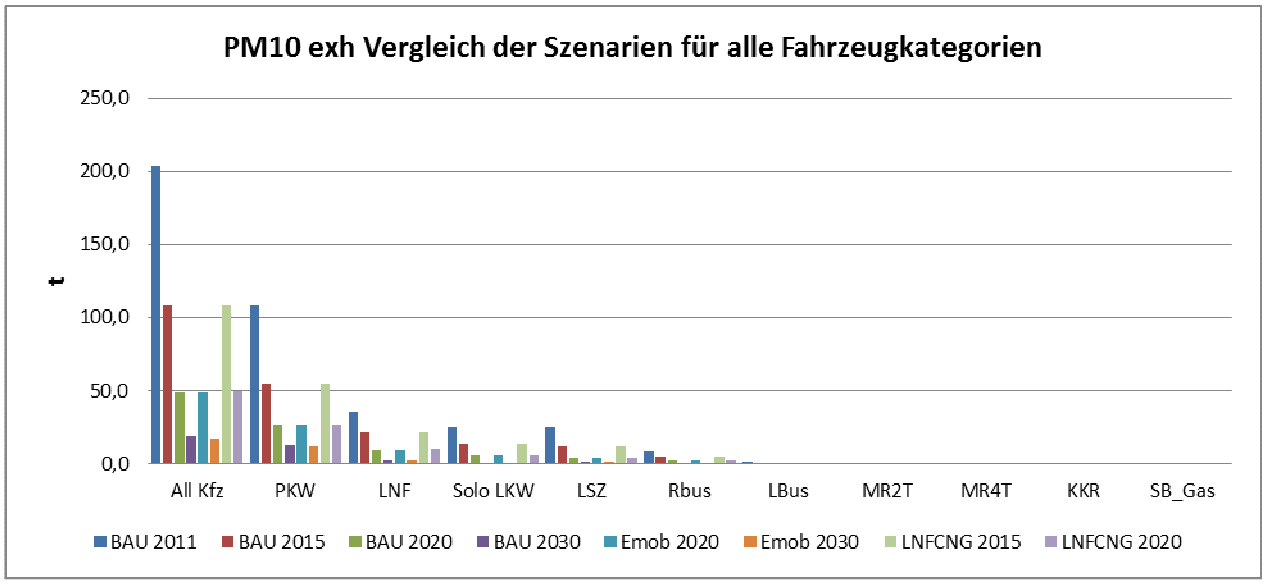


Abbildung 21: PM10 aus dem Verbrennungsvorgang - Vergleich der Szenarien für alle Jahre und Fahrzeugkategorien

In Abbildung 21 sind die Emissionsmengen an motorischen Partikeln („PM exhaust“) dargestellt. Die Gesamtemissionen von ca. 200t/Jahr verteilen sich auf die Fahrzeuggruppen PKW, LNF und SNF nach den Anteilen 53%, 17% und 30%. Durch den Einsatz von Dieselpartikelfiltern bei allen Neufahrzeugen ergeben sich für diese Schadstoffkomponente die größten Reduktionsraten in den berechneten Szenarien. In der BAU-Entwicklung können im Vergleich zum Basisjahr 2011 mit Reduktionen von 47% bis 2015, 76% bis 2020 sowie von 91% bis 2030 erwartet werden. Diese Reduktionsraten werden durch die geänderten Annahmen in den beiden Alternativszenarien nur geringfügig verändert.
Nicht im Bild dargestellt sind die nichtmotorischen PM10 Emissionen („PM non-exhaust“). Diese sind nach derzeitigem Wissenstand nur mit großen Unsicherheiten zu quantifizieren. Mit den im Modell verwendeten Werten ergibt sich für PM non-exhaust eine jährliche Emissionsmenge von ca. 250t. Diese Emissionsmenge ist aufgrund konstanter Verkehrsmengen konstant für alle Berechnungsfälle. Bereits im Basisjahr 2011 überwiegt die Emissionsmenge nicht-motorischer Partikel aus Abriebs- und Aufwirbelungsprozessen gegenüber den motorischen Partikeln.

7.5.2 Ergebnisse im Netzwerk

Hier folgt nun eine Auswahl an Ergebnisbildern des Netzmodells für Wien. Einen Überblick über alle Ergebnisse findet sich in Kapitel 7.7 Gesamtemissionen.
Auf den Bildern ist der Emissionsausstoß normiert pro Kilometer und durchschnittlicher Stunde [kg/(km*h)] dargestellt. Diese Darstellung ist proportional zum lokalen Beitrag des Verkehrs zur Schadstoffkonzentration. Die gesamte Emissionsmenge für das Berechnungsgebiet ergibt sich als Integral der [kg/(km*h)]-Werte über alle Streckenlängen multipliziert mit 365*24 Stunden pro Jahr.

Der lokale Schadstoffausstoß hängt von folgenden Faktoren ab:

- Verkehrsmenge
- Split der Verkehrsmenge nach Fahrzeugkategorien (z.B. Schwerverkehrsanteil)
- Fahrzustand (bestimmt durch Straßentyp und Verkehrsmenge)
- Fahrbahnlängsneigung

Dabei sind die Einflüsse der oben aufgelisteten Faktoren unterschiedlich je nach betrachteter Emissionskomponente.

7.5.2.1 Business as usual (BAU) im Jahr 2011

CO2

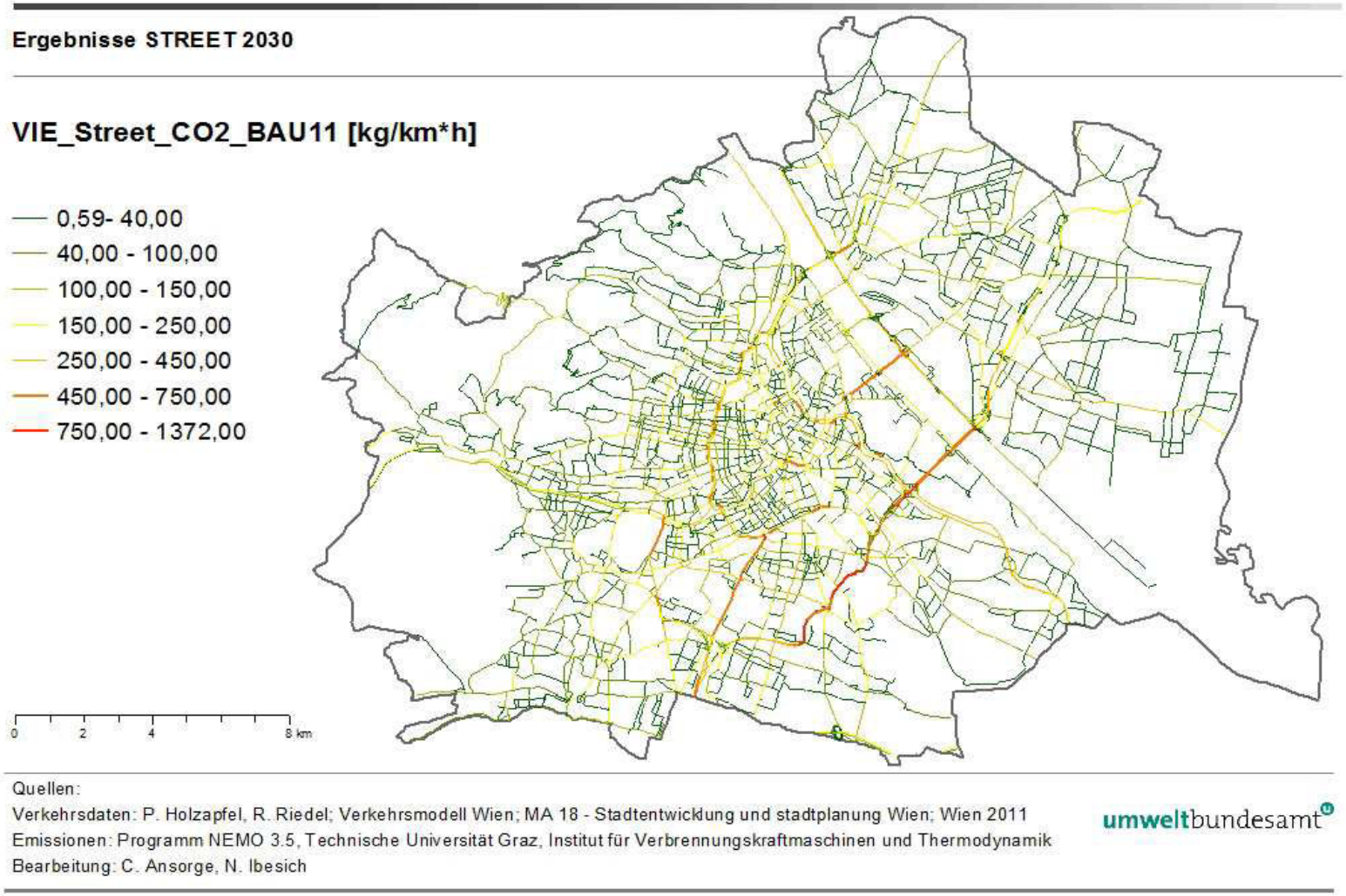


Abbildung 22: CO2 Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2011

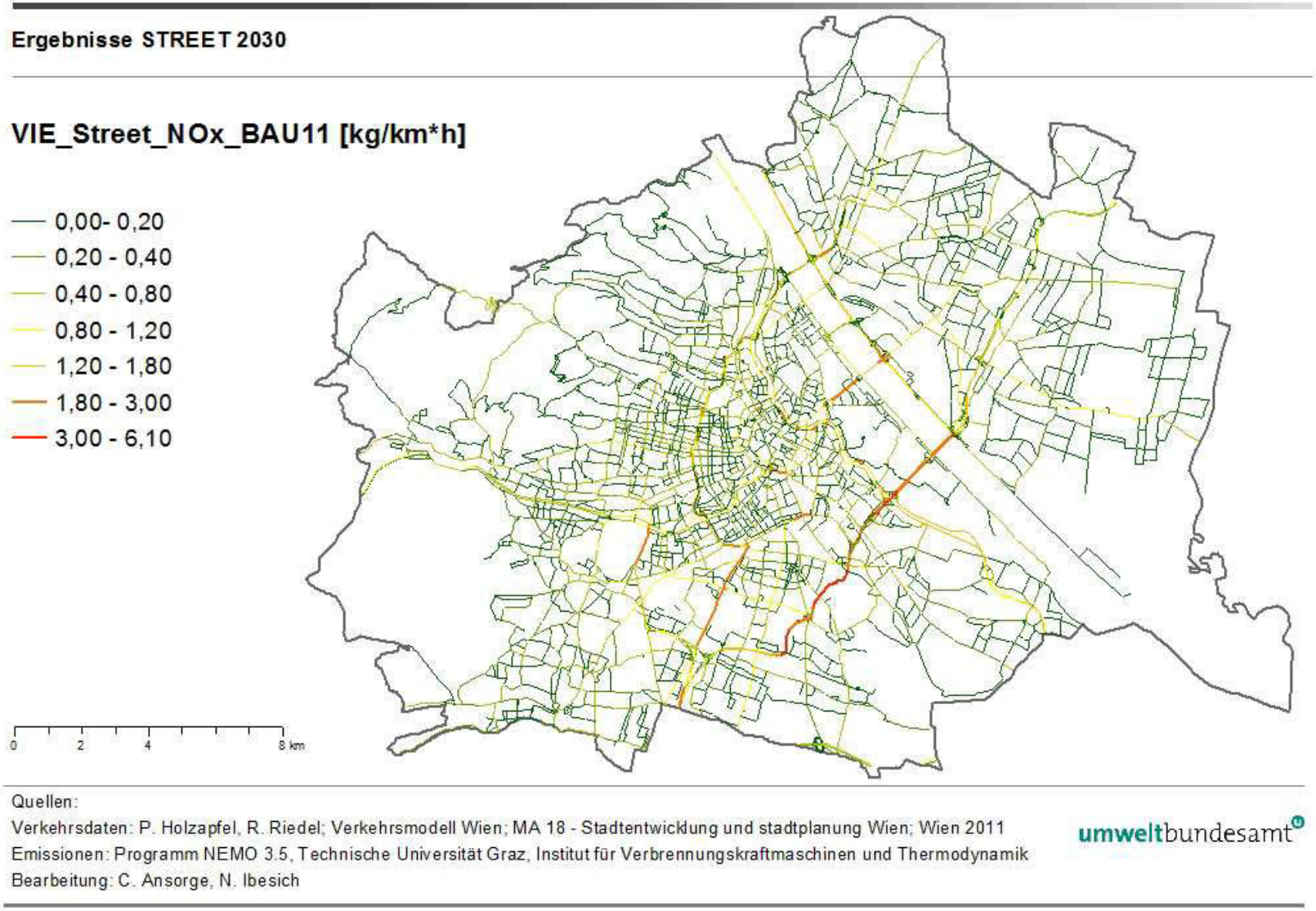


Abbildung 23: NOx Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2011

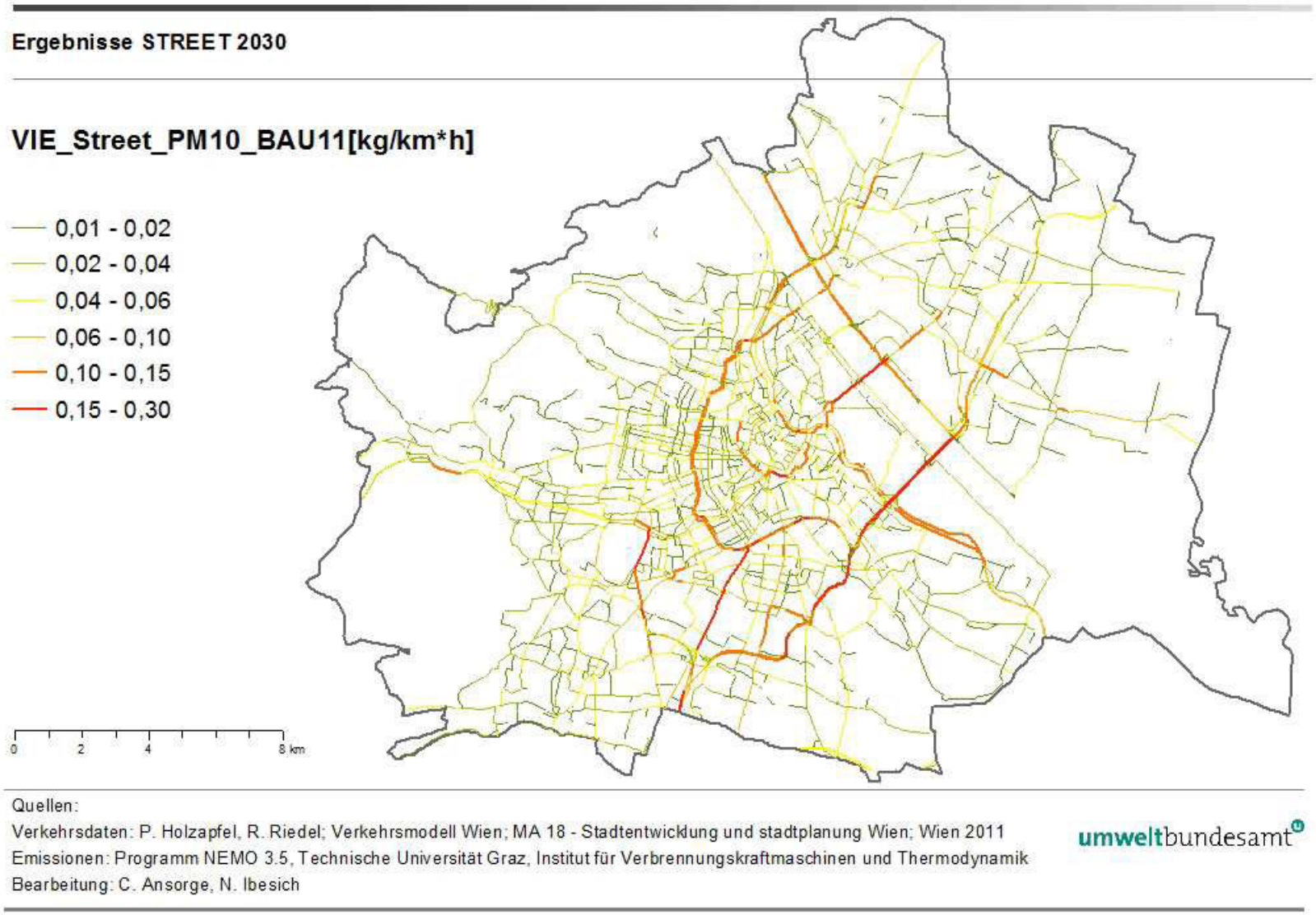


Abbildung 24: PM10 Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2010

Die Staubemissionen (PM10 - für das Jahr 2011 in Abbildung 24) setzen sich aus Emissionen aus der Verbrennung (PM10 Exhaust – PMEx - für das Jahr 2011 in Abbildung 25) sowie aus Reifenabrieb und Aufwirbelung (PM10 Non Exhaust – PMNEx - für das Jahr 2011 in Abbildung 26) zusammen. Da die Verkehrsmenge über alle Szenarien gleich bleibt (siehe Kapitel 2.2.7 im Endbericht – Tätigkeitsbericht an die FFG) bleibt auch der Anteil der Staubemission aus Abrieb und Aufwirbelung gleich. Nur der Anteil aus dem Verbrennungsprozess im Motor verringert sich über die Jahre.

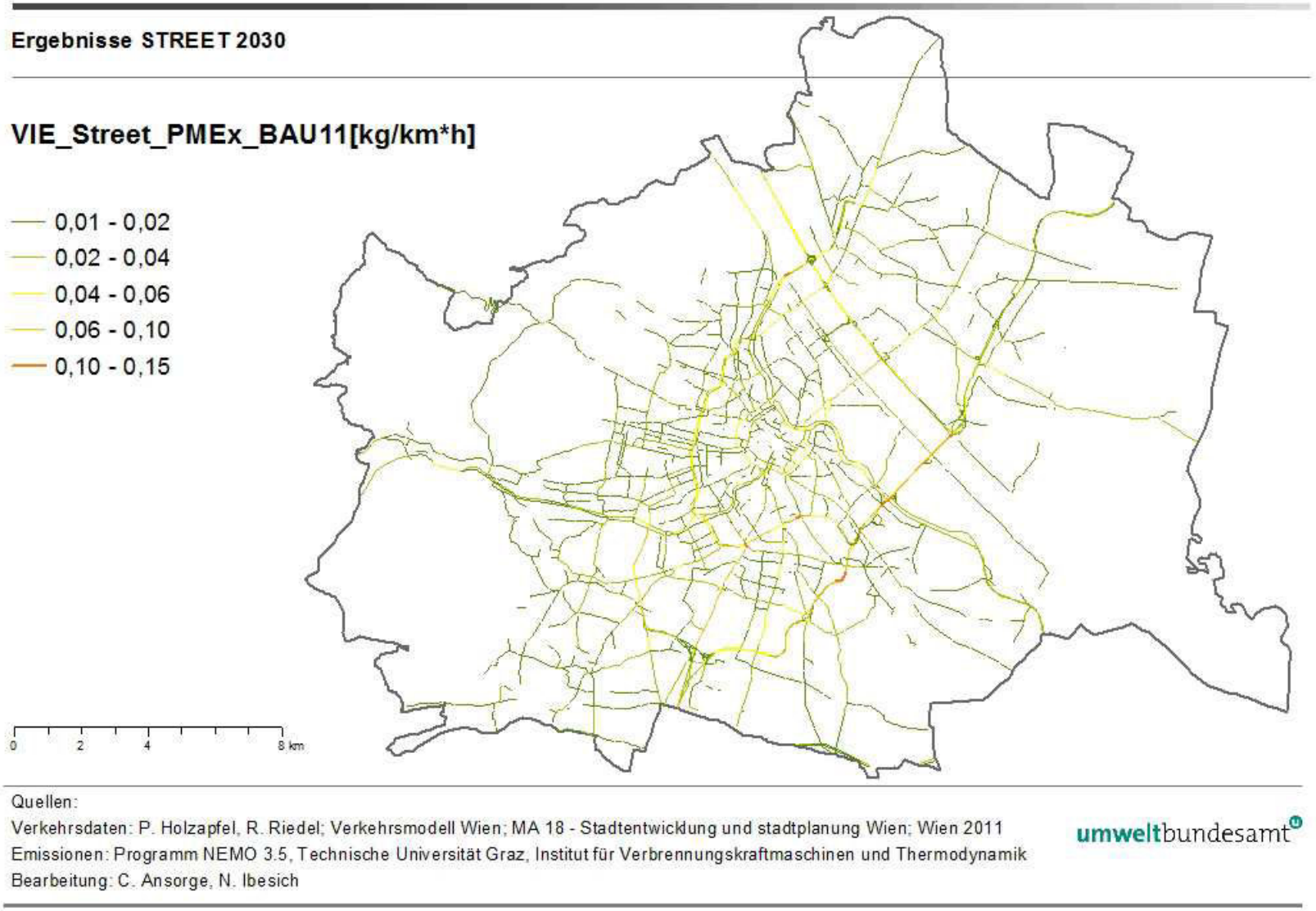


Abbildung 25: PM10 Emissionen aus dem Verbrennungsvorgang in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2011

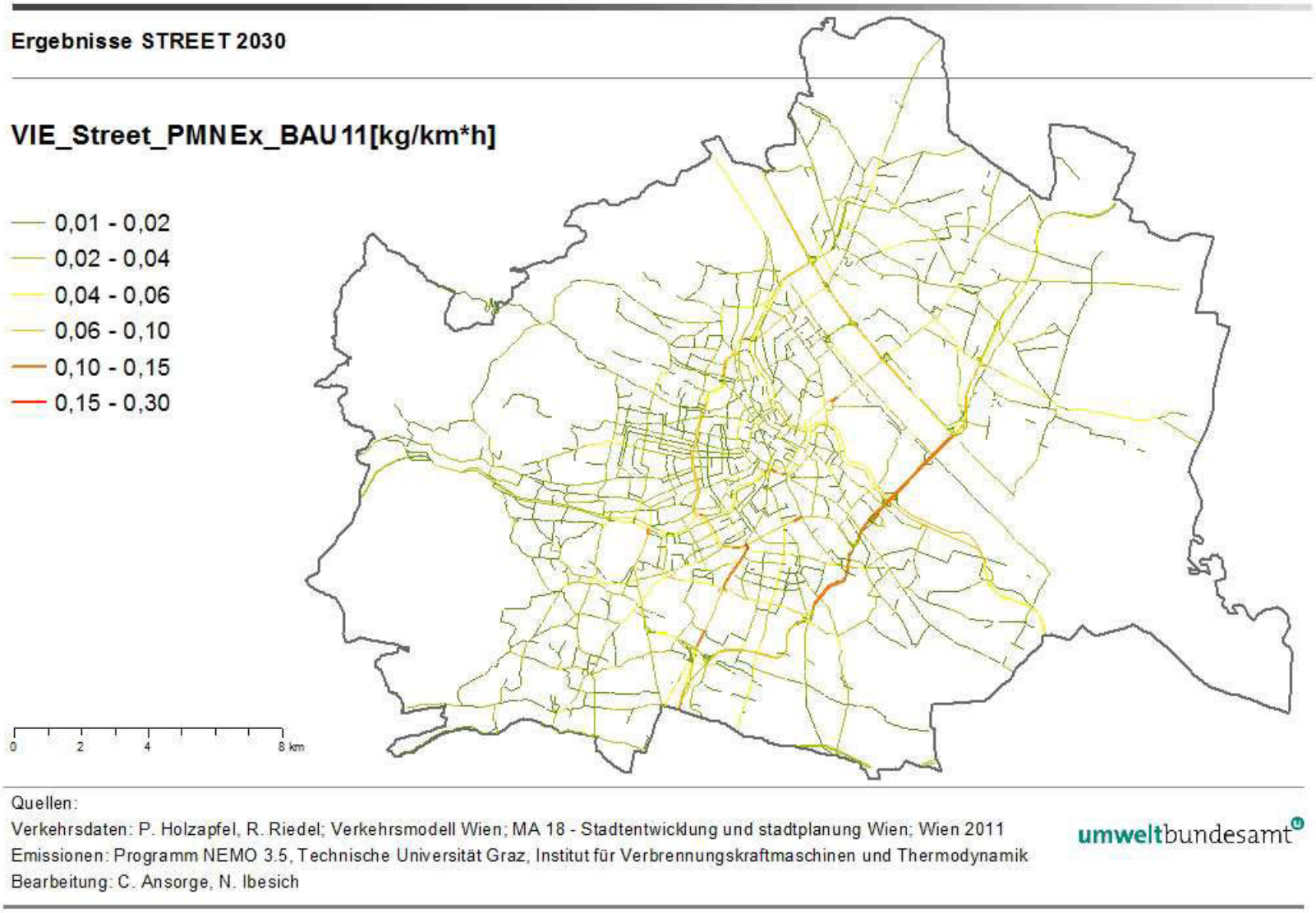


Abbildung 26: PM10 Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2011

7.5.3 Business as usual (BAU) in den Jahren 2011 bis 2030 für NOx

Den technologischen Fortschritt zeigt man am anschaulichsten am Schadstoff NOx, hier ist die Abnahme durch die getroffenen Annahmen schon im BAU beträchtlich.

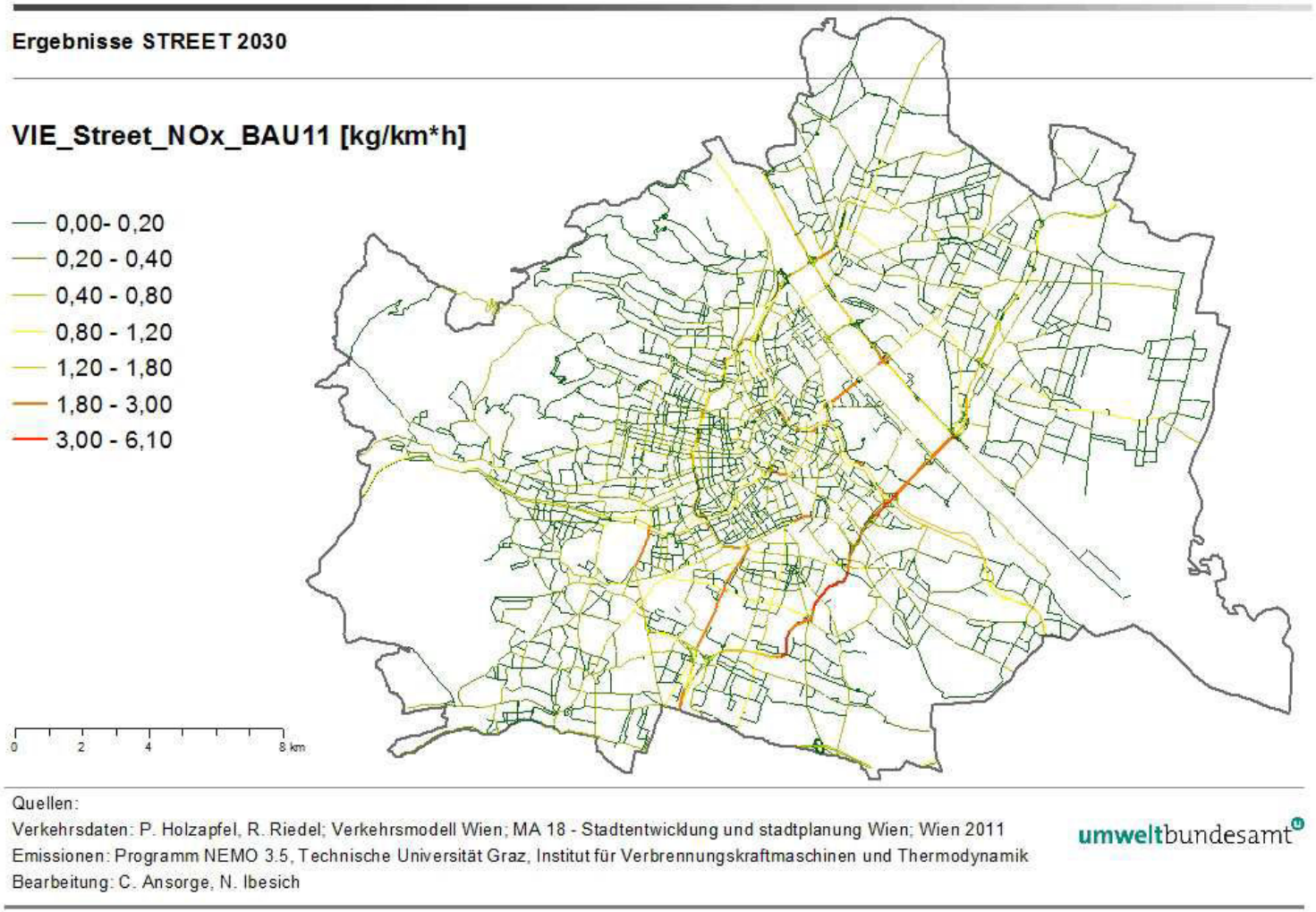


Abbildung 27: NOx Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2011

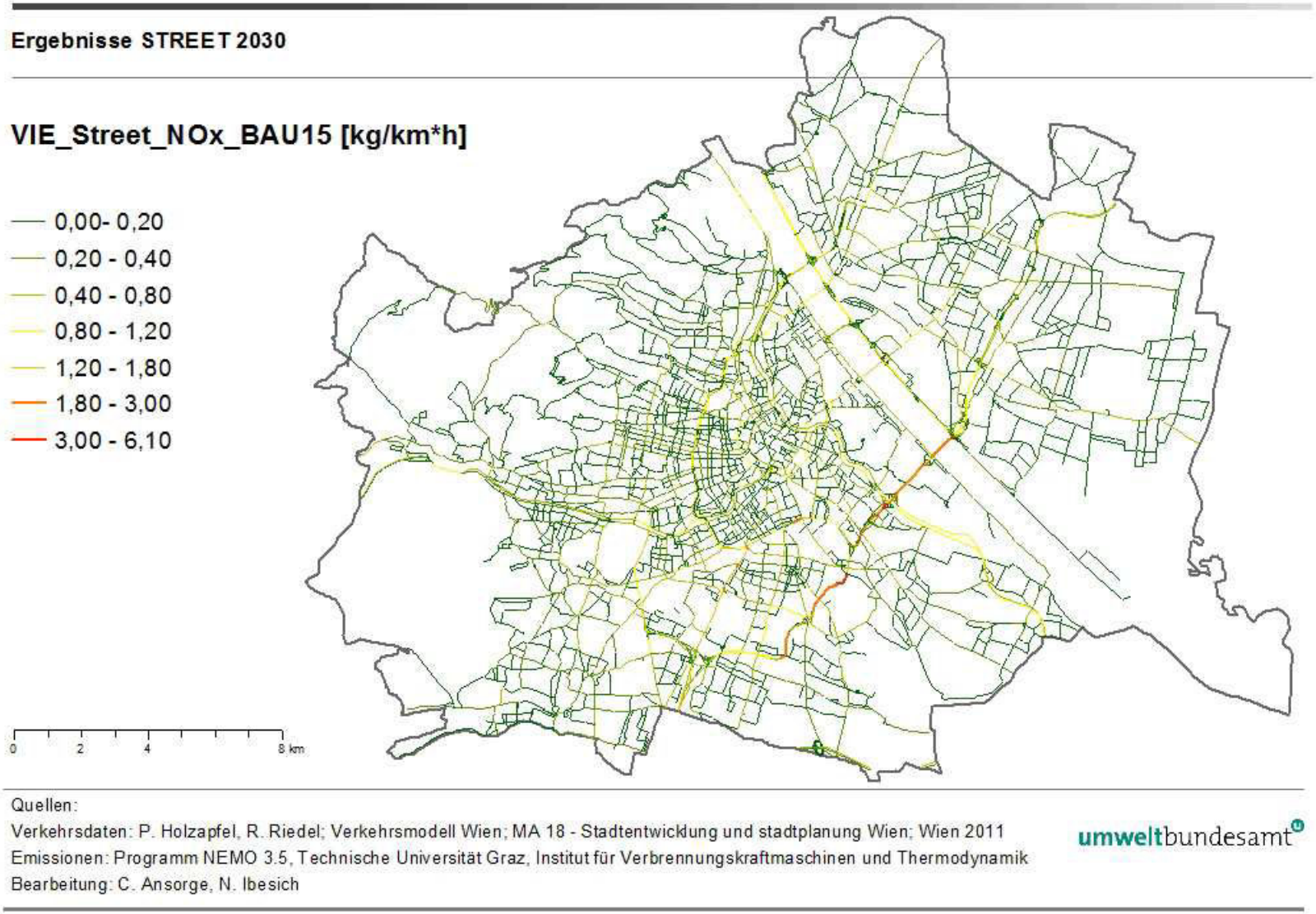


Abbildung 28: NOx Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2015

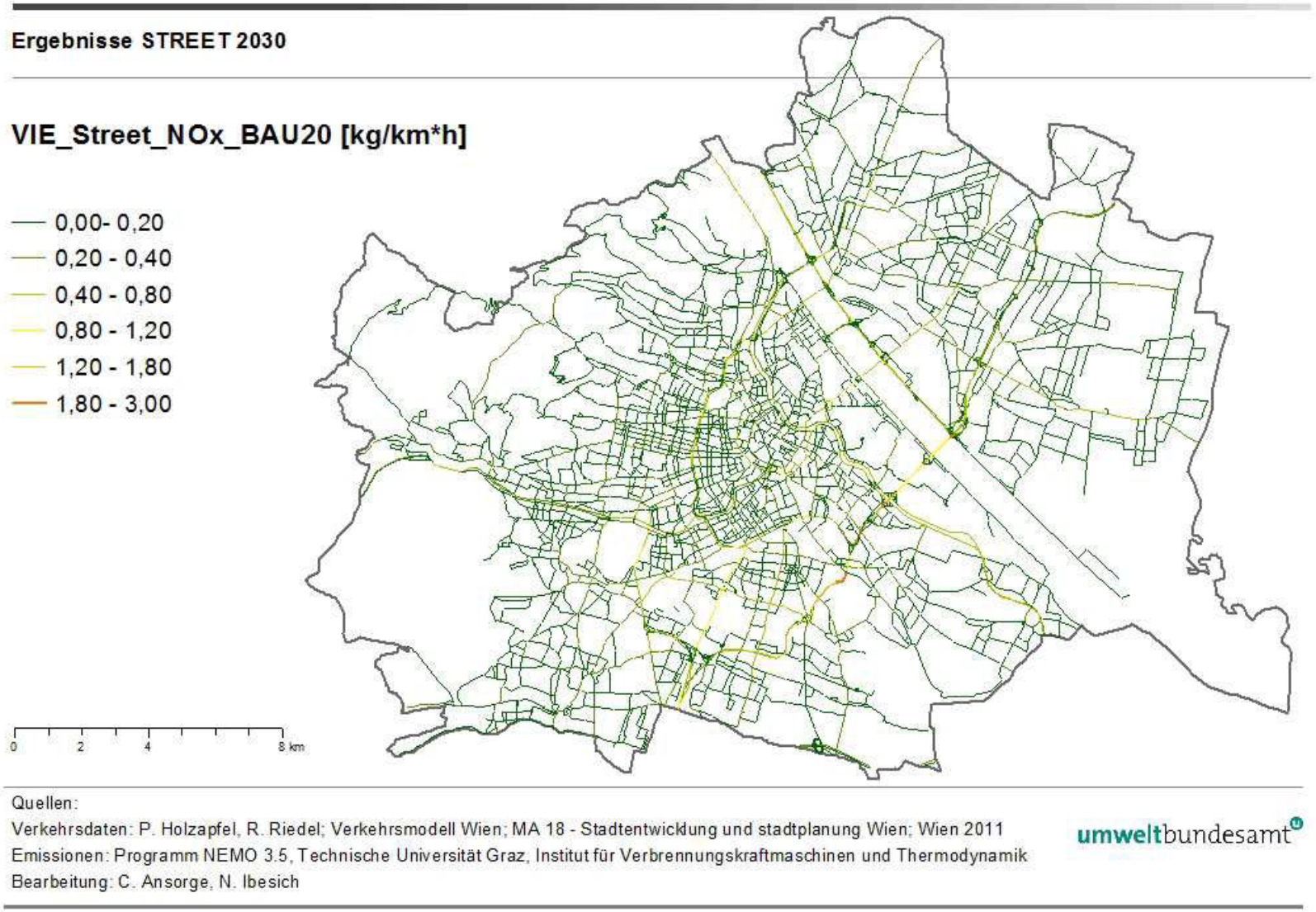


Abbildung 29: NOx Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2020

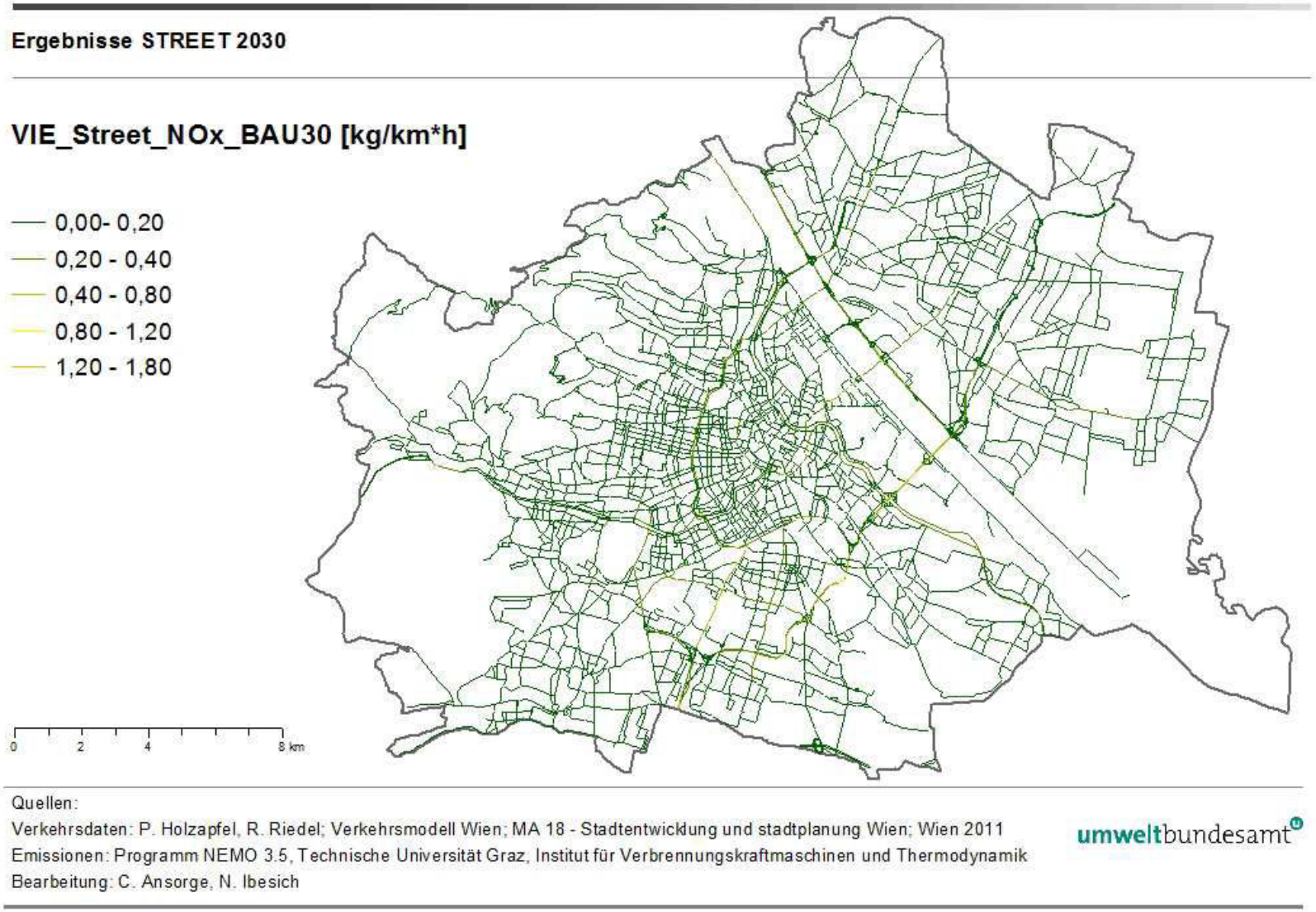


Abbildung 30: NOx Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2030

7.6 Vorgelagerte Emissionen

Die ganzheitliche Bewertung von Umweltauswirkungen der Mobilität wird durch die Berücksichtigung von vorgelagerten Emissionen aus der Energie- und Fahrzeugherstellung möglich. Nachfolgend werden die vorgelagerten CO_2-Äquivalent-Emissionen, NOx-Emissionen, PM10-Emissionen und der kumulierte Energieeinsatz für das BAU-Szenario, das Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ und das Szenario „Forcierung von CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen“ abgebildet.

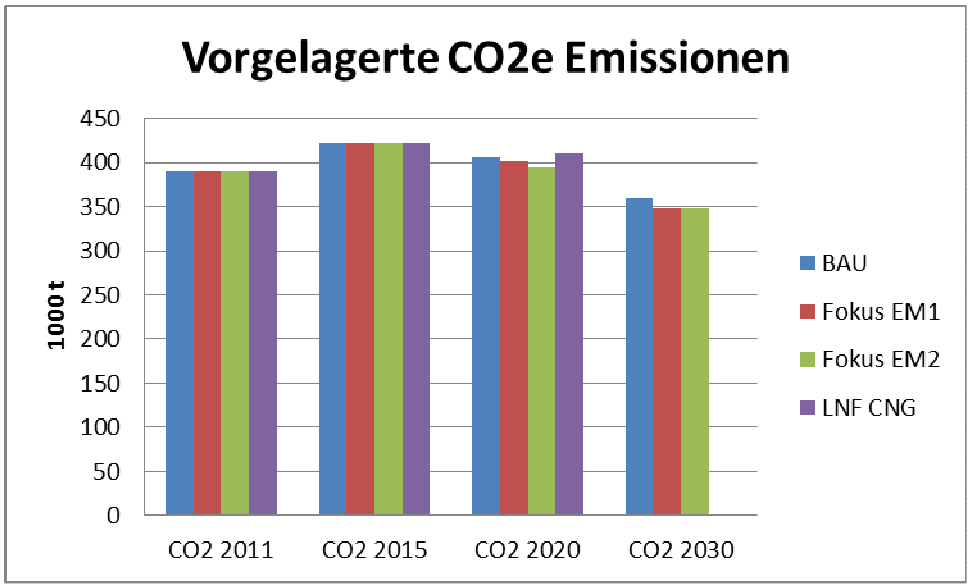


Abbildung 31: Vorgelagerte CO_2-Äquivalent-Emissionen in 1.000 t im BAU, für das Szenario Elektromobilität (EM) (EM1 mit Strompark Österreich, EM 2 mit Ökostrom) und für das Szenario CNG in LNF

Die vorgelagerten CO_2-Äquivalent-Emissionen steigen im BAU-Szenario im Jahr 2015 und 2020 an. Erst im Jahr 2030 liegen die vorgelagerten CO_2-Äquivalent-Emissionen unter dem Ausgangswert vom Jahr 2011. Die vorgelagerten CO_2-Äquivalent-Emissionen beim BAU-Szenario steigen auf Grund der höheren Biokraftstoffmengen im Verkehrssektor an und sinken erst dann, wenn der Energieeinsatz für die Mobilität deutlich sinkt. In den Jahren 2015 und 2020 überkompensieren die höheren Bereitstellungsemissionen der Biokraftstoffe, die verstärkt auch bis 2020 eingesetzt werden, den Rückgang der fossilen Treibstoffmengen.

Das Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ zeigt einen Rückgang der direkten Emissionen, da ein Teil der Verbrennungsemissionen vom Kraftfahrzeug durch Elektrofahrzeuge substituiert werden. Die vorgelagerten Emissionen berücksichtigen neben den konventionellen Fahrzeugen vor allem die Energiebereitstellung und die Fahrzeugherstellung von Elektrofahrzeugen. Die Emissionsfaktoren werden im Kapitel 10.2 beschrieben.

Elektrofahrzeuge haben auf Grund der Batteriesysteme einen höheren Materialeinsatz, die Strom-Energiebereitstellungen in den Jahren 2020 und 2030 zeigen für Österreich niedrigere Emissionen als die Stromaufbringung im Jahr 2011. Somit führen Elektrofahrzeuge auch unter Berücksichtigung der vorgelagerten Emissionen zu einer Reduktion von Emissionen im Straßenverkehr. Die Reduktion fällt

noch deutlicher aus, wenn der Strom ausschließlich durch Ökostrom-Anlagen (z. B. Windkraft, Photovoltaik, etc.) erzeugt wird. Die Verbesserung der Performance von Elektrofahrzeuge durch Ökostrom im Jahr 2020 bzw. 2030 fällt nicht mehr so deutlich aus, da der Strompark in Österreich lt. Prognose im Jahr 2030 niedrigere Emissionen als im Jahr 2011 verursachen wird.
An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Entsorgung der Fahrzeuge außerhalb der Ökobilanzierungsgrenze definiert worden ist. Die Batteriesysteme der Elektrofahrzeuge müssen einem Recycling zugeführt werden.

Das Szenario „Forcierung von CNG in Leichten Nutzfahrzeugen“ führt im Jahr 2015 auf Grund sehr geringer Erdgasmengen zu keinen großen Verschiebungen bei den CO_2-Äquivalent-Emissionen. Im Jahr 2020 steigen die vorgelagerten CO_2-Äquivalent-Emissionen im Vergleich zum BAU-Szenario, da die Bereitstellungsemissionen von Erdgas höher als die von Diesel sind.

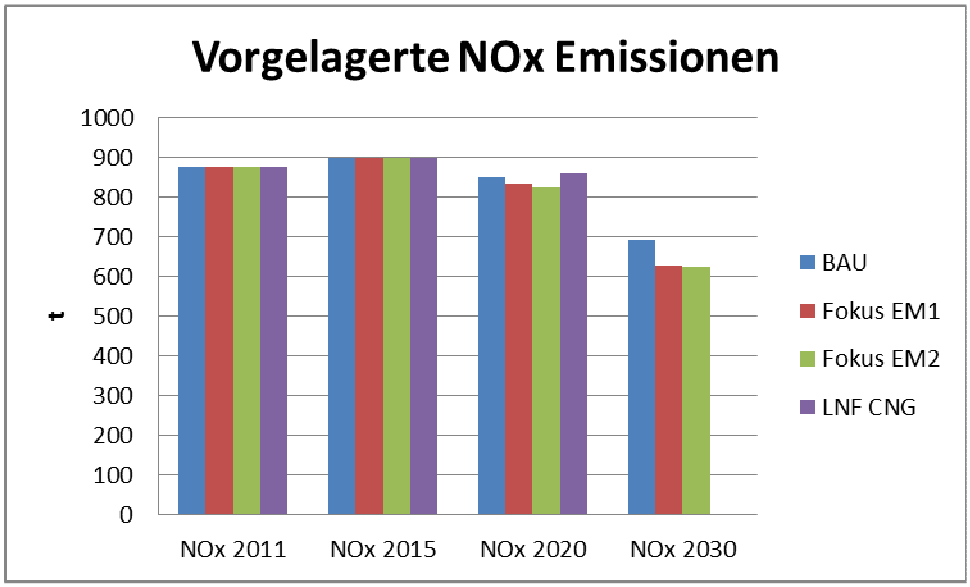


Abbildung 32: Vorgelagerte NO_x-Emissionen in t im BAU-Szenario, für das Szenario Elektromobilität (EM) (EM1 mit Strompark Österreich, EM 2 mit Ökostrom) und für das Szenario CNG in LNF

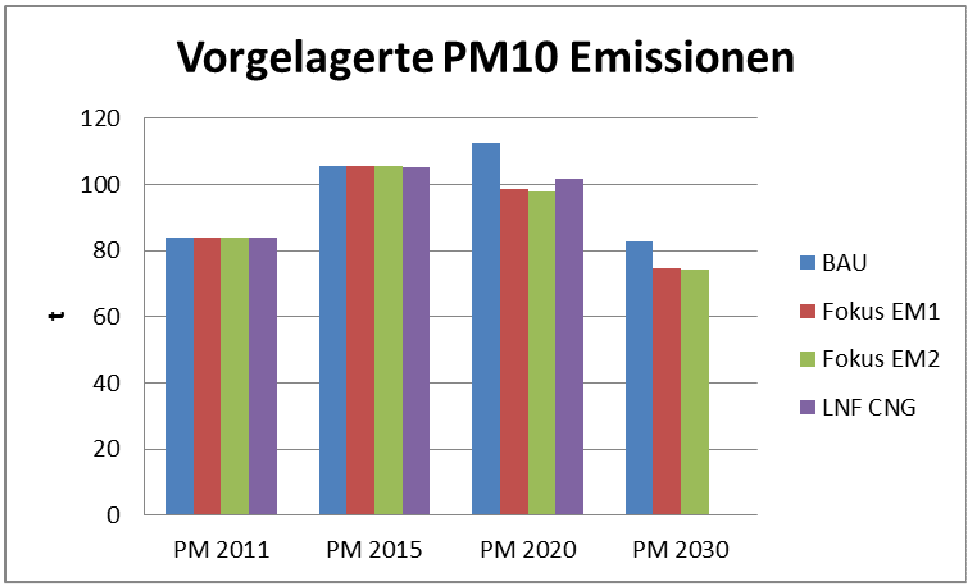


Abbildung 33: Vorgelagerte PM10-Emissionen in t im BAU-Szenario, für das Szenario Elektromobilität (EM) (EM1 mit Strompark Österreich, EM 2 mit Ökostrom) und für das Szenario CNG in LNF

Wie in den obigen beiden Abbildungen ersichtlich steigen die vorgelagerten NO_x- und PM10-Emissionen im Jahr 2020 an. Der verstärkte Biokraftstoffeinsatz führt zwar zu einer Reduktion der direkten CO_2-Emissionen, die NO_x- und PM10-Emissionen steigen jedoch in der Bereitstellung an. Die Emissionsfaktoren im Kapitel 10.2 sind Ursache für diese Berechnungsergebnisse. Die NO_x-Emissionen von Biodiesel sind rund 40 % höher, PM10-Emissionen sind rund doppelt so hoch als die von Diesel. Bioethanol zeigt ein ähnliches Bild im Vergleich zu Benzin. Die vorgelagerten NO_x- und PM10-Emissionen gehen erst im Jahr 2030 im Vergleich zum Ausgangsjahr 2011 zurück. Ursache dafür ist der geringere Energieeinsatz im Sektor Mobilität.

Das Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ bringt sowohl bei NO_x- als auch bei PM10 vor allem in der Energiebereitstellung so viele Vorteile, dass die vorgelagerten Emissionen im Vergleich zum BAU-Szenario deutlich niedriger sind.

Das Szenario „Forcierung von CNG in Leichten Nutzfahrzeugen“ führt zwar bei PM10 zu niedrigen Emissionen im Vergleich zum BAU-Szenario. Die Bereitstellung von Erdgas führt auf Grund von Gasverlusten während des Transportes und des größeren energetischen Einsatzes für den Transport zu einem Anstieg der vorgelagerten NO_x-Emissionen im Vergleich zum BAU-Szenario.

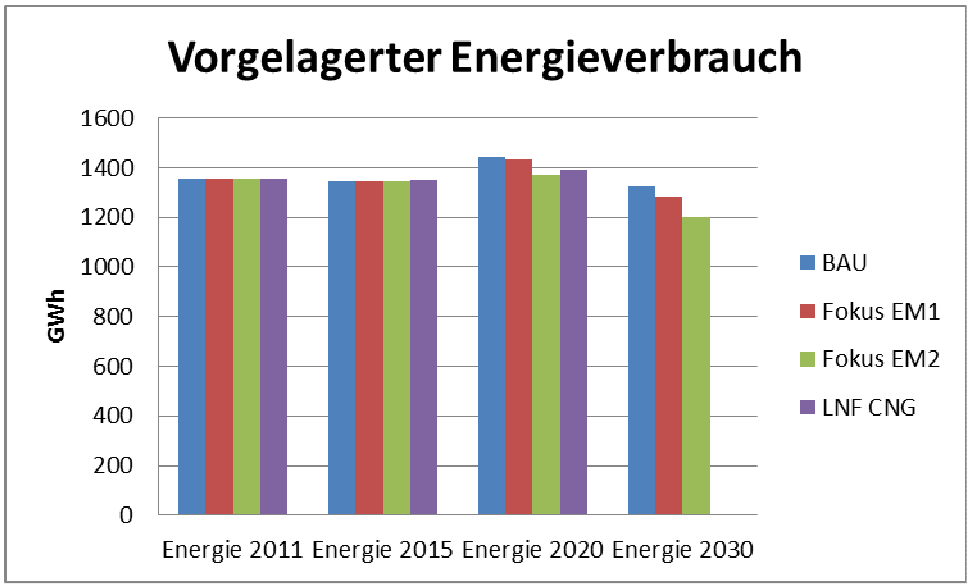


Abbildung 34: Vorgelagerter Energieverbrauch in GWh im BAU-Szenario, für das Szenario Elektromobilität (EM) (EM1 mit Strompark Österreich, EM 2 mit Ökostrom) und für das Szenario CNG in LNF

Der Energieeinsatz für die Bereitstellung von Biokraftstoffen ist höher, als jener für fossilen Dieselkraftstoff. Der Grund dafür liegt an der Energiedichte. Der Energieoutput von Biokraftstoffen pro Liter bzw. kg ist niedriger als der Heizwert von fossilen Diesel bzw. Benzin. Der Energieeinsatz für den Anbau von landwirtschaftlichen Rohstoffen und die Weiterverarbeitung zur 1. Generation von Biokraftstoffen wirkt sich stark auf die Bereitstellungsemissionen und die Bereitstellungsenergieeinsätze aus. Falls der Output von landwirtschaftlichen Rohstoffen erhöht werden kann (z. B. durch Ganzpflanzennutzung), werden die Bereitstellungsemissionen zurückgehen.

Das Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ führt bei beiden Strombereitstellungspfaden (Stromproduktion in Österreich bzw. Ökostrom) zu einer Reduktion der Bereitstellungsenergien. Der Rückgang ist aber deswegen so deutlich, da der direkte Energieeinsatz im Verkehrssektor im Jahr 2030 lt. BAU-Szenario zurückgeht.

7.7 Gesamtemissionen

7.7.1 BAU

7.7.1.1 Straße

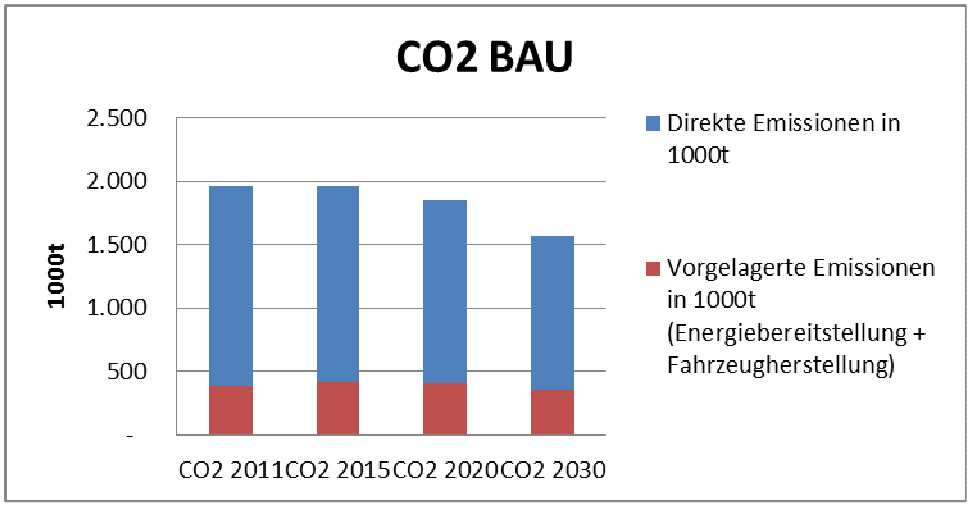


Abbildung 35: Gesamte Emissionen CO2 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im BAU in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

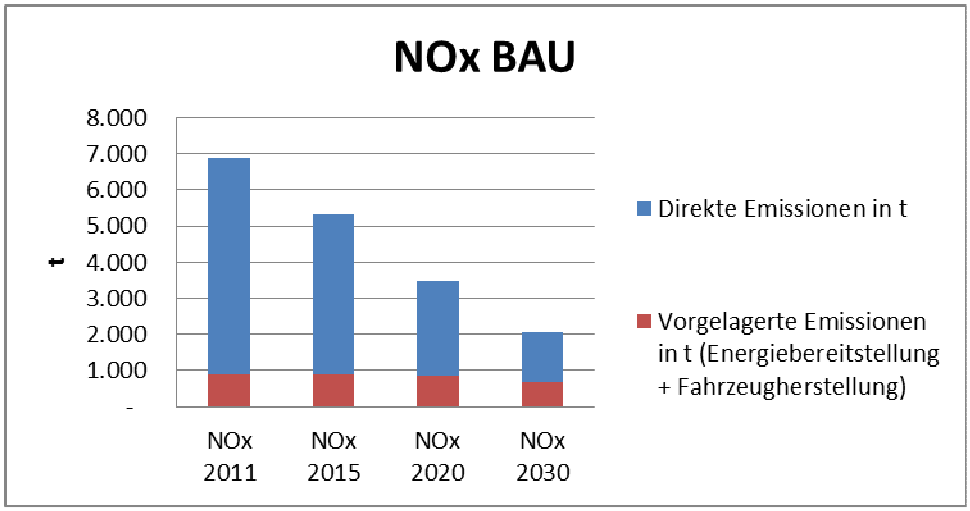


Abbildung 36: Gesamte Emissionen NOx (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im BAU in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

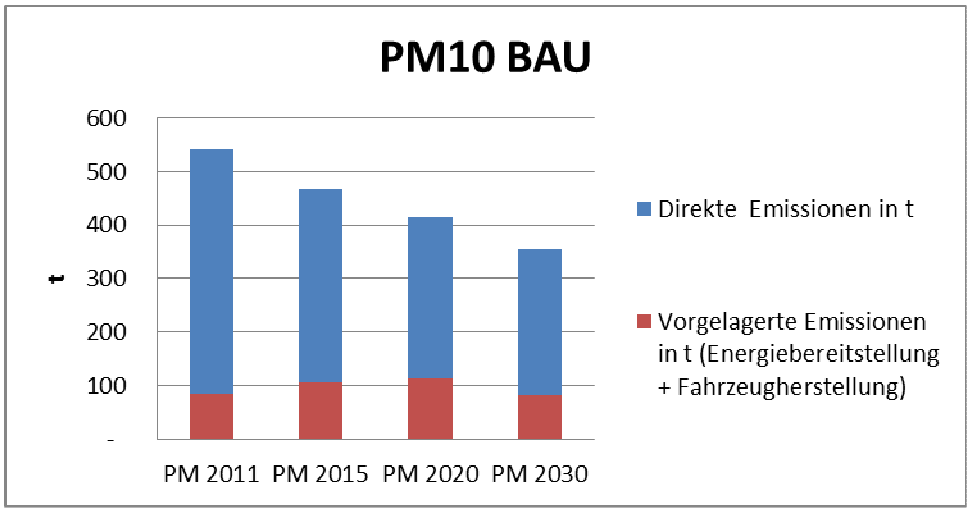


Abbildung 37: Gesamte Emissionen PM10 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im BAU in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

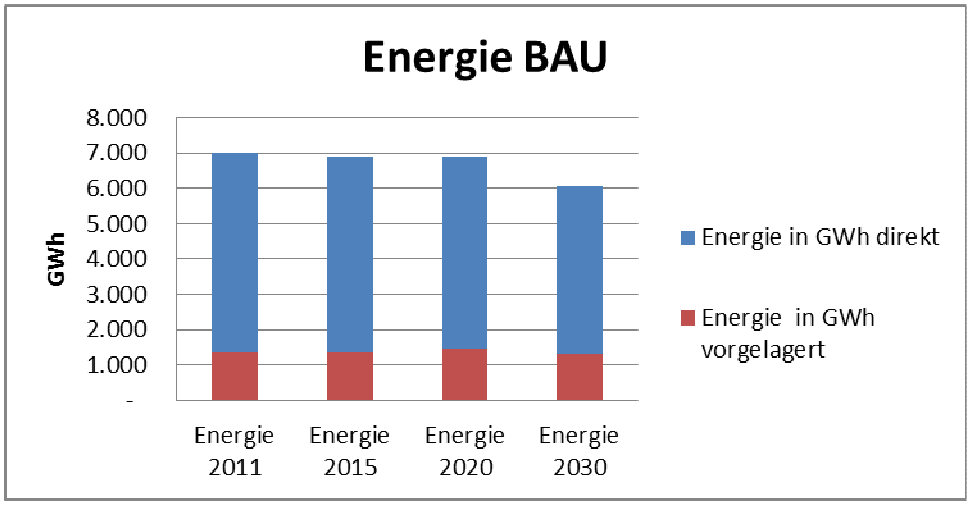


Abbildung 38: Gesamter Energieverbrauch (vorgelagerter und direkter) auf der Straße im BAU in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

7.7.1.2 Schiene

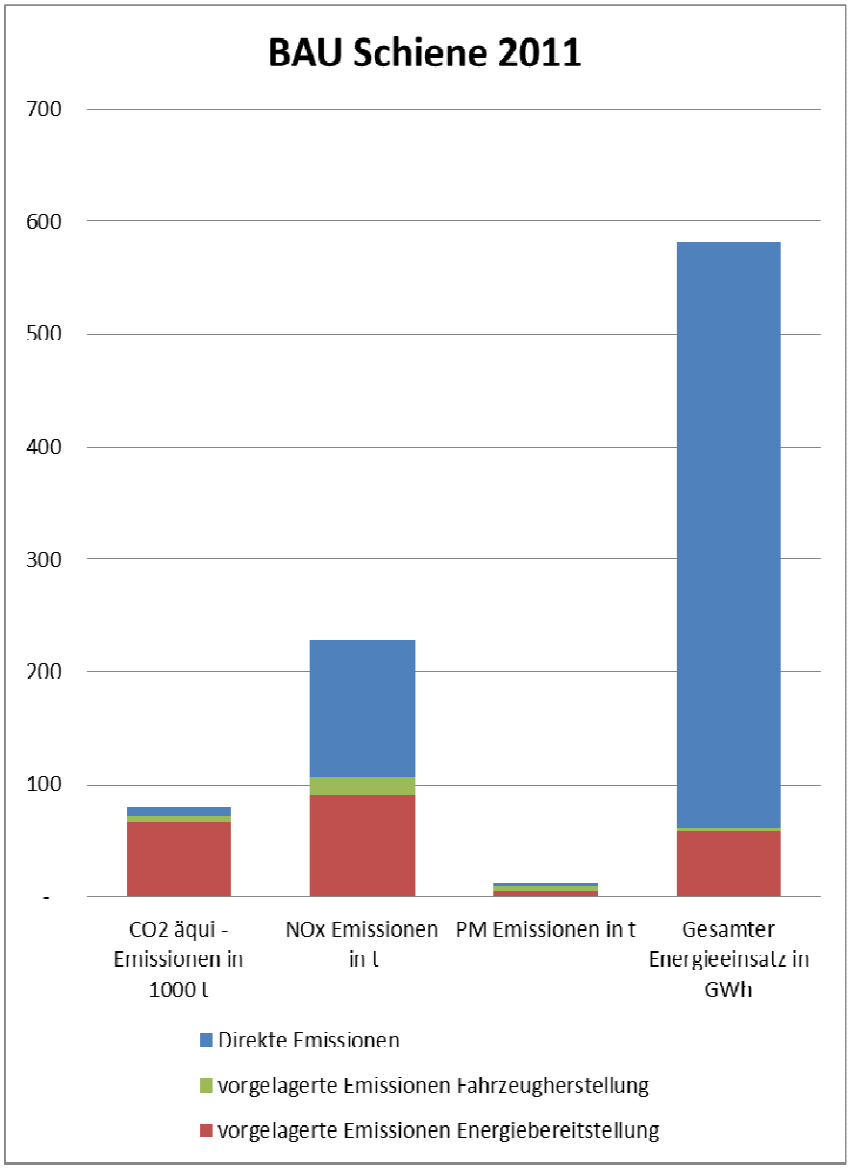


Abbildung 39: Gesamte Emissionen sowie Energieverbrauch (vorgelagerte und direkte) auf der Schiene im BAU im Jahr 2011

7.7.1.3 Schiff

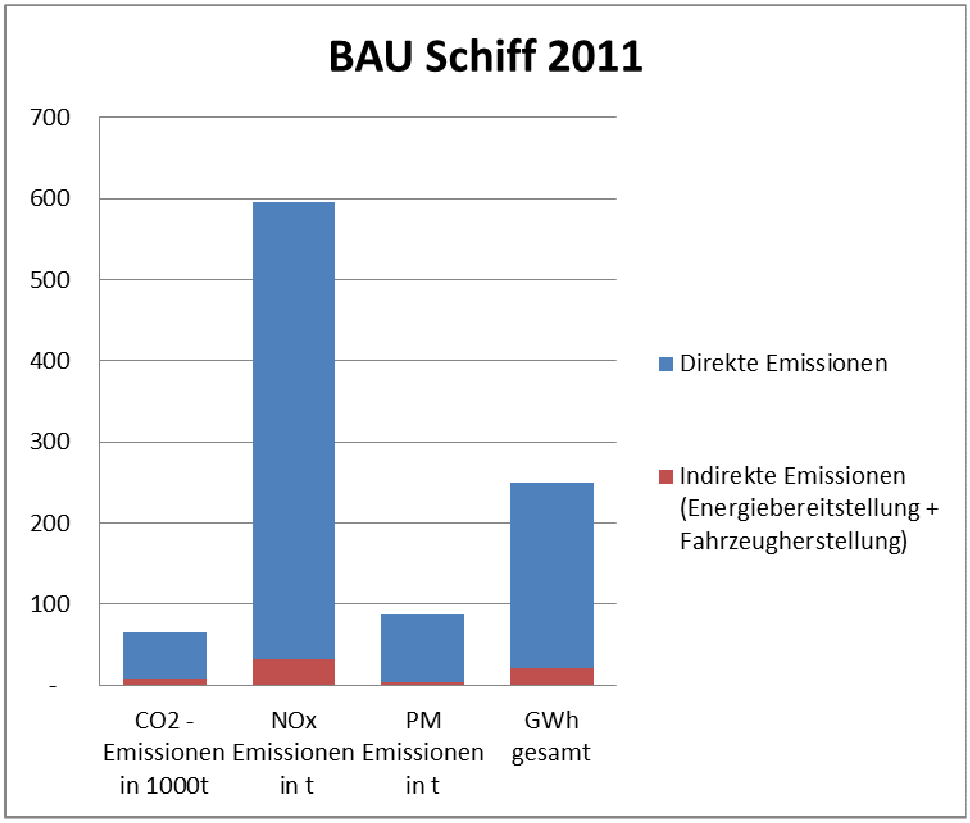


Abbildung 40: Gesamte Emissionen sowie Energieverbrauch (vorgelagerte und direkte) auf der Donau im BAU im Jahr 2011

7.7.2 Szenario Forcierung der Elektromobilität mit Österreichischem Strommix

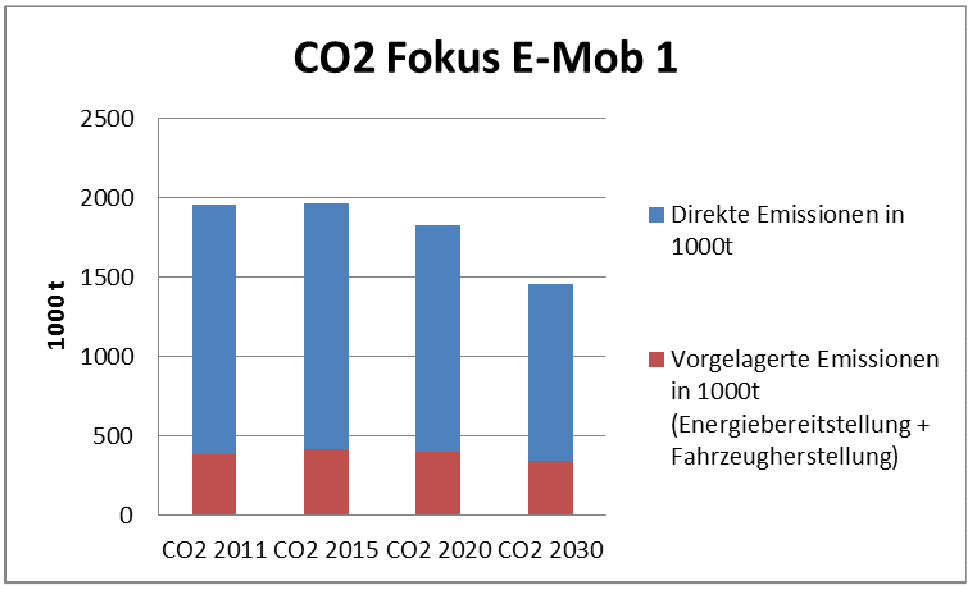


Abbildung 41: Gesamte Emissionen CO2 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ö-Strom-Mix in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

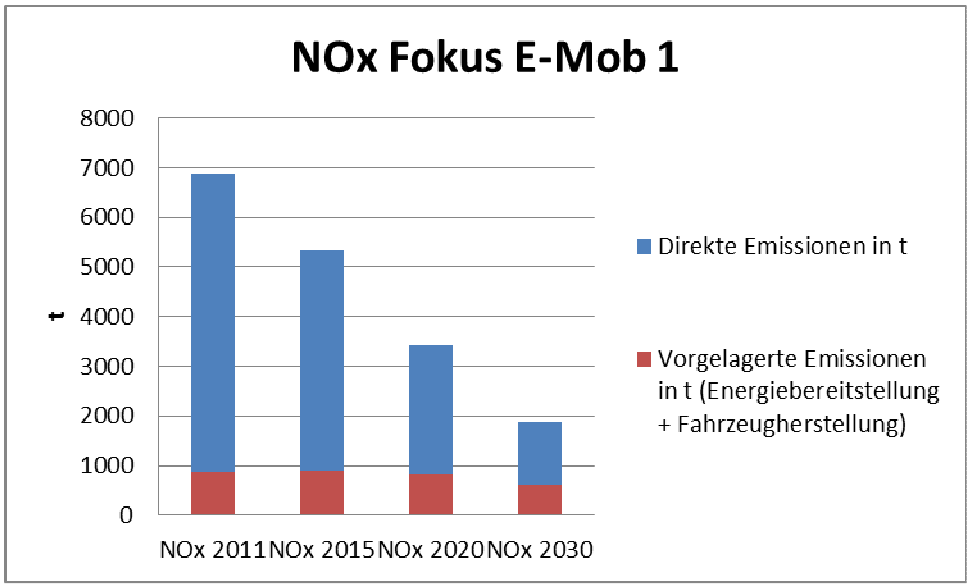


Abbildung 42: Gesamte Emissionen NOx (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ö-Strom-Mix in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

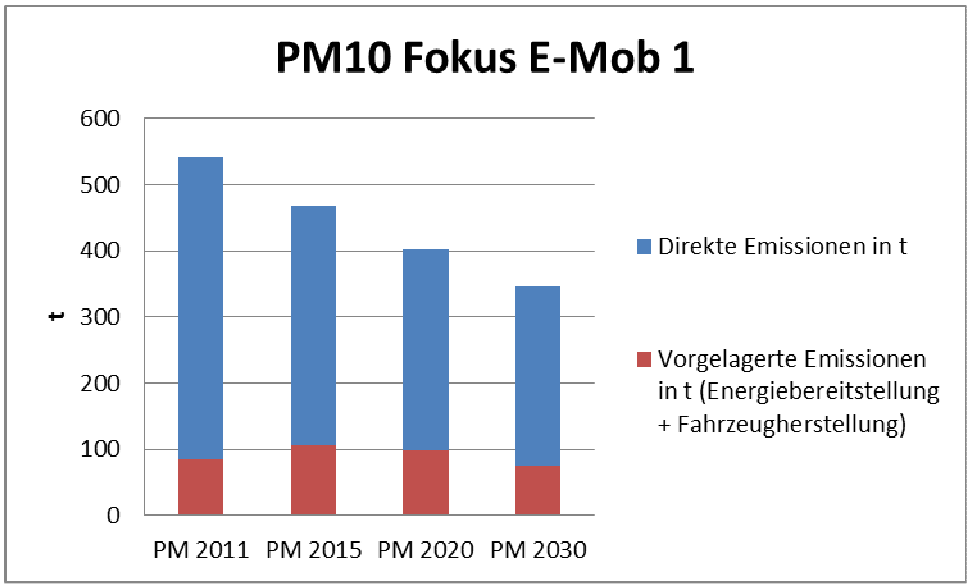


Abbildung 43: Gesamte Emissionen PM10 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ö-Strom-Mix in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

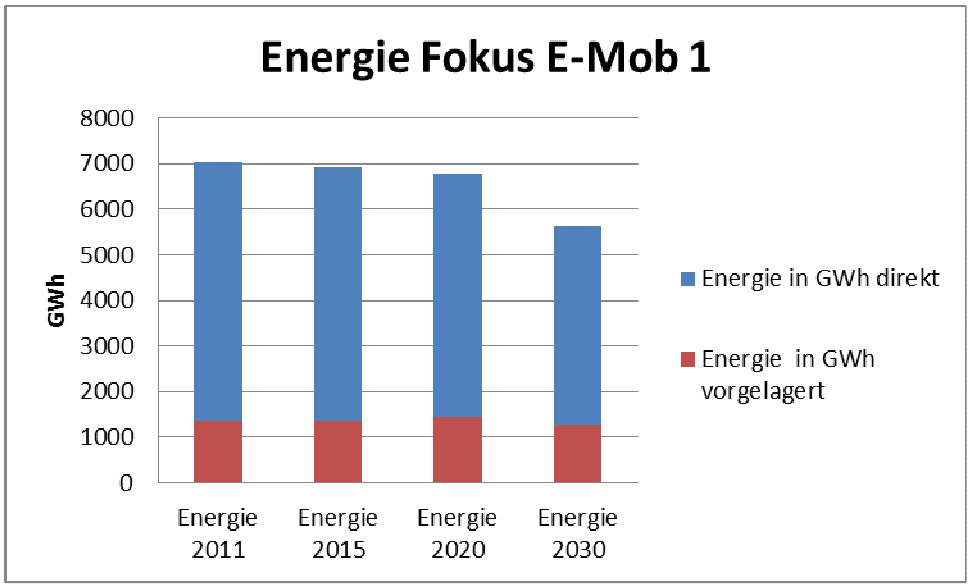


Abbildung 44: Gesamter Energieverbrauch (vorgelagerter und direkter) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ö-Strom-Mix in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

7.7.3 Szenario Forcierung der Elektromobilität mit Ökostrom

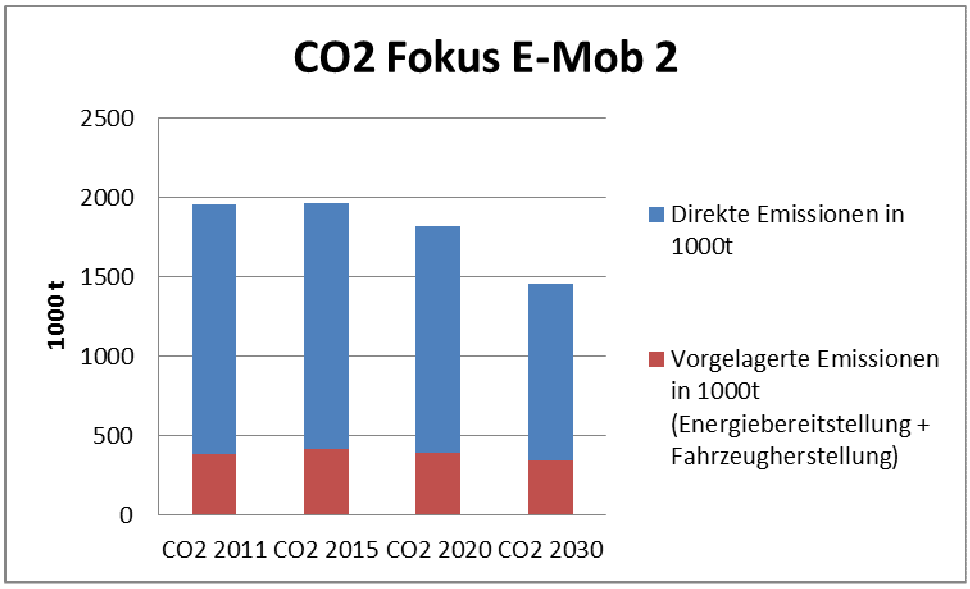


Abbildung 45: Gesamte Emissionen CO2 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ökostrom in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

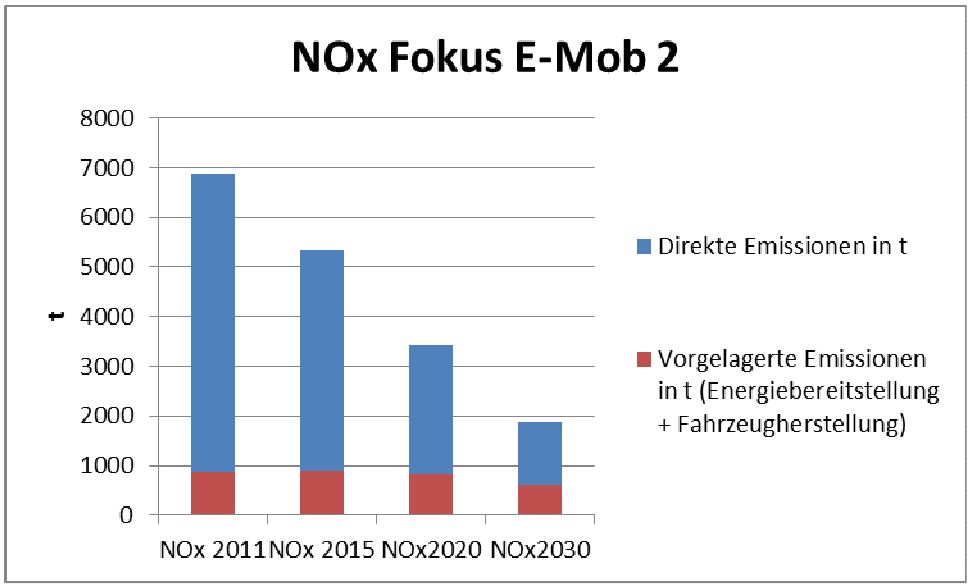


Abbildung 46: Gesamte Emissionen NOx (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ökostrom in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

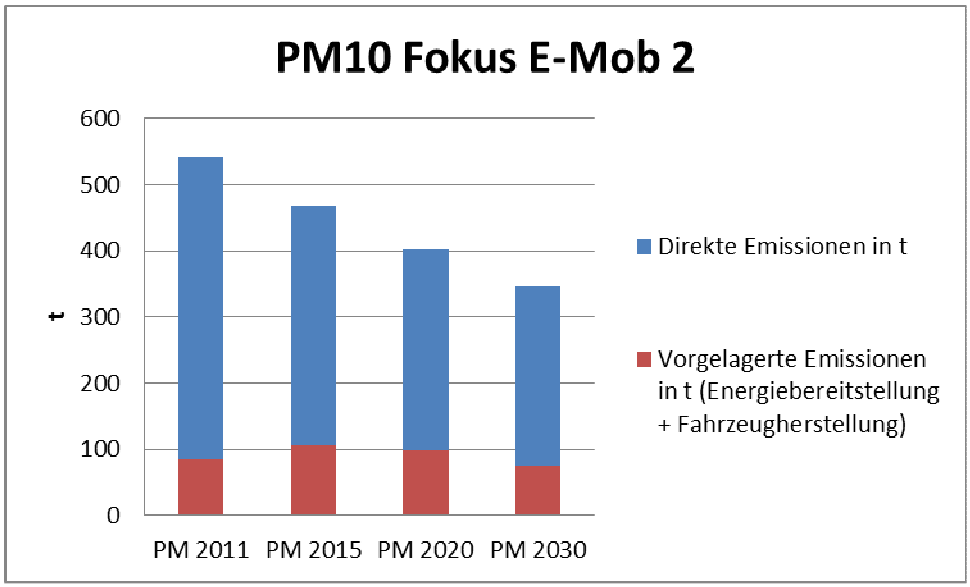


Abbildung 47: Gesamte Emissionen PM10 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ökostrom in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

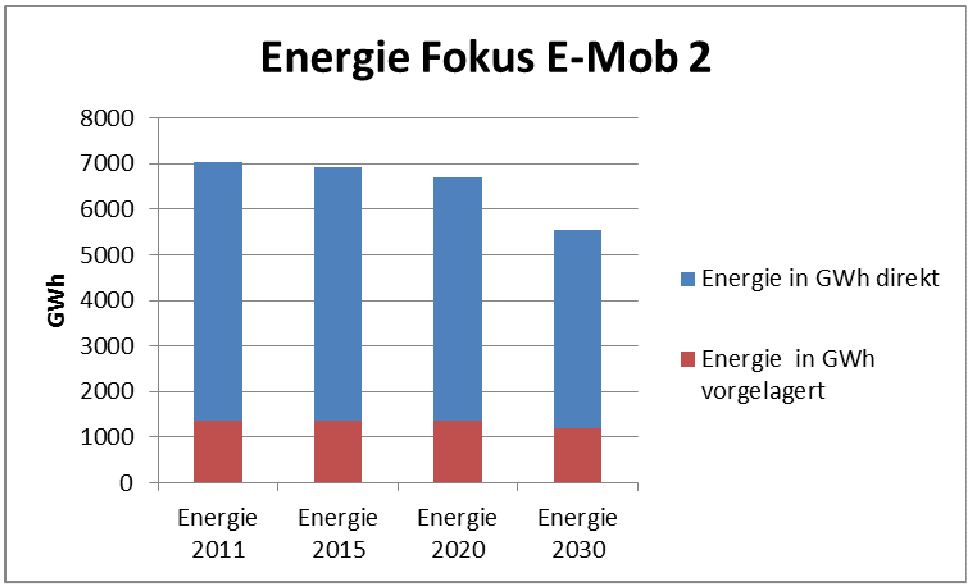


Abbildung 48: Gesamter Energieverbrauch (vorgelagerter und direkter) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ökostrom in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030

7.7.4 Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen

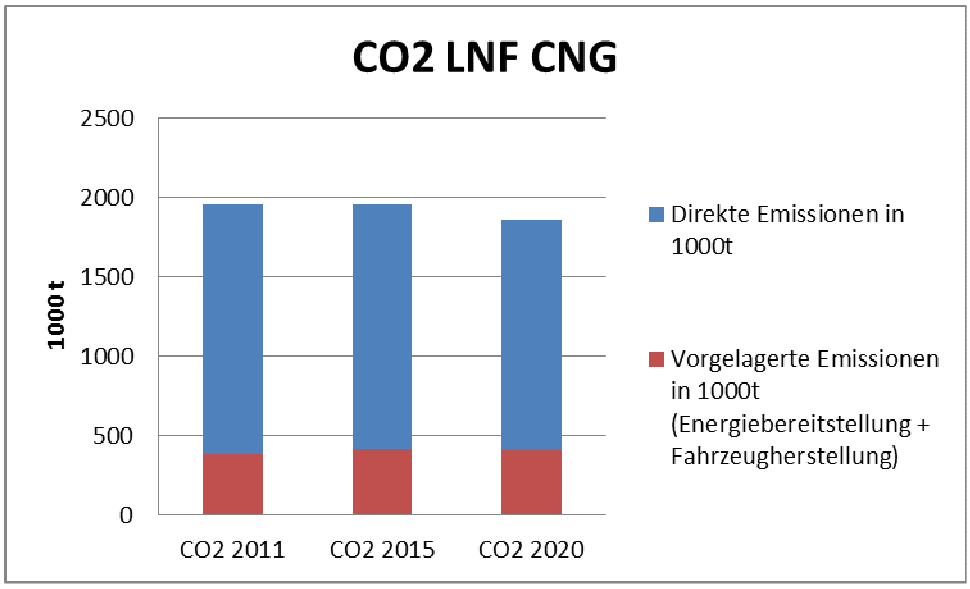


Abbildung 49: Gesamte Emissionen CO2 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen in den Jahren 2011, 2015 und 2020

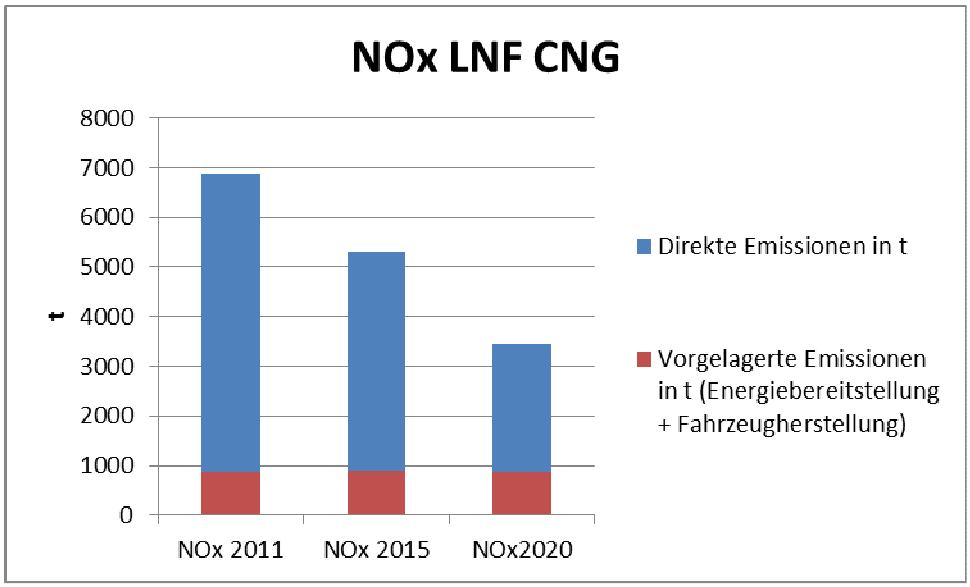


Abbildung 50: Gesamte Emissionen NOx (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen in den Jahren 2011, 2015 und 2020

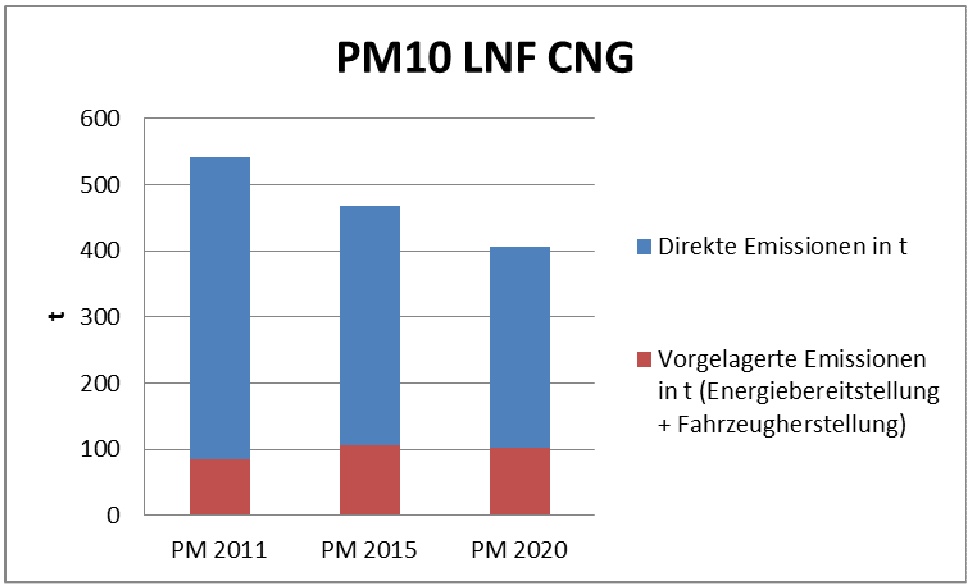


Abbildung 51: Gesamte Emissionen PM10 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen in den Jahren 2011, 2015 und 2020

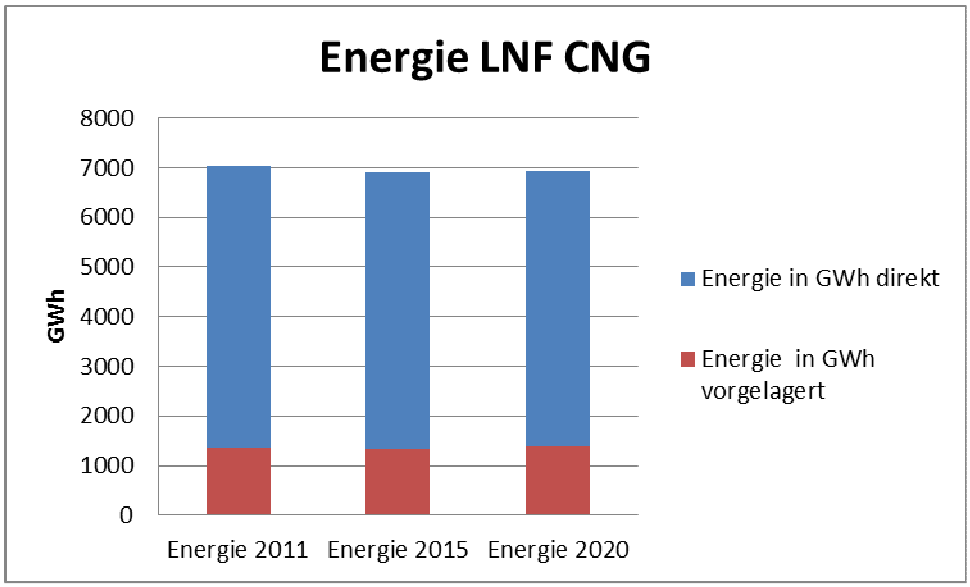
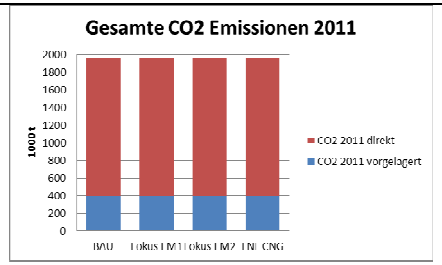
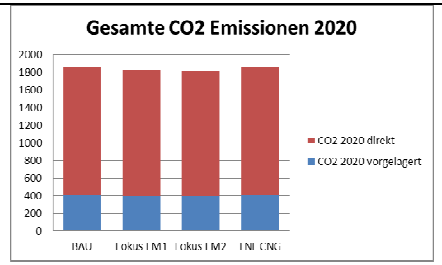
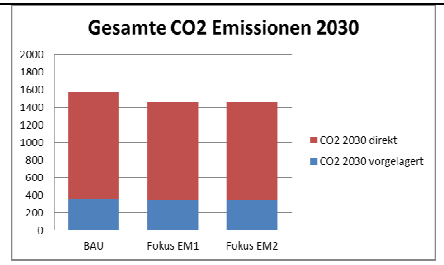
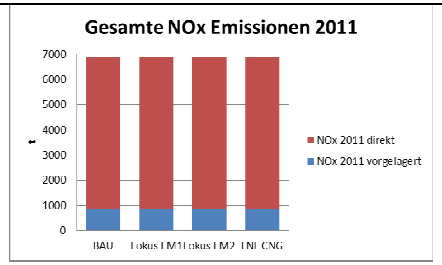
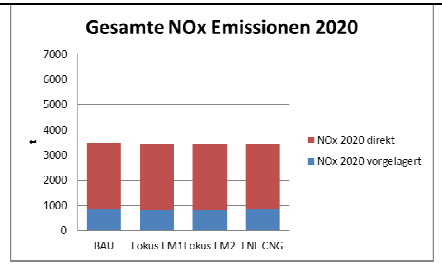
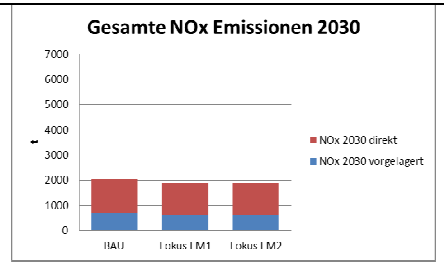
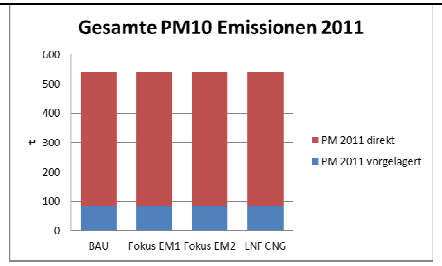
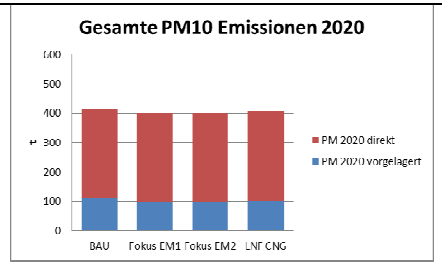
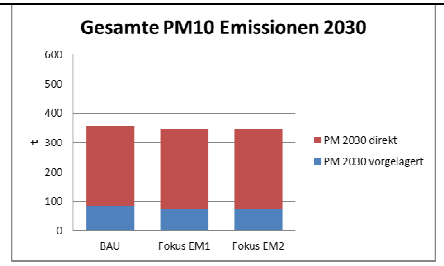
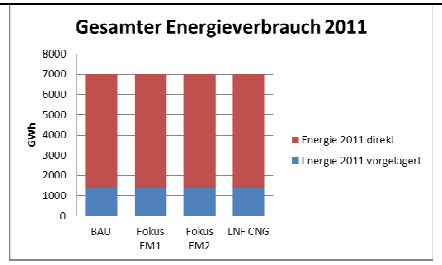
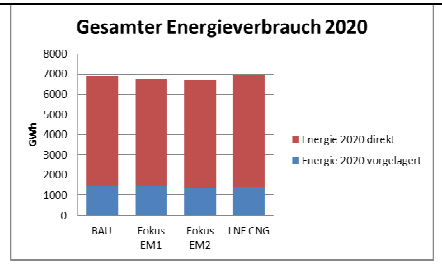
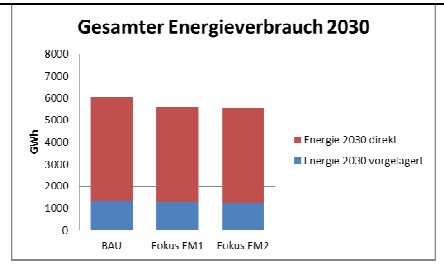


Abbildung 52: Gesamter Energieverbrauch (vorgelagerter und direkter) auf der Straße im Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen in den Jahren 2011, 2015 und 2020

7.7.5 Direkter Vergleich der Szenarien

Tabelle 18: Vergleich BAU mit den Szenarien der Gesamtemissionen für CO2, NOx, PM10 und Energie in den Jahren 2011, 2020 und 2030

	2011	2020	2030
CO2			
NOx			
PM10			
Energie			

8 Ausblick und Empfehlungen

8.1 Verkehrsmodellierung als Grundlage für die nationale, streckenbasierte Energie- und Emissionsmodellierung

- Der Aufbau und die Bereitstellung eines bundesweit einheitlich verfeinerten und auf die Erfordernisse der Berichtspflichten an die Europäische Kommission angepassten Netzgraphen sind für die Zukunft notwendig.
  Es wird als sinnvoll erachtet, diesen Graphen auf die Graphenintegrationsplattform GIP aufzusetzen. Jedoch muss bei der Bedatung der GIP auf die Anforderungen des Verkehrs- und Emissionsmodells eingegangen werden. Dabei kann bspw. auf die Erfahrungen des Landes Tirol aufgebaut werden, wo in die GIP über die Mindeststandards hinaus weitere Parameter bedatet und abgeleitet wurden, um die relevante Informationen für den Verkehrsmodellgraphen zu generieren. So fließen beispielsweise die Kurvigkeit der Strecken und die Streckenlängsneigungen in die Parametrisierung der umlegungsrelevanten Streckenmerkmale wie Geschwindigkeit (v_0) und Kapazität mit ein. Zusätzlich konnte nach Auskunft der Sachbearbeiter ein in beide Richtungen kompatibles System von GIP und Verkehrsmodellnetzgraph erstellt werden, was einen zusätzlichen Nutzen in der Datenweiterverarbeitung mit sich bringen kann.
- Bei der Überarbeitung des Netzgraphen des Verkehrsmodell Österreich muss für die Energie- und Emissionsmodellierung sichergestellt werden, dass eine eindeutige Zuordnung zu den Streckentypen „Innerorts“, „Außerorts“ oder „Autobahn“ möglich ist.
- Verkehrsmodelle müssen immer entsprechend der an sie gestellten Anforderungen entwickelt werden. Diese sind an nationale Modelle andere als an regionale oder städtische Modelle. In kleineren Modellräumen können beispielsweise überregionale Verkehrsströme nicht adäquat abgebildet werden, bei nationalen Modellen müssen zwangsläufig Abstrahierungen (Netzauflösung, Zonierung) vorgenommen werden. Dieses Problem und die dadurch erforderlichen Annahmen sowie der resultierenden Unschärfen können abgemindert werden, wenn in Österreich eine hierarchische Modellstruktur (bspw. Bund-Länder-Städte) aufgebaut wird, die zumindest einen Datenfluss beziehungsweise die Übertragung von Teilergebnissen zwischen den Modellhierarchien zulässt. Dadurch könnte die Modellqualität aller Modellstufen verbessert werden und die Modellergebnisse wären innerhalb der Hierarchien abgestimmt und konsistent.
- Für die Nachfragerechnung ist neben der Bildung und räumlichen Zuordnung von „mobilitäts-verhaltenshomogenen“ Personengruppen die räumliche Abbildung der Quell- und Zielpotentiale nach Wegezwecken erforderlich. Dafür fehlt in Österreich – insbesondere wenn die Zonierung verfeinert wird – eine valide und aktuelle Datenbasis für die Wegezwecke Arbeit, Freizeit und Einkauf.
- In der Studie wurden verschiedene Methoden für die modellmäßige Abbildung des Zellbinnenverkehrs recherchiert und zusammengestellt. Derzeit besteht jedoch keine Datenbasis für die Kalibrierung auf nationaler Ebene, da auf Bundesebene keine Mobilitätsdaten mit erfassten Quell- und Zielorten in der geforderten Auflösung vorliegen. Es wird empfohlen, diese

Informationslücke zu schließen um den Zellbinnenverkehr auch hinsichtlich der Fahrleistung adäquat kalibrieren zu können.

- Längsneigungen wirken sich einerseits stark auf die Verkehrsemissionen aus, andererseits können sie aber auch bei der Bildung von Streckentypen und damit für die Beschreibung des Netzwiderstandes (Geschwindigkeit, Kapazität) verwendet werden. Derzeit liegt keine Datenbasis für ganz Österreich vor, um den Modellstrecken flächendeckend Längsneigungen mit der geforderten Genauigkeit zuzuordnen. Bei der anstehenden Überarbeitung des österreichweiten Netzgraphen sollten also Streckenlängsneigungen attributiert werden.
- Es wird empfohlen, die im Modell abgebildeten Reisezeiten auf den Bezugszeitraum des Modells, also auf einen durchschnittlichen Werktag und nicht auf die Spitzenstunde zu kalibrieren. Das hat die Vorteile, dass die Fahrzeit in der für das Modell konsistenten Systemabgrenzung (Bezugszeitraum des Modells) in die Nachfragerechnung eingeht und dass die Geschwindigkeiten aus dem Verkehrsmodell für die Energie- und Emissionsmodellierung nicht nachträglich umgerechnet werden müssen.
- Bei einer späteren Aktualisierung des nationalen Modells wird man aufgrund der erforderlichen Modellabstrahierungen auf die Implementierung von Abbiegewiderständen verzichten. Somit können für die Emissionsberechnung (NEMO oder HBEFA) bei einer korrekten Kalibrierung der (über den Tag gewichtet gemittelten) Fahrzeiten die Geschwindigkeiten aus dem Umlegungsmodell verwendet werden. Werden Abbiegewiderstände berücksichtigt, wird die in STREET vorgeschlagene Methode für die Berechnung der emissionsmodellierungs-relevanten Geschwindigkeit empfohlen.
- Für eine einheitliche und vergleichbare Modellierung des Energieeinsatzes und der Emissionen des Verkehrs mit dem Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) wird die Entwicklung und Validierung von emissionsmodellierungs-relevanten Streckentypen für die Implementierung in Verkehrsmodelle angeregt. Die Anwendung von NEMO hat gegenüber dem Handbuch jedoch den Vorteil, dass wesentlich umfangreichere Szenarienwirkungen berechnet werden können.
- Unter der Voraussetzung, dass die Reisezeiten im Verkehrsmodell auf den durchschnittlichen Werktag (Bezugszeitraum des Nachfragemodells) und nicht auf die Spitzenstunde kalibriert werden, sind die Ergebnisse des Werktagsmodells für die energie- und emissionsseitigen Wirkungsabschätzungen von Maßnahmen ausreichend genau. Eine stundenfeine Modellierung der Verkehrsmengen ist aus der Sicht der Energie- und Emissionsmodellierung nicht erforderlich.

8.2 Generelle Anforderungen an Verkehrsmodelle für die streckenbasierte Energie- und Emissionsmodellierung

- Eine Voraussetzung für die streckenbasierte Energieeinsatz- und Emissionsmodellierung ist die plausible Abbildung der Geschwindigkeiten im Netz. Diese muss der über den Betrachtungszeitraum und die Belastung gewichteten und gemittelten Geschwindigkeit entsprechen und darf sich nicht auf die Spitzenstunde beziehen. Damit kommt der Wahl der Anfangsgeschwindigkeiten im unbelasteten Netz (v_0) und der Parametrisierung der Kapazitäts-Widerstandsfunktionen (CR-Funktionen) eine zentrale Rolle zu. Erfahrungsgemäß müssen die Straßen der unterschiedlichen Hierarchien und Funktionen (Bündel von Streckentypen des Verkehrsmodellgraphen) verschieden parametrisiert werden, um einerseits eine plausible

Routenwahl und andererseits realitätsnahe Geschwindigkeiten über den Betrachtungszeitraum modellieren zu können.

- Die Entwicklung des Verkehrsmodellnetzgraphen auf Basis der GIP erscheint sinnvoll, sofern die GIP in der erforderlichen Qualität vorliegt beziehungsweise bedatet wird. Es wird empfohlen, die Qualitätsanforderungen des Verkehrsmodells in Abstimmung mit der Bedatung der GIP zu definieren und gegenüber dem Mindeststandard gegebenenfalls zusätzliche Attribute in die GIP aufzunehmen. Bei der Erarbeitung eines Verkehrsmodellgraphen aus der GIP sollte auf folgende Punkte geachtet werden:
    - Der Graph der GIP ist sehr fein aufgelöst, die Detaillierung des Verkehrsmodellgraphen hängt jedoch von der Körnigkeit und Definition der Zonierung des Verkehrsmodells ab, weshalb der GIP-Graph für die direkte Verwendung im Verkehrsmodell in der Regel zu fein ist und bei der Verkehrsumlegung zu unplausiblen Streckenbelastungen führen würde. Es wird empfohlen, aus der GIP einen für das Verkehrsmodell relevanten Graphen zu definieren und nur diesen in das Verkehrsmodell zu übernehmen.
    - Dieser Verkehrsmodell-Graph muss in sich geschlossen sein; dh, alle relevanten Strecken und Abbiegemöglichkeiten enthalten.
    - Es wird empfohlen, zwischen Analyse- und Gesamtnetz zu unterscheiden. Für das Analysenetz müssen die verkehrlichen Auswirkungen mit der geforderten Qualität modelliert werden, das Gesamtnetz ist feiner und gewährleistet in Kombination mit der Körnigkeit der Zonierung die Anforderungen an das Analysenetz.
    - Alle aus der GIP abgeleiteten umlegungsrelevanten Strecken- und Knoteneigenschaften, wie erlaubte Verkehrsmittel, Geschwindigkeiten und Kapazitäten, müssen geprüft sein. In der GIP müssen bei der Datenpflege entsprechende Qualitätssicherungsmechanismen eingehalten werden, um bei Updates der Netzdaten die Qualität des Netzes halten zu können.
    - Es wird empfohlen, bei der Bildung der Verkehrsmodellstreckentypen alle verfügbaren Informationen aus der GIP mit einzubeziehen. Das sind jedenfalls die Straßenhierarchie, die erlaubte Höchstgeschwindigkeit je Verkehrsmittel, die Kurvigkeit und die Streckenlängsneigung, wenn vorhanden auch die Straßenbreite.
    - Die Kurvigkeit kann aus der Geometrie des Graphen berechnet werden. Die Streckenlängsneigungen können durch Verschneiden des Graphen mit einem digitalen Geländemodell ermittelt werden. Es ist zu beachten, dass beim Verschneiden durch Kunstbauten, die im Geländemodell nicht enthalten sind, und durch die Abstrahierungen in Folge der Rastergrößen des Höhenmodells sowie der Längen der Streckensegmente relevante Fehler auftreten können. Die durch Verschneiden ermittelten Längsneigungen müssen jedenfalls geprüft werden.

      Um hier eine höhere Genauigkeit zu erreichen, könnten stark und insbesondere unsymmetrisch belastete Straßenabschnitte mittelfristig im Höhenprofil vermessen werden und die Daten in die GIP bzw. den Verkehrsmodellgraphen übernommen werden.
    - Im Gegensatz zu GIS-Anwendungen müssen bei Verkehrsmodellgraphen Strecken gebrochen werden, sobald sich die Straßencharakteristik ändert. In Abstimmung mit den Verkehrsmodellbetreibern/-entwicklern sollten vor der Entwicklung des Verkehrsmodellgraphen alle hierfür relevanten Parameter definiert werden. In Hinblick auf die Verkehrs- und Emissionsmodellierung sind das mit dem derzeitigen Kenntnisstand jedenfalls die Straßenhierarchie, die verordnete Höchstgeschwindigkeit, die erlaubten

Verkehrsmittel, Brüche in der Längsneigung und/oder der Kurvigkeit, Änderungen in den Breiten und Kapazitäten, sowie die Lage (Innerorts, Ausserorts oder Autobahn) der Strecken.

- Die Entscheidung, ob in Verkehrsmodellen Kreuzungswiderstände abgebildet werden oder nicht, hängt davon ab, welche „verkehrsrelevanten" Anforderungen an das Modell gestellt werden bzw. welche verkehrsrelevanten Maßnahmenwirkungen vom Modell abgebildet werden müssen. Werden jedoch im Verkehrsmodell Kreuzungsverlustzeiten abgebildet, muss sich die Kalibrierung auf den Bezugszeitraum des Modells (Werktag) beziehen und die Knotenverlustzeiten müssen bei der Energie- und Emissionsmodellierung berücksichtigt werden.
- Bei der in VISUM implementierten Funktion zur Emissionsmodellierung mit dem Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) bleiben die Knotenwiderstände unberücksichtigt. Die Emissionsfaktoren des HBEFA beziehen sich jedoch auf charakteristische Fahrmuster (Geschwindigkeit, Beschleunigen, Anhalten, etc.) von Straßenzügen mit der Abfolge von Straßenabschnitten und Kreuzungen. Somit müssen bei Netzmodellen, bei denen Knotenwiderstände in die Widerstandsberechnung für die Routensuche und -auswahl berücksichtigt werden, die Knotenverlustzeiten auf die Streckfahrzeiten aufgeschlagen werden und dadurch eine emissionsmodellierungs-relevante Streckengeschwindigkeit ermittelt werden. Dafür wird die Verwendung der in STREET 2030 erarbeitete Methode empfohlen. Methodisch nicht korrekt ist der Ansatz, die Streckenfahrzeit aus der Umlegung mit unveränderter modellierter Geschwindigkeit (aus der Umlegung) um das Äquivalent der Knotenverlustzeit „fiktiv" zu verlängern.
- Der Zellbinnenverkehr und der Verkehr auf den Anbindungen beträgt erfahrungsgemäß und in Abhängigkeit der Modellabstrahierung etwa 8 % bis 15 % der Fahrleistung (Fahrzeugkilometer) am Streckennetz. Somit ist bei der Modellkalibrierung auf eine plausible Abbildung der Zellbinnendistanzen je Verkehrsmittel zu achten.
- Unter der Voraussetzung, dass die Reisezeiten im Verkehrsmodell auf den durchschnittlichen Werktag (Bezugszeitraum des Nachfragemodells) und nicht auf die Spitzenstunde kalibriert sind, ist für die Energie- und Emissionsmodellierung bei strategischen Verkehrsmodellen und der Berechnung von Maßnahmenwirkungen auf regionaler Ebene eine stundenfeine Abbildung der Verkehrsmengen nicht erforderlich. Für eine detailliertere Modellierung von Auswirkungen auf regionaler Ebene wird die Kombination von Modellen auf Mikro-Ebene – beispielsweise VISSIM und PHEM – empfohlen.

8.3 Implementierung eines Inventurmodus

Im Rahmen von STREET 2030 wurde NEMO wie vorgesehen für die Verwendung in Emissionsinventuren erweitert. Derzeit erfolgt die jährliche Erstellung der österreichischen Luftschadstoffinventur („OLI") mit dem Programm GLOBEMI. Das Emissionsinventurmodell GLOBEMI wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU-Graz zur automatisierten Bilanzierung von Verbrauchs-, Emissions- und Verkehrsdaten in größeren Gebieten entwickelt und ist in (Hausberger, 1997) im Detail beschrieben.

Zur Abbildung der aktuellen Entwicklungen hinsichtlich alternativer Antriebe und Kraftstoffe müsste das Programm GLOBEMI methodisch sehr aufwändig adaptiert werden und wird daher voraussichtlich ab

OLI2014 (1990 – 2013) nicht mehr für die OLI verwendet. Ab dann ist geplant die OLI mit NEMO zu erstellen wobei alle notwendigen Funktionen von GLOBEMI beibehalten werden sowie weitere Verbesserungen hinzukommen sollen. Zusätzlich bietet NEMO das Potenzial die Ergebnisse der OLI zu regionalisieren (bei Vorhandensein von entsprechenden Eingabedaten).
Für diese Inventurberechnung wurde in NEMO ein eigener Berechnungsmodus implementiert. Dieser umfasst folgende inventur-spezifische Funktionalitäten:

- Aufbereiten von zusätzlichen OLI-spezifischen Eingabedaten (z.B. Statistiken zu Besetzungs- und Beladungsgraden)
- Umlegung der OLI-spezifischen Verkehrsleistungen auf das simulierte Streckennetz
- Rechnen von Zeitreihen (d.h. es werden durchgehend alle Jahre einer Zeitreihe von 1990 bis 2030 gerechnet und die Summenergebnisse für die einzelnen Jahre in einer Zeitreihe exportiert)
- Ausgabe in OLI-spezifischen Ergebnisformaten

Um NEMO für die Österreichische Luftschadstoffinventur optimal nutzen zu können, ist ein streckenaufgelöstes Verkehrsmodell auf Bundesländerniveau für ganz Österreich notwendig. So ein bundesländerscharfes Verkehrsmodell für ganz Österreich war ein Ziel von STREET 2030, dass im Rahmen dieses Projekts nicht erfüllt werden konnte. Eine zusätzliche Notwendigkeit für die Verwendung von räumlich disaggregierten Verkehrsdaten in der OLI wäre die Verfügbarkeit eines Verfahrens zur Skalierung der Verkehrsmengen am Netz aus einer Basisumlegung anhand von neuen Zähldaten bzw. neuen Prognosen. Die Berechnung der Belastungen am Netz rein über das Verkehrsmodell für alle in der OLI geforderten Berechnungsjahre sowie allen in nachfolgenden Studien berechneten Szenarien wäre nicht praktikabel.

Solange diese Grundlagen nicht verfügbar sind ist geplant bei der Erstellung der OLI mit NEMO als Grundlage für die Emissionsberechnung die Verteilung nach Verkehrssituationen (d.h. nach Streckentypen, Tempolimits, Fahrbahnlängsneigungen, Verkehrsstärken) aus dem HBEFA zu verwenden. Damit ist allerdings keine räumliche Auflösung der Ergebnisse möglich. Weiters ist zu beachten, dass die aktuell im HBEFA für Österreich hinterlegten Werte hinsichtlich der durchschnittlich auftretenden Verkehrssituationen auf Daten für Schweizer Verhältnisse basieren und nur geringfügig adaptiert wurden.

9 Literaturverzeichnis

BMVIT (Hrg. 2009): Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Abt. V / INFRA 5 Internationale Netze und GVP-Ö: Verkehrsprognose Österreich 2025+, Endbericht

BMWFJ & BMLFUW (2010): Energiestrategie Österreich. Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend. 20.03.2010. http://www.energiestrategie.at/

BMWV (Hrg. 1998): Bundesministerium für Wirtschaft und Verkehr: Österreichischer Bundesverkehrswegeplan – A3-H/2

Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2006): Erstellung des nationalen Personenverkehrsmodells für den öffentlichen und privaten Verkehr - Modellbeschreibung

Dippold M. (2014): Simulation von Energieverbrauch und Emissionen auf Verkehrsnetzwerken. Dissertation, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz, dzt. in Arbeit (2014).

Dippold M., Rexeis M., Hausberger S. (2012): NEMO – A Universal and Flexible Model for Assessment of Emissions on Road Networks. 19th International Conference „Transport and Air Pollution“, 26. – 27.11.2012, Thessaloniki

Düring I. et al. (2004): Berechnung der Kfz-bedingten Feinstaubemissionen infolge Aufwirbelung und Abrieb für den Emissionskataster Sachsen. Endbericht, November 2004

Fellendorf, Neuhold, Cik (2011): Typisierung von Verkehrsbelastungsganglinien und die Anwendung in der Emissionsberechnung, Paper zur HEREKA 2011 in Stuttgart, Graz

Friedrich, Galster (2007): Anbindungszeiten in Verkehrsnetzen, Bundesanstalt für Straßenwesen, Gergisch-Gladbach

Geivanidis S., Samaras Z. (2004): Investigation of emissions degradation of gasoline vehicles, Report No: 0415, Thessaloniki 2004

Georgakaki A., Sorenson S. (2004): Report on Collected Data and Resulting Methodology for Inland Shipping. Final report for ARTEMIS Workpackage 900 Emission Estimating Methodology for Ship Transport, April 2004. ISBN 87–7475–314–2

Hausberger S. (1997): Globale Modellbildung für Emissions- und Verbrauchsszenarien im Verkehrs-sektor (Global Modelling of Scenarios Concerning Emission and Fuel Consumption in the Transport Sector); Dissertation am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodyna-mik der TU-Graz; Graz, 1997

Hausberger S., Rexeis M., Luz R. (2012): New Emission Factors for EURO 5 & 6 Vehicles, 19th International Conference „Transport and Air Pollution“, 26. – 27.11.2012, Thessaloniki

Heldstab J, Kljun N. (2007): PM10-EMISSIONEN VERKEHR Teil Schienenverkehr. Schlussbericht INFRAS Bern, 10. Januar 2007

Holzapfel P. , Riedel R. (2013): Dokumentation zum und Daten des Verkehrsmodell Wien, MA 18 – Stadtentwicklung und Stadtplanung Wien

Luz R., Hausberger S. (2013): User Guide for the Model PHEM, Version 11.2; Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics TU Graz, Graz, 2013

Knörr W., Borken J. (2003): Erarbeitung von Basisemissionsdaten des dieselbetriebenen Schienenverkehrs unter Einbeziehung möglicher Schadstoffminderungstechnologien, Weiterführung und Auswertung des UBA-FuE-Vorhabens 29943111, Heidelberg, Dezember 2003

Kriebernegg G., Rexeis M, Schiller C. (2010): Raumnutzungsoptimierung durch Emissionsminimierung, Endbericht des Projektes „ROdEM“ finanziert im Rahmen der 2. Ausschreibung der Programmlinie ways2go des Forschungs- und Technologieprogramms iv2splus. Graz, 30.9.2010

Krutzler T. et al. (2013): Energiewirtschaftliche Inputdaten und Szenarien. Grundlage für den Monitoring Mechanism 2013 und das Klimaschutzgesetz Synthesebericht 2013. Reports, Band 0415, ISBN: 978-3-99004-219-9, 110 S.; Wien, 2013

Kühlwein J., Luz R., Hausberger S. (2012): Measurements and simulation of a battery electric passenger car, Report by order of the Environment Agency Austria, Report Nr. FVT-86/2012/Kw Em 21/2011 - 6790, 21.12.2012

Mellios G., Ntziachristos L. (2009): 1.A.3.b.v Gasoline evaporation, EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009

Mock, P.; German, J.; Bandivadekar, A.; Riemersma, I.; Ligterink, N.; Lambrecht, U.(2013): From laboratory to road. Published 27.5.2013. http://theicct.org/laboratory-road

Neuhold (2012): Makroskopische Emissionsmodellierung mit HBEFA in VISUM – Erfahrungen aus Graz, Fachvortrag und Diskussion im Rahmen des PTV-Anwenderseminars in Salzburg

Obermayer C., Pfeiler D., Molitor R. (2011): TRAFICEM - Eine Applikation fuer die Nachfragerechnung im Personenverkehr, die Steuerung des Vierstufenalgorithmus und als Tool fuer das Datenmanagement; ÖVZ 4/2011

Ortúzar, Willumsen (2006): Modelling Transport, Third Edition, Wiley

PTV-AG (2010): VISUM 11.5 – Benutzerhandbuch, Karlsruhe

PTV-AG (2010): VISUM 11.5 – Grundlagen, Karlsruhe

Rexeis, M., Hausberger, S. (2008): Trend of vehicle emission levels until 2020 – Prognosis based on current vehicle measurements and future emission legislation, Atmospheric Environment (2008), doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.034

Schnabel, Lohse (1997): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2, Berlin

Schwingshackl M., Hausberger S. (2012): Straßenverkehrsemissionen und Emissionen sonstiger mobiler Quellen Österreichs für die Jahre 1990 bis 2011; Erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes GmbH; Graz; Bericht Nr. FVT-78/12/ Haus Em 09/12-6790 vom 14.12.2012

Schwingshackl M., Hausberger S. (2013): Monitoring Mechanism 2013 – Verkehr; Erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds; Bericht Nr. Inst-01/13/ SchwiEm 03/12-679 vom 31.01.2013; Graz University of Technology

Steininger K. Kulmer V., Seebauer S., Schwingshackl M., Hausberger S. (2013): Supporting technological and market success for low-carbon vehicle propulsion, Endbericht, Austrian Climate Research Programme, 3rd call, Graz, 02.09.2013

Via Donau (2012): Donauschifffahrt in Österreich – Jahresbericht 2012. http://www.donauschifffahrt.info/fileadmin/group_upload/6/Broschueren/Jahresberichte/via_jb12_de.pdf

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modellstruktur TRAFICEM 12

Abbildung 2: Zonierung des oberösterreichischen Zentralraums im VM-OÖ und im VM-STREET ..17

Abbildung 3: Skizze zur Berechnung der „emissionsmodellierungs-relevanten“ Geschwindigkeit der Strecke 1,2 28

Abbildung 4: Belastungs- und Geschwindigkeitsganglinie für Pkw der Zählstelle 913.3 in der Erzherzog-Karl-Straße in Fahrtrichtung stadtauswärts 33

Abbildung 5: Schema zur Berechnung der Höhenkoten 36

Abbildung 6: Beispiel 1 für eine fehlerhafte Übertragung von Höhendaten auf ein räumliches Liniennetzwerk 36

Abbildung 7: Beispiel 2 für eine fehlerhafte Übertragung von Höhendaten auf ein räumliches Liniennetzwerk 37

Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Modellstruktur von NEMO-Road 41

Abbildung 9: Vergleich NOx-Emissionsniveau von Diesel-PKW unterschiedlicher Abgasstandards (NEDC = Typprüfzyklus, CADC = realer Fahrzyklus) 42

Abbildung 10: RECEM Oberfläche 50

Abbildung 11: Vergleich von berechnetem und gemessenem elektrischen Energieverbrauch für einen Intercity Personenzug 52

Abbildung 12: Schematische Darstellung einer Prozesskette nach GEMIS 58

Abbildung 13: Betrachtete Prozesskette für ein Kraftfahrzeug 59

Abbildung 14: Straßennetz Wien 75

Abbildung 15: Durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV) in Kfz/d im Jahr 2011 in Wien 76

Abbildung 16: Energieverbrauch in kWh/k*h der Straßenbahnen in Wien im Jahr 2011 78

Abbildung 17: Energieverbrauch in kWh/k*h der U-Bahnen in Wien im Jahr 2011 79

Abbildung 18: Energieverbrauch in kWh/k*h Züge in Wien im Jahr 2011 80

Abbildung 19: CO2 - Vergleich der Szenarien für alle Jahre und Fahrzeugkategorien 81

Abbildung 20: NOx - Vergleich der Szenarien für alle Jahre und Fahrzeugkategorien 82

Abbildung 21: PM10 aus dem Verbrennungsvorgang - Vergleich der Szenarien für alle Jahre und Fahrzeugkategorien 83

Abbildung 22: CO2 Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2011 85

Abbildung 23: NOx Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2011 86

Abbildung 24: PM10 Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2010 87

Abbildung 25: PM10 Emissionen aus dem Verbrennungsvorgang in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2011 89

Abbildung 26: PM10 Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2011 90

Abbildung 27: NOx Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2011 91

Abbildung 28: NOx Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2015 92

Abbildung 29: NOx Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2020 93

Abbildung 30: NOx Emissionen in kg/km*h des Straßenverkehrs in Wien im Jahr 2030 94

Abbildung 31: Vorgelagerte CO_2-Äquivalent-Emissionen in 1.000 t im BAU, für das Szenario Elektromobilität (EM) (EM1 mit Strompark Österreich, EM 2 mit Ökostrom) und für das Szenario CNG in LNF 95

Abbildung 32: Vorgelagerte NO_x-Emissionen in t im BAU-Szenario, für das Szenario Elektromobilität (EM) (EM1 mit Strompark Österreich, EM 2 mit Ökostrom) und für das Szenario CNG in LNF....96

Abbildung 33: Vorgelagerte PM10-Emissionen in t im BAU-Szenario, für das Szenario Elektromobilität (EM) (EM1 mit Strompark Österreich, EM 2 mit Ökostrom) und für das Szenario CNG in LNF....97

Abbildung 34: Vorgelagerter Energieverbrauch in GWh im BAU-Szenario, für das Szenario Elektromobilität (EM) (EM1 mit Strompark Österreich, EM 2 mit Ökostrom) und für das Szenario CNG in LNF 98

Abbildung 35: Gesamte Emissionen CO2 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im BAU in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030 99

Abbildung 36: Gesamte Emissionen NOx (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im BAU in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030 99

Abbildung 37: Gesamte Emissionen PM10 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im BAU in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030....100

Abbildung 38: Gesamter Energieverbrauch (vorgelagerter und direkter) auf der Straße im BAU in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030....100

Abbildung 39: Gesamte Emissionen sowie Energieverbrauch (vorgelagerte und direkte) auf der Schiene im BAU im Jahr 2011....101

Abbildung 40: Gesamte Emissionen sowie Energieverbrauch (vorgelagerte und direkte) auf der Donau im BAU im Jahr 2011 102

Abbildung 41: Gesamte Emissionen CO2 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ö-Strom-Mix in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030 102

Abbildung 42: Gesamte Emissionen NOx (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ö-Strom-Mix in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030 103

Abbildung 43: Gesamte Emissionen PM10 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ö-Strom-Mix in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030 103

Abbildung 44: Gesamter Energieverbrauch (vorgelagerter und direkter) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ö-Strom-Mix in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030 104

Abbildung 45: Gesamte Emissionen CO2 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ökostrom in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030 104

Abbildung 46: Gesamte Emissionen NOx (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ökostrom in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030 105

Abbildung 47: Gesamte Emissionen PM10 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ökostrom in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030 105

Abbildung 48: Gesamter Energieverbrauch (vorgelagerter und direkter) auf der Straße im Szenario Forcierung E-Mobilität mit Ökostrom in den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2030 106

Abbildung 49: Gesamte Emissionen CO2 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen in den Jahren 2011, 2015 und 2020.....106

Abbildung 50: Gesamte Emissionen NOx (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen in den Jahren 2011, 2015 und 2020.....107

Abbildung 51: Gesamte Emissionen PM10 (vorgelagerte und direkte) auf der Straße im Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen in den Jahren 2011, 2015 und 2020.....107

Abbildung 52: Gesamter Energieverbrauch (vorgelagerter und direkter) auf der Straße im Szenario Forcierung CNG bei Leichten Nutzfahrzeugen in den Jahren 2011, 2015 und 2020.....108

Abbildung 53: Übersicht der Energiebereitstellung von ICE, E-Motor und Brennstoffzelle (Leopold, 2009).....123

Abbildung 54: Kombinationsmöglichkeiten von Verbrennungsmotor und Elektromotor (IFEU, 2009) .124

Abbildung 55: Momentenverlauf von Verbrennungskraftmotor und Elektromotor (Wallentowitz, 1999) 125

Abbildung 56: Aufbau eines parallelen Hybridfahrzeuges (Back, 2005).....127

Abbildung 57: Beispielhafte Strukturvarianten von Hybridfahrzeugen (Back, 2005) 127

Abbildung 58: Drehmomentenverlauf von Elektromotor und Verbrennungsmotor (Göschel, 2004).....128

Abbildung 59: Übersicht der Hybridisierungsstufen und ihre Funktionen (Küçükay, 2008) 128

Abbildung 60: Verschiedene Plug-In-Hybrid Konzepte und deren Eigenschaften (Mohrdieck, 2007)....130

Abbildung 61: Entwicklung Stückzahlen FCEV Fahrzeuge bis 2008 (links nach Type, rechts nach Regon (Mock, 2010) 132

Abbildung 62: Übersicht über mögliche Energiespeicher.....139

Abbildung 63: Heizwerte und Gemischheizwerte bei Lamda=1 für verschiedene Brennstoffe (Eichelseder, 2005).....140

Abbildung 64: Ragone-like plot: Spezifische Leistungen und spezifische Energien von verschiedenen Energiespeichersystemen (Köhler, 2007).....142

Abbildung 65: Ragone-Diagramm mit typischen Entladezeiten von elektrischen Energiespeichern (Böcker, 2007) 143

Abbildung 66: Strom aus erneuerbaren Energien in Österreich – Potentiale und Nutzung (Fechner, 2007) 144

Abbildung 67: Strom aus erneuerbaren Quellen (Beermann M., G. Jungmeier et al 2010).....145

Abbildung 68: Überblick Einzelmaßnahmen mit Kosten für mittlere Otto- und Dieselfahrzeuge (Mock, 2010).....146

Abbildung 69: Li-Ion Batterie Kosten auf Zellniveau (rechts) und Batterie Pack Level (links) 149

Abbildung 70: Entwicklung der Batterie Produktionskosten einer Li-Ion Batterie-Energie 150

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich des Disaggregationsniveaus in den 3 Netzmodellen VMÖ, VM-OÖ und VM-STREET des oberösterreichischen Zentralraums 17

Tabelle 2: Methodische Ansätze nach Neuhold (2012) 26

Tabelle 3: Verwendete Anpassungsfaktoren je Streckenklasse 34

Tabelle 4: Streckentypen im Schienengebundenen Verkehr 37

Tabelle 5: Antriebsarten im schienengebundenen Verkehr 38

Tabelle 6: Angebotsformen im schienengebundenen Verkehr und Zuweisung der Verkehrssysteme aus dem Netzmodell 38

Tabelle 7: Anteile elektrisches Fahren im Betrieb von PHEV Fahrzeugen 47

Tabelle 8: Zugtypen in NEMO-Rail 53

Tabelle 9: Streckentypen in NEMO-Rail 53

Tabelle 10: Haltestellenabstande nach Zug- und Streckentypen (Werte in Kilometer) 54

Tabelle 11: Schiffstypen in NEMO-Ship für die Donauschifffahrt 56

Tabelle 12: Treibstoffproduktion und Energiebereitstellung - vorgelagerte Emissionen (Quelle: eigene Berechnungen). 61

Tabelle 13: Fahrzeugherstellung pro Fahrzeugkilometer im Straßenverkehr- vorgelagerte Emissionen (Quelle: eigene Berechnungen). 62

Tabelle 14: Fahrzeugherstellung pro Personenkilometer im Schienenverkehr - vorgelagerte Emissionen (Quelle: eigene Berechnungen). 62

Tabelle 15: Fahrzeugherstellung pro Tonnenkilometer im Schiffsverkehr - vorgelagerte Emissionen (Quelle: eigene Berechnungen). 62

Tabelle 16: Quelle der Modelldaten für den Plannullfall 64

Tabelle 17: Quellen der wichtigsten Strukturmerkmale 65

Tabelle 18: Vergleich BAU mit den Szenarien der Gesamtemissionen für CO2, NOx, PM10 und Energie in den Jahren 2011, 2020 und 2030 109

Tabelle 19: Neuzulassungsanteile alternativer Antriebe Szenario „Business As Usual“ 153

Tabelle 20: Neuzulassungsanteile alternativer Antriebe Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ 155

12 Projektkonsortium

13 Anhang

13.1 Technologische Entwicklung (AP3)

13.1.1 Einleitung

Dieser Anhang soll Informationen über die Zukunft der technologischen Entwicklungen hinsichtlich Antriebe und Treibstoffe bis 2030 mittels einer Literaturrecherche, Einschätzung von Experten und verfügbaren Modellen beschreiben. Im speziellen werden folgende Trends behandelt:

- Energieverbrauch und Effizienz
- Emissionen
- Kosten
- Bewertung der Durchführbarkeit
- andere Vorteile für Konsumenten

Ein zentraler Punkt der Arbeiten in STREET2030 war die Erweiterung des Berechnungsmodells für Energieverbrauch und Emissionen um nicht konventionelle (d.h. nicht rein auf einem Verbrennungsmotor basierende) Antriebskonzepte. An dieser Stelle werden die für AP3 (Technological development – vehicle and fuel technology) recherchierten Rahmenbedingungen hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen bei Antriebssystemen zusammengefasst.

13.1.2 Technologische Antriebsentwicklungen

Rein technisch gibt es folgende alternativen Antriebe: Elektro-, Solar-, Hybrid-, Holzvergaser-, Luft-, Brennstoffzellen-, Dampf- und Wasserstoffantrieb die durch deren alternative „Treibstoffe“ wie Strom, Biomasse, Luft, Dampf und Wasserstoff erst möglich werden (Schwingshackl, 2009). Eine sich auf die Elektrifizierung beziehende Übersicht bietet Abbildung 53. Holzvergaser-, Luft- sowie Dampfantriebe scheiden aufgrund ihrer Nachteile gegenüber teil- oder vollelektrisierten Antrieben bzw. Brennstoffzellen für zukünftige Anwendungen aus heutiger Sicht aus und werden nicht weiter behandelt.

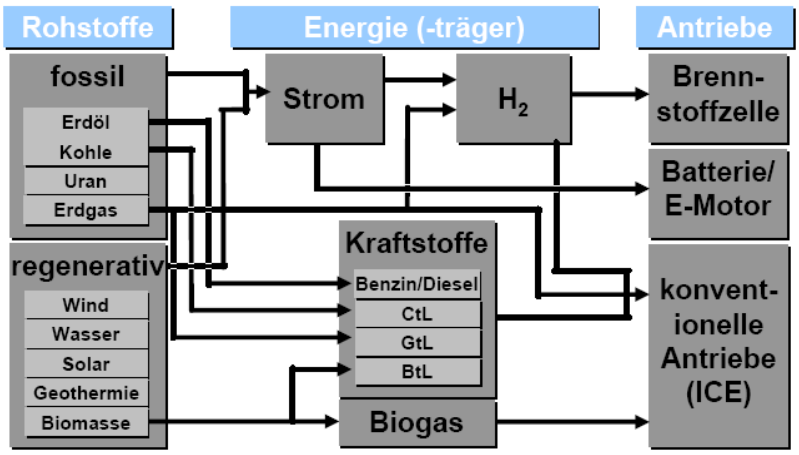


Abbildung 53: Übersicht der Energiebereitstellung von ICE, E-Motor und Brennstoffzelle (Leopold, 2009)

Während dem Elektrofahrzeug eher langfristig das Potenzial zu einer Systemänderung und damit einer deutlichen Verbesserung der Emissionen und des Energieverbrauchs im Mobilitätsbereich zugetraut wird, gelten vor allem Plug-In-Hybrid und Hybridantriebe als Technologie, mit denen schon kurz- bis mittelfristig eine signifikante Verbrauchsreduktion realisierbar ist. Die Kombinationsmöglichkeiten von Verbrennungsmotor und Elektromotor sind vielfältig (Abbildung 54).

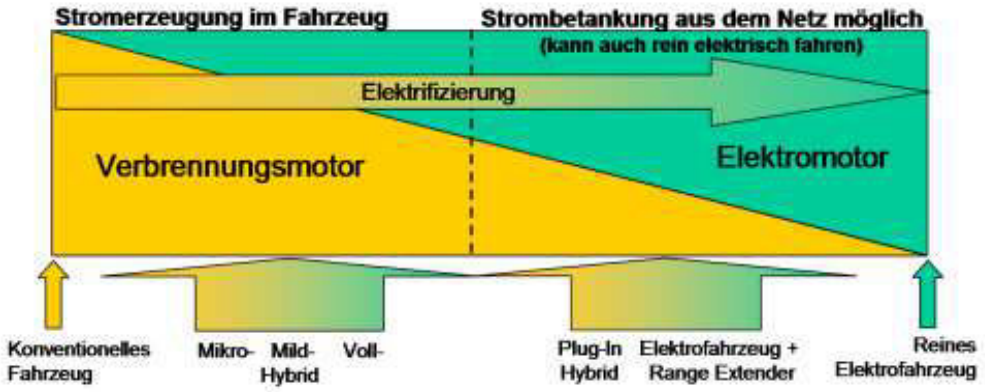


Abbildung 54: Kombinationsmöglichkeiten von Verbrennungsmotor und Elektromotor (IFEU, 2009)

Die Anforderung an die Fahrzeugsteuerung steigt mit der Elektrifizierung. Neue Komponenten wie Elektromotoren, Batterien, Leistungsumrichter, Spannungswandler sowie weitere elektrifizierte Bauteile (Bremse, Lenkung, Klimakompressor, Getriebeaktuatoren, etc.) kommen zum Einsatz und müssen langfristig auch mit den Simulations-Modellen abgestimmt werden.

Folgende Antriebstechnologien wurden als relevant für die derzeit absehbare Entwicklung der Fahrzeugflotte angesehen und in NEMO integriert:

13.1.3 Hybridfahrzeuge (HEV, Hybrid Electric Vehicles)

Das Wort "Hybrid" kommt ursprünglich aus dem Griechischen und bedeutet "gemischt, von zweierlei Herkunft". Ein Hybridfahrzeug ist demzufolge per Definition ein Fahrzeug mit zweierlei Energiearten beziehungsweise Antrieben. Die am weitesten verbreitete Hybridvariante ist die Kombination aus Verbrennungsmotor (also Diesel oder Ottomotor als Hauptenergiequelle) und elektrischer Maschine mit einem elektrischen Speicher in Form einer Batterie, Brennstoffzelle oder Doppelschichtkondensatoren.

Als Vorteile für einen Elektro-Hybrid gelten (Schwingshackl, 2009):

- wirkungsgradgünstigere Betriebsweise des VKM (wird durch die Strategie möglich),
- möglicher kurzzeitiger abgasfreier und geräuschreduzierter Fahrbetrieb in sensiblen Gebieten im rein elektrischen Betrieb,
- reduzierter Energieverbrauch durch Rekuperation von Bremsenergie durch elektrisches Generieren und
- Reduktion des Kraftstoffverbrauchs speziell im städtischen Betrieb.

Das Kraftstoffeinsparpotential ergibt sich einerseits durch die Kombinationsmöglichkeit der Vorteile unterschiedlicher Antriebe (Strategie) und andererseits durch die Speicherung der Bremsenergien bei Verzögerungen des Fahrzeugs.

Als wesentlichste Nachteile können:

- Zunahme des Fahrzeuggewichts (ca. 5 – 10%),
- Großer Bauraumbedarf für den Antriebstrang,
- Zusätzliche Rohstoffeinsatz und Recyclingaufwand der Hybridkomponenten und
- Komplexität des Antriebstrangs

genannt werden.

13.1.3.1 Exkurs Verbrennungskraftmotor

Der Wirkungsgrad und damit umgekehrt proportional verknüpft der Kraftstoffverbrauch einer motorischen Verbrennung sind stark vom Betriebspunkt (bestimmt durch Motorlast und Motordrehzahl) sowie der Dynamik der Betriebszustände beeinflusst. Der Bereich des geringsten spezifischen Kraftstoffverbrauchs kann für jeden Motor in einer Darstellung des Motorkennfeldes (z.B. Abbildung 55) gefunden werden. Die besten Wirkungsgrade werden typischerweise im unteren Drehzahlbereich und hohen Motorlasten (Dieselmotoren bei ca. 2/3 Last, Ottomotoren nahe an der Volllast) sowie stationären Betriebsbedingungen erreicht. Im realen Verkehr mit Kaltstart, Beschleunigungs- bzw. Bremsvorgängen etc. sind diese stationären Bedingungen selten gegeben.

Bei einer Untersuchung an der TU Graz (Eichlseder, 2008) wurden für typische PKW-Motoren Wirkungsgrade in realen Fahrbedingungen ermittelt. Im ARTEMIS Stadt- bzw. Freiland - Fahrzyklus erreichen aktuelle Dieselmotoren Wirkungsgrade von 21% bzw. 27%, Ottomotoren erzielen in diesen realen Fahrzyklen Wirkungsgrade von 15% bzw. 21%. Im europäischen Zulassungszyklus liegen die Wirkungsgrade im ECE Teil für Dieselmotoren zwischen 11% und 15%, Ottomotoren erzielen 9% bis 14%.

Bei den Dieselkonzepten liegt der Wirkungsgrad zu Testbeginn (während des Warmlaufes) um 16% bis 20% niedriger als im betriebswarmen Zustand. Bei den Ottomotoren liegt der Wirkungsgrad zu Testbeginn um 17% bis 37% unter den Werten für betriebswarmen Motor. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die aus Rücksicht auf Emissionen und Komfort notwendige Anpassung der Betriebsparameter.

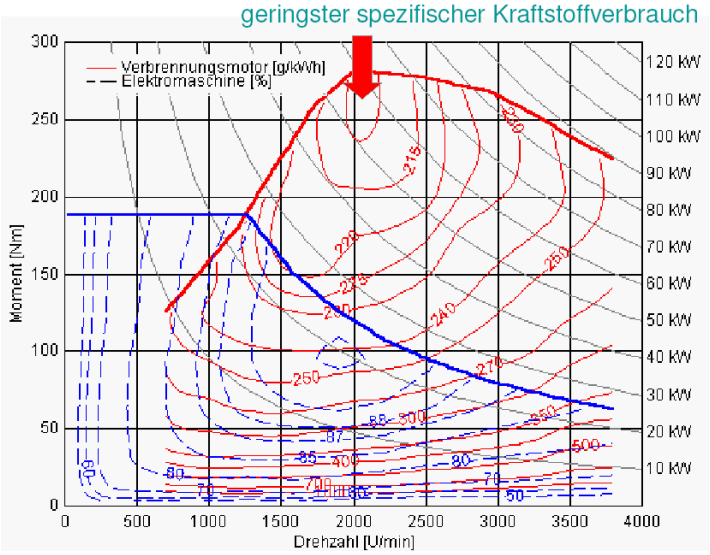


Abbildung 55: Momentenverlauf von Verbrennungskraftmotor und Elektromotor (Wallentowitz, 1999)

Eine Kombination von VKM und Elektromotor erlaubt es, je nach Konfiguration, den VKM für kleinere Leistungen auszulegen, ganz abzuschalten oder wirkungsgradungünstigere Betriebsbereiche

(Teillastbereich) durch Lastpunktanhebung zu vermeiden. Eine Reduktion des Verbrauchs durch eine Erhöhung der Motorlast zu besseren Wirkungsgradbereichen führt beim Dieselmotor jedoch zu höheren NO_x-Emissionen. Somit muss für Verbrauch und einzelne Emissionskomponenten eine Kompromisslösung gefunden werden.

Hybridantriebe werden nach der Antriebsstruktur in drei Grundstrukturen unterteilt: parallel und serielle Konzepte sowie Mischformen dieser (Back, 2005):

Beim parallelen Hybrid sind VKM und Elektromotor mechanisch mit den Antriebsrädern gekoppelt. Komponenten eines Parallelhybrids sind: zwei Motoren, ein Kraftstofftank und eine Batterie als Energiespeicher, ein Getriebe und mindestens eine Kupplung. Durch diese Anordnung kann das Fahrzeug entweder rein elektrisch, rein verbrennungsmotorisch oder von beiden Motoren angetrieben werden. Die Leistungsaddition bringt den Vorteil der möglichen kleineren Auslegung der Einzelkomponenten, da keiner der beiden Motoren die maximale Antriebsleistung alleine aufbringen muss. Durch einen direkten mechanischen Durchtrieb vom VKM bis zum Rad fallen elektrische Umwandlungsverluste, wie beim seriellen Hybrid weg und bietet somit hohes Potential für die Kraftstoffeinsparung. Ein stationärer Betrieb des VKM (z.B. im Bestpunkt) ist nicht Teil des Konzepts. (Abbildung 56, Abbildung 57 - links)

Beim seriellen Hybrid besteht der Antriebsstrang aus einer seriellen Anordnung von einem VKM, einem Generator und einem Elektromotor. Der VKM treibt den Generator an und dieser erzeugt Strom. Dadurch wird der Betrieb des Elektromotors sichergestellt oder der Strom teilweise in der Batterie zwischengespeichert. Der Elektromotor muss aus diesem Grund so dimensioniert werden, dass er die volle im Fahrbetrieb benötigte Antriebsleistung aufbringen kann. Der Hauptvorteil eines seriellen Hybrid liegt darin, dass ein konstanter Betrieb des VKM im besten Wirkungsgrad oder bei geringsten Emissionen realisierbar ist. Ein Nachteil ist jedoch die lange Wirkungsgradkette durch zweifache Energiewandlung (mechanisch - elektrisch - mechanisch) und einer eventuell erforderlichen Zwischenspeicherung in der Batterie. Ist die Batterie voll, muss der VKM auch instationär betrieben werden. (Abbildung 57 - mitte)

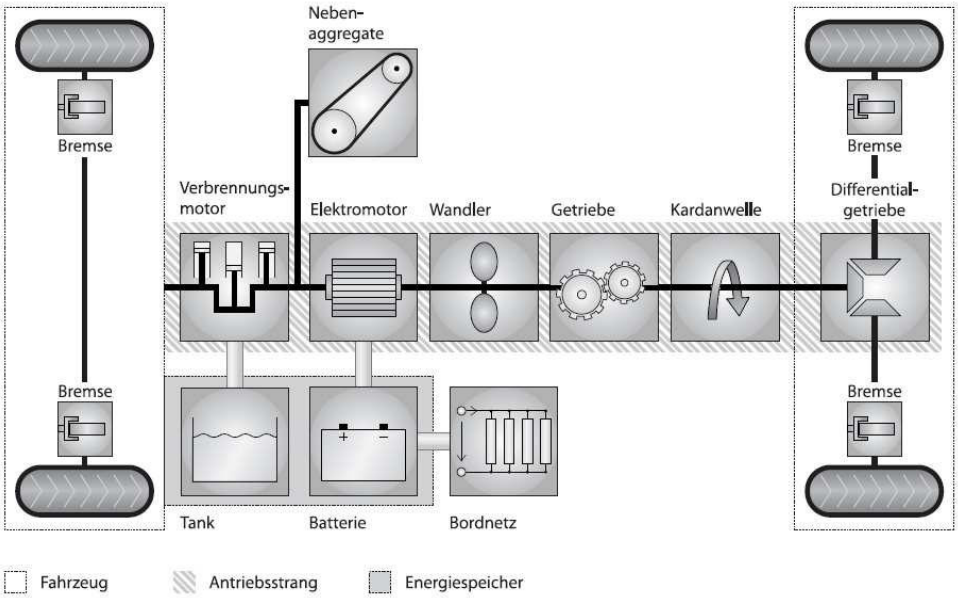


Abbildung 56: Aufbau eines parallelen Hybridfahrzeuges
(Back, 2005)

Eine mögliche und viel versprechende Mischform zwischen parallelem und seriellem Konzept stellt ein leistungsverzweigender Hybrid dar, der im Toyota Prius bereits im Serieneinsatz ist. Aufgrund der teilweise direkten Übertragung der mechanischen Leistung ist der Wirkungsgrad besser als bei einem seriellen Hybrid. (Abbildung 57 - rechts)

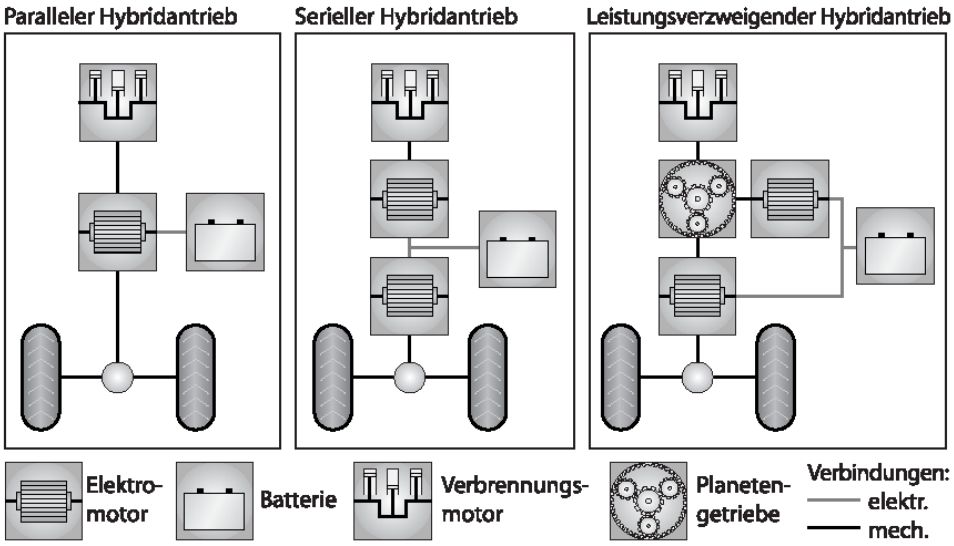


Abbildung 57: Beispielhafte Strukturvarianten von Hybridfahrzeugen (Back, 2005)

Nach umfangreichen Systemuntersuchungen ist der Standpunkt vieler OEM, dass dem Parallel-Hybrid der Vorzug zu geben ist. Als entscheidender Vorteil wird die Modularität für eine noch ungewisse Stückzahlentwicklung in (VDI, 2006) angegeben.

Weitere Vorteile des Parallel-Hybridkonzepts sind, vgl. (Küçükay, 2008): nur eine benötigte elektrische Maschine, gutes Kosten Nutzenverhältnis, geringer Bauraumbedarf, geringes Mehrgewicht und Verwendungsmöglichkeit konventioneller Antriebskomponenten. Dem steht der Nachteil eines nicht frei wählbaren Betriebspunktes für den VKM gegenüber.

Beim Parallelhybrid können drei Arten unterschieden werden wie Elektro- und Verbrennungskraftmotor überlagert werden können:

- Drehzahladdition (Planetengetriebe, bei starrem Momentenverhältnis und frei wählbaren Drehzahlen)
- Momentenaddition (direkte Kopplung, mit Stirnrad oder Kette)
- Zugkraftaddition (Elektro- und VKM wirken auf unterschiedlichen Achsen des Fahrzeugs)

Die Momentenaddition wird beispielhaft in Abbildung 58 dargestellt.

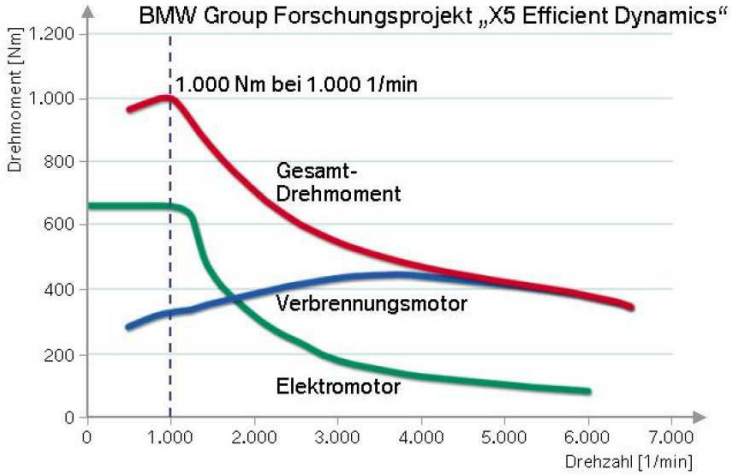


Abbildung 58: Drehmomentenverlauf von Elektromotor und Verbrennungsmotor (Göschel, 2004)

Je nach Hybridisierungsgrad H der mit $H = P_{el} / (P_{el} + P_{VKM}) * 100$ [%] definiert ist, kann in folgenden Hybridisierungsstufen eingeteilt werden: Micro-Hybrid (H ca.5%), Mild-Hybrid (H ca.10%) und Full-Hybrid (H ca.25%). Eine übliche Funktionsübersicht wird in Abbildung 59 gezeigt.

Art	Zusätzliche Funktionen				
	Elektrische Verbraucher	Start-Stopp	Boosten	Rekuperation	Elektrisches Fahren
Micro	✓	✓			
Mild	✓	✓	✓	✓	
Full	✓	✓	✓	✓	✓

Abbildung 59: Übersicht der Hybridisierungsstufen und ihre Funktionen (Küçükay, 2008)

Das Start Stopp Potential ist abhängig vom Leerlaufverbrauch, der Stehzeit und Stehhäufigkeit. In dieser Arbeit wurde für die Abbildung der flottendurchschnittlichen HEV Fahrzeuge im Emissionsmodell ein Parallel-Hybrid-konzept mit den Funktionen eines Full-Hybrid simuliert.

13.1.3.2 Hybridstrategie

Aus der Notwendigkeit eines effizienten Zusammenspiels zwischen VKM, Elektromotor und deren Speicher ergeben sich für den Fahrbetrieb viele Strategiemöglichkeiten, die an dieser Stelle nur erwähnt, nicht aber im Detail erklärt oder analysiert werden sollen. Grundsätzlich kann ein Hybrid rein elektrisch,

rein verbrennungsmotorisch oder wie z.B. beim sogenannten „Boosten“ in einer Kombination angetrieben werden. Für eine ganzheitliche Strategie sollten folgende Funktionen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, beachtet werden:

> Start-Stopp, rein elektrisches Fahren, Boosten, Rekuperation, emissionsfreies Fahren, Lastpunktverschiebungen beim VKM, Allradfunktion, Fahrbarkeit, Energiemanagement der Batterie, Temperaturmanagement der Bauteile und des Fahrzeuginnenraumes, emissionsminimiertes Fahren, Abstimmung auf eine Fahrsituation (Stau, Langstrecke, Kurzstrecke, …), etc.

Diese Auflistung macht deutlich wie komplex die Strategie ausfallen kann. Gleiches unter anderen Voraussetzungen am Fahrzeug gilt für Plug-In Hybride bzw. Range Extender Electric Vehicles, siehe nächster Abschnitt. Details zur Integration von HEV in NEMO siehe Abschnitt 3.1.7.

Trendeinschätzung:

Die Zukunft von Hybridfahrzeugen wird unter anderem den Vorteilen für die Nutzer sowie an der Glaubwürdigkeit der ökologischen Wirkung in der Bevölkerung (somit der Werbestrategien und Medialer Aufarbeitung des Themas) liegen. Die tatsächliche ökologische Wirkung lässt sich auch mit leichteren und leistungsreduzierten Fahrzeugen bei gleichzeitig meist geringeren Kosten realisieren. Auch die Verbesserung des NEDC hin zu einem „realeren“ Prüfverfahren auch unter Rücksichtnahme auf die Elektrifizierung der Antriebe wird eine große Rolle spielen. Ökonomisch ist das HEV eine Chance für Hersteller gewohnte Technologien und eigenes Know-How weiter zu verkaufen. Aus diesem Grund sind kurzfristig deutliche Zuwächse in der Flotte zu erwarten, wenn auch das rasche Substituieren der Fahrzeuge durch PHEV Technologien, mit weiteren Vorteilen für Nutzer und Umwelt, zu erwarten ist.

13.1.3.3 Plug-In Hybride (PHEV) bzw. Range extender electric vehicles (REEV)

Mit der Vergrößerung der Batterie und einer Netzanbindung geht die Möglichkeit einher, über das externe Stromnetz (z.B. nachts in der Garage) zu laden und größere Strecken rein elektrisch zurückzulegen. Solche Fahrzeuge sind unter dem Begriff "Plug-In-Hybrid" bereits bekannt. Bei einem solchen Antriebskonzept kann ein Teil der jährlichen Fahrleistung rein elektrisch mit "Strom aus der Steckdose" erbracht werden. Dadurch ergeben sich wie in Abschnitt 13.1.3.4 beschrieben die Vorteile eines rein elektrischen Antriebs und ein zum HEV weiteres Kraftstoffeinsparpotential durch geeigneten Energiemix und Möglichkeiten für neue Fahrzeugkonzepte (höhere Batteriekapazitäten und kleinere VKM Motoren), wobei die notwendige höhere Batteriekapazität auch zusätzliche Kosten beinhaltet. Für die Anzahl der Fahrten, die über die Reichweite der Batteriekapazität hinausgehen, ist ein VKM in geringfügig kleinerer oder gleicher Ausführung wie beim HEV vorhanden. Bezeichnungen für diverse Konzepte sind je nach Hersteller unterschiedlich. Hier werden beispielhaft jene aus (Mohrdieck 2007) in Abbildung 60 angeführt:

- HEV mit Steckdose (also keine oder geringe Batterievergrößerung)
- PHEV Minimalversion
- PHEV Verbesserte Version

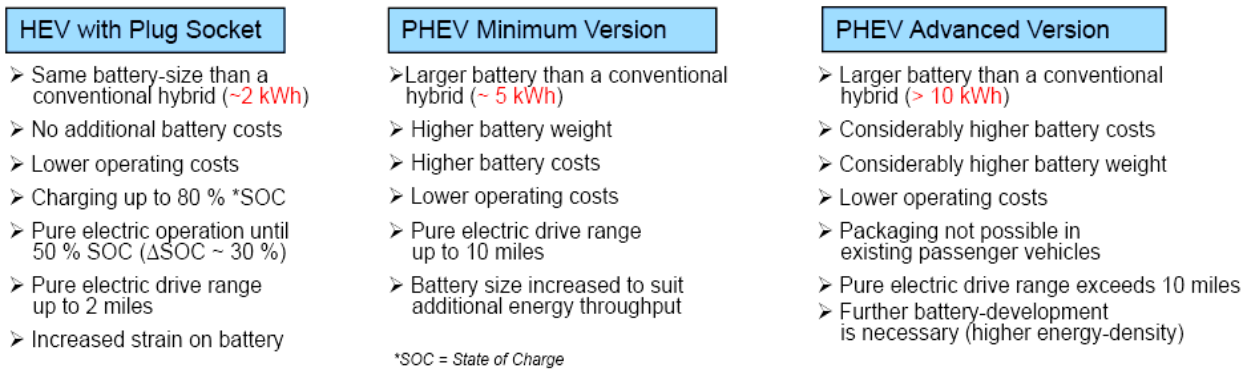


Abbildung 60: Verschiedene Plug-In-Hybrid Konzepte und deren Eigenschaften (Mohrdieck, 2007)

Einen weiteren Typen stellt der PHEV mit Range-Extender (PHEV-RE, „Reichweitenvergrößerer“) dar. Ein aus ökologischer Sicht kleinst möglich ausgeführter VKM wird nur mehr dazu benutzt, die in der Praxis seltenen und durch die Batteriekapazität nicht abgedeckten Reichweiten zu überbrücken. Dementsprechend hohe Batteriekapazitäten sind notwendig um den Einsatz des Range-Extenders gering zu halten. Wobei der RE je nach Konzept, entweder zum direkten Vortrieb, oder mit Hilfe eines Generators zum Laden der Batterie oder als Stromquelle für den Elektromotor genutzt wird.
Die Leistung des Range-Extenders kann auf die mittlere benötigte Leistung des Fahrzeuges ausgelegt werden, denn Leistungsspitzen werden durch die Batterie gepuffert und können durch Management im Fahrzeug vorzeitig sichergestellt werden.

Trendeinschätzung:

Die Zukunft von PHEV bzw. REEV vereint sowohl die Vorteile der Speicherdichte fossiler Kraftstoffe mit hohen Reichweiten, als auch jene der im Betrieb emissionsfreien Fortbewegungsmöglichkeiten. Daraus ergeben sich sowohl Vorteile für die Anwender bei Praxistauglichkeit als auch relativ niedrige Kosten durch geringere Batteriekapazitäten als beim BEV. Aufgrund fehlender Angebote am heutigen Markt ist zu erwarten, dass es erst bei vielfältigen Angeboten aller Fahrzeughersteller zu einem deutlichen Anstieg der Neuzulassungen kommt. Anzunehmen ist, dass diese Fahrzeugkonzepte dann bei PKW und LNF sehr schnell wachsen werden.

13.1.3.4 Elektrofahrzeuge ((B)EV , (Battery) Electric Vehicles)

Ein Elektrofahrzeug ist grundsätzlich ein Fahrzeug, das mit einem Elektromotor betrieben wird. Dieses muss aber nicht notwendigerweise dauerhaft mit einem mitgeführten Energiespeicher betrieben werden. Die elektrische Energie kann mit einer Batterie oder einer Brennstoffzelle bereitgestellt werden oder aber eine Überkopfleitung, wie bei einem Oberleitungsbus, könnte für die Energiebereitstellung und somit für eine „unendliche“ Reichweite sorgen. Dies stellt für bestimmte Regionen und spezielle Anwendungen eine technisch machbare Lösung, die hier als Gedanke festgehalten wird.
Im Rahmen dieser Arbeit wird als „Elektrofahrzeug“ in engerem Sinne ein Fahrzeug verstanden, das chemische Energie in wieder aufladbaren Batterien (Akkumulatoren) gespeichert mitführt und mit einem Elektromotor betrieben wird („BEV, Battery Electric Vehicle).

Das BEV steht am Ende des gesamten Elektrifizierungspfades, dessen Vor- und Nachteile hier detailliert aufgelistet werden, (Schwingshackl, 2009):

+ produziert keine „lokalen Auspuffabgase“ und keinen abgasbedingten Feinstaub
+ elektrische Energie für den Antrieb kann zur Gänze durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden und kann durch regionale Energieerzeugung die Abhängigkeit von Energieimporten verkleinern
+ effiziente Energieausnutzung (ca. 70% bei Netzladung, ohne Energieerzeugung)
+ BEV sind durch die Elektromotoren leiser als Fahrzeuge mit VKM
+ Energierückgewinnung beim Bergabfahren und Bremsen
+ niedrigerer Wartungsaufwand: Elektromotoren müssen seltener gewartet werden als VKM; das Bremssystem wird weniger belastet durch die Energierückgewinnung
+ im Stillstand minimaler Energieverbrauch (nur Nebenaggregate)
+ Netzpufferung von Spitzenstrom und Nutzung als Notstromaggregat ist möglich
+ das Laden an jeder Steckdose ist möglich (Infrastruktur vorhanden)
+ das BEV hat durch den Elektromotor bei niedrigen Drehzahlen im Gegensatz zu einem PKW-VKM ihr maximales Drehmoment zur Verfügung
+ niedrige kilometerbezogene Betriebskosten („Tankkosten an der Steckdose“)
+ niedrigerer Aufwand für ABS, ASR und 4 WD zur Erhöhung des Drehmoments bei Elektrotraktion mit Mehrmotorenantrieb
+ Wegfallen des VKM, der abgasrelevanten Bauteile und des Treibstofftanks

Die Herausforderungen beziehen sich fast ausschließlich auf die zukünftigen Entwicklungen der Batterietechnologie.

- geringere Reichweite als beim PKW-VKM durch geringe Energiespeicherdichte in der Batterie
- hohen Batteriekosten im Vergleich zum Treibstofftank
- Lebensdauer der Batterien ist meist noch geringer als die Fahrzeuglebensdauer
- lange Ladezeiten der Batterien (von mehreren Minuten bis hin zu Stunden je nach Batterietechnologie und benötigter Speicherkapazität)
- erhöhtes Fahrzeuggewicht durch das Batteriegewicht und zusätzlicher Platzbedarf für die Batterien
- Temperaturabhängigkeit des Fahrverhaltens
- der Einfluss auf die Lebensdauer einer Batterie bei Temperaturen >35°C und <0°C muss auch beim Parken des Elektrofahrzeuges berücksichtigt (geregelt) werden
- neue Strategie für Innenraumklimatisierung notwendig

<u>Trendeinschätzung:</u>

Die Zukunft von BEV wird aus heutiger Sicht dominiert durch die Kosten der Batterie und die Akzeptanz der veränderten Eigenschaften des eigenen Fahrzeugs. In der öffentlichen fachlichen Diskussion herrscht Einigkeit darüber, dass sich die Batteriekosten deutlich verringern werden und die Leistbarkeit wird von Herstellern (z.B.: Tesla Model S) bereits heute bewiesen.

13.1.3.5 Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV, Fuel Cell Electric Vehicles)

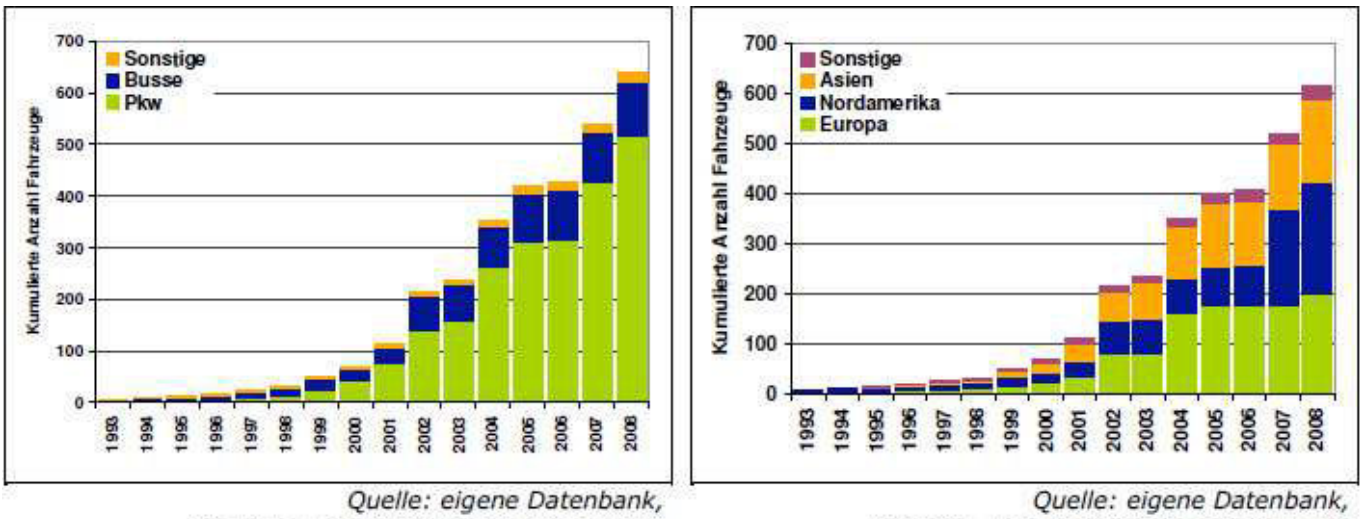
Brennstoffzellen enthalten zwei Elektroden, eine Anode, an der der Brennstoff zugeführt wird, und eine Kathode, an der das Oxidans zugeführt wird. Die Reaktionspartner sind räumlich durch einen Elektrolyten getrennt. Dieser erlaubt es, den Reaktionsablauf so zu kontrollieren, dass der bei der chemischen Reaktion stattfindende Elektronenaustausch über einen äußeren Stromkreis abläuft (Heinzel, 2006). Der grundlegende Unterschied zu einer Batterie besteht darin, dass in einer Batterie die chemische Energie innerhalb der Batterie gespeichert ist, während sie bei einer Brennstoffzelle kontinuierlich von außen bereitgestellt wird (Cappadonia, 2003).

Ein wichtiger Vorteil der Brennstoffzellentechnologie gegenüber Verbrennungskraftmaschinen ist die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie, mit hohen theoretischen Wirkungsgraden auch in Teillastbereichen bei niedrigen Prozesstemperaturen. Insbesondere Hochtemperatur-Brennstoffzellen ermöglichen in Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplung hohe Wirkungsgrade (Kurzweil, 2006). Für eine Anwendung im Fahrzeug sind sie jedoch nach heutigem Wissensstand aufgrund der hohen Arbeitstemperaturen von 650 bis 1.000 °C nicht geeignet.

Für eine Anwendung im Fahrzeug gelten folgende Nieder-/Mitteltemperatur-Brennstoffzelltypen als prinzipiell geeignet:

- Alkalische Brennstoffzelle
- Protonen-Austausch-Membran-Brennstoffzelle
- Phosphorsäure-Brennstoffzelle
- Direktmethanol-Brennstoffzelle / Brennstoffzelle mit Reformer

Im Jahr 2010 betrug die kumulierte Anzahl an Brennstoffzellenfahrzeugen weltweit ca. 600 Fahrzeuge (Abbildung 25) (Crawley, 2007). Hierbei handelt es sich um Prototypen sowie erste Kleinserien für praxisnahe Flottentests.



Quelle: eigene Datenbank, Literatur- und Herstellerangaben zu 179 Fahrzeugmodellen (Pkw und Busse)

Quelle: eigene Datenbank, Literatur- und Herstellerangaben zu 179 Fahrzeugmodellen (Pkw und Busse)

Abbildung 61: Entwicklung Stückzahlen FCEV Fahrzeuge bis 2008 (links nach Type, rechts nach Regon (Mock, 2010)

In (Mock, 2010) werden weitere Details zu Brennstoffzellenantrieben genau analysiert und dargestellt. Da in (Mock, 2010) die Kostenanalyse eindeutig um eine Zehnerpotenz über anderen alternativen

Antrieben zu liegen kommt, wird an dieser Stelle nicht weiter auf dieses Antriebskonzept eingegangen. Die Kosten werden bisher dominiert vom Materialpreis und eine ausreichende Vergünstigung durch Ausweichen auf andere Materialien. Mengeneffekte oder Reduktion der Materialpreise werden als nicht realistisch eingeschätzt, siehe auch (Schwingshackl, 2013).

Trendeinschätzung:

Auch wenn durch die Brennstoffzelle prinzipiell Verbrauchsvorteile durch den besseren Wirkungsgrad als der Verbrennungsmotor realisiert werden könnten ist mittelfristig aus Kostengründen nicht mit einem nennenswerten Anstieg der FCEV Neuzulassungen zu rechnen. Als weitere Barrieren für eine rasche Einführung dieser Antriebsart gelten die fehlende Wasserstoffinfrastruktur und die relativ aufwendige und kostenintensive Wasserstoffspeicherung. Die Wasserstoff Erzeugung und Speicherung ist sehr Energieaufwendig und muss daher für die Ermittlung der Gesamtverbesserung der Verkehrslösung mitbetrachtet werden.

13.1.4 Einsatzgebiete von alternativen Antrieben

Der Einsatz von alternativen Antrieben - vor allem von elektrifizierten Antrieben in den verschiedenen Ausprägungen - bei Personenkraftwagen und 2-Räder ist mittlerweile allgemein bekannt. In diesem Kapitel sollen darüber hinaus anhand von bereits existierenden Beispielen in heute noch sehr neuen Bereichen, vor allem bei schweren Nutzfahrzeugen, Bahn, aber auch Schifffahrt weitere Einsatzgebiete aufgezeigt werden. Meist handelt es sich dabei um eine Beschreibung von Prototypen. Ebenfalls angeführt werden Fahrzeuge die eine alternative Kraftstoffart mit konventionellem Antrieb verbinden.
Die Auflistung stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und nimmt Rücksicht auf den im Projekt dafür vorgesehenen Aufwand.

13.1.4.1 Personenkraftwagen

Fahrzeuge wie beispielsweise der Honda Clarity FCX, Daimler f-Cell die Wasserstoff mittels Brennstoffzelle nutzen und der BMW Hydrogen 7 oder Mazda 5 RE & RX-8 Hy die Wasserstoff im Verbrennungsmotor verwenden zeigen, dass auch wasserstoffbasierte Antriebe bereits umgesetzt wurden. Die Verwendung von Wasserstoff eröffnet für den Ottomotor neue Potentiale durch seine sehr hohe Zündwilligkeit und Oktanzahl. Die Speicherung in Druckbehältern gilt heute technisch als gelöst
Während bei der Verbrennung von Wasserstoff im Verbrennungsmotor weiterhin NO_x und N_2O Emissionen emittiert werden, gilt das Brennstoffzellenfahrzeug als im Betrieb emissionsfrei. Brennstoffzellen haben einen deutlich besseren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren, bei allerdings deutlich höheren Kosten (siehe Kosten der Antriebskonzepte). Beide Technologien sind auf die Wasserstoffversorgung angewiesen die sowohl hinsichtlich Infrastruktur als auch Speicherung als Herausforderung gilt.

13.1.4.2 2-Räder

Alternative Antriebe bei 2-Rädern umfassen im Wesentlichen die Elektrifizierung der Antriebe sowie Zweiräder mit Hybrid-Antrieb. Es gibt Versuche mit Brennstoffzellen die allerdings über das Prototypenstadium noch nicht hinaus gekommen sind. Speziell die Anwendung von 2-Rädern im Kurzdistanzbereich besonders geeignet für rein elektrische Antriebe. Typische Anwendungsprofile

lassen sich durch die technischen Vorteile von elektrifizierten Antrieben ohne Einschränkungen in die Praxis umsetzen, bei gleichzeitigen Vorteilen in der Umweltwirkung.

13.1.4.3 Leichte Nutzfahrzeuge

Getrieben durch CO_2 Grenzwerte ähnlich wie bei Pkw Anwendungen (EU 2009) werden auch leichte Nutzfahrzeuge den Weg der Elektrifizierung oder anderer Alternativen einschlagen. Im Fokus stehen dabei Gasantriebe (z.B. CNG), Elektrohybride und -fahrzeuge und Hydraulikhybride.
Trotz geringerer Laufleistungen bei Verteilerfahrzeugen, kann bei Hybriden durch die häufigen Start-Stopp Vorgänge eine Kraftstoff-Einsparungen im zweistelligen Prozentbereich erreicht werden. Als Nachteilig kann der relativ hohe Nutzlastverlust von 10 bis 30 Prozent durch die zusätzlichen Komponenten gesehen werden, womit auch der Kostennutzen geringer ausfällt. In diesem Segment kann allerdings als Kaufentscheidung für Unternehmen das „mitgelieferte" grüne Image entscheidend sein, trotz relativ geringer Kosteneinsparungen. Bis 2020 ist lt. (Klink, 2010) zu erwarten, dass Hybride etwa 15 Prozent aller Neufahrzeuge im leichten Nutzfahrzeug-Segment ausmachen und insbesondere von Kunden mit hoher jährlicher Laufleistung und Image getriebener Kaufentscheidung genutzt werden. Reine Elektrofahrzeuge werden bis 2020 auch in der Klasse der leichten Nutzfahrzeuge aufgrund der immer noch sehr hohen Anschaffungskosten und Nutzlastnachteilen voraussichtlich nur eine Nische darstellen.

13.1.4.4 Schwere Nutzfahrzeuge

Bei Schweren Nutzfahrzeugen sind Hybridanwendungen bereits in der Testphase bzw. in einigen Segmenten (v.a. Linienbussen) serienmäßig am Markt erhältlich. Beispiele für Sattelzüge oder Solo Lkw können in der Literatur gefunden werden. Diskutiert wird in der Literatur ebenfalls eine Hybridanwendung mit Oberleitungen auch auf Autobahnen oder Schnellstraßen, sowie die induktive Ladung der Batterie. Zur Veranschaulichung der derzeitigen Möglichkeiten werden einige Fahrzeugbeispiele genannt.

Beispiel 1: DAF XF105.460 – schwerer Lkw (Lastauto Omnibus 8/2012)

Ein Hybridsystem für einen schweren Lkw ist nur ca. 10 bis 20 Prozent teurer als für einen leichten Lkw. Es kann eine Amortisationsdauer von ca. zwei bis drei Jahren erreicht werden. Gut 200 Kilogramm Nutzlastverlust müssen in Kauf genommen werden. Die wichtigsten Bestandteile d.h. die 120 kW starke E-Maschine (eine permanent erregte Synchronmaschine), die Leistungselektronik und auch der Wechselrichter sind Entwicklungen von ZF, die Lithium-Ionen-Batterie (650 Volt) wird vom OEM zugekauft. Eine Batteriegröße im Bereich von 4 kWh wird angewendet.
Damit der Lkw unabhängig vom Dieselmotor arbeiten kann, sitzt die Kupplung zwischen Diesel und E-Maschine, welche auch die Synchronisierung beim Hochschalten übernimmt. Um die Wärmeentwicklung in den Griff zu bekommen, ist das komplette System wassergekühlt. Ein wesentlicher Unterschied zum Pkw-Hybrid besteht darin, dass sich die Leistungen der beiden Antriebe nicht addieren. Der E-Motor kann je nach Batteriestand variable Leistung liefern. Eine Entnahme von 40 kW beispielsweise ist sechs Minuten lang möglich. Je nach Beladung und Straßentopografie kann mit diesem System eine Kraftstoffeinsparung von ca. 4 bis 8 Prozent realisiert werden.

Beispiel 2: CNG Trailer – schwerer Lkw (Lastauto Omnibus 8/2012)

Der Fahrzeugbauer will den Einsatz von erdgasgetriebenen Zugmaschinen attraktiver machen. Bis dato war unter anderem die begrenzte Reichweite von maximal 300 Kilometern in der Praxis limitierend. Es wurde ein spezieller Auflieger entwickelt, der dabei hilft, die Reichweite des CNG-Antriebs deutlich auf bis zu 900 Kilometer zu erhöhen. Dazu wurde anstelle des Palettenkastens eine Aufnahme für sechs Gasflaschen unter dem Auflieger installiert, die insgesamt 1.100 Liter fassen. Bei Erdgastankstellen mit starker Pumpe soll der Tankvorgang für Zugmaschine und Auflieger in etwa 15 Minuten gefüllt sein. An leistungsschwächeren Ausführungen kann der Tankvorgang ca. 25 Minuten dauern. Die vollen Behälter am Auflieger wiegen einschließlich Traggestell etwa 525 Kilogramm.

Beispiel 3: Dieselhybrid Bus von Van Hool (Lastauto Omnibus 7/2012)

In einem der größten ÖPNV-Projekte Frankreichs wurden bereits 27 serielle Dieselhybridbusse vom belgischen Hersteller Van Hool bestellt, die bis Ende 2013 im Verkehr sein sollen. Der Elektromotor sorgt für die Traktion an der Antriebsachse. Das Elektroaggregat ist ein Siemens-Motor mit 240 kW. Beim Dieselmotor setzt Van Hool auf den 6,9 Liter großen EEV Motor von MAN (D0836 LOH) mit 184 kW. In dieser Konstellation soll lt. Herstellerangaben eine 25-prozentige Verbrauchssenkung gegenüber dieselangetriebenen konventionellen Bussen möglich sein. Als Energiespeicher vorgesehen sind Super-Kondensatoren. Das schnelle Be- und Entladen ist ideal für den Anfahr-Brems-Rhythmus von Stadtbussen. Denkbar sind aber auch Lithium-Ionen-Akkus, denn die Speicherkapazität von Super-Kondensatoren ist begrenzt.

Weitere Beispiele für Hybridbusse sind:

VOLVO
VOLVO 7900 Hybrid
Motor: Parallel-Hybrid mit Heckmotor, Vierzylinder-Diesel, 5 Liter Hubraum
Leistung: D5F215 (161 kW/800 Nm) + Elektromotor (120 kW/800 Nm)

MAN
Hybrid: Lion´s City Hybrid mit MAN (Siemens), Hybrid (Ultracaps) / MAN Diesel EEV
184kW Diesel (DPF) / 2x 75kW elektr. Fahrmotoren

Hess
Hybrid: Hess mit Vossloh-Kiepe Hybrid (Super-Caps); Kirsch Stromerzeuger / IVECO Diesel EEV
220kW Diesel (SCR+DPF) / 2x 100kW elektr. Fahrmotoren

Solaris
Hybrid: Solaris Urbino 18 Allison Hybrid mit Nickel Metallhydrid-Batterien (NiMH) / Cummins Diesel EEV; 181kW Diesel (SCR + DPF) / 2x 75kW elektr. Fahrmotoren

Beispiel 4: induktive Energieübertragung am Beispiel Turin (Lastauto Omnibus 8/2012)

In Turin werden elektrische Linienbusse mittels induktiver Energieübertragung in den Haltestellen betrieben. Diese Linienbusse fahren ca. 200 Kilometer am Tag. Dabei kann die gespeicherte Energie

mittels induktiver Energieübertragung auf ein Minimum begrenzt werden. Den Ladevorgang überwacht der Fahrer über einen Monitor im Cockpit. Das Zwischenladen im Tagesverlauf sorgt so für ausreichend Reichweite.
Die sogenannte Inductive-PowerTransfer-Technologie (IPT) ist seit rund zehn Jahren bei insgesamt 30 Stadtbussen im Einsatz, die in Genua und Turin unterwegs sind. Der Strom wird von Primärspulen in der Fahrbahndecke der Haltestellen zu den in den Unterboden der Elektrobusse integrierten Sekundärspulen übertragen. Beim Laden der Blei-Gel-Batterien nähern sich die Abnehmerspulen bis auf 40 Millimeter den Ladespulen. So soll bis zu 95 Prozent Ladewirkungsgrad erreicht werden können. Während die italienischen Belreiber die Batterien nachts im Depot vollladen, werden tagsüber, während die Fahrgäste ein- und aussteigen, je nach Bedarf zwischen 10 und 15 Prozent an entsprechend ausgerüsteten Haltestellen nachgeladen.

Beispiel 5: Brennstoffzellen Bus – Mercedes Benz Citaro (Klell, 2010)
Der Citaro ist mit zwei Brennstoffzellen von je 60 kW und zwei Elektromotoren von je 80 kW ausgestattet. Der Wasserstofftank umfasst 7 x 205l (35 kg / 350 bar). Die Lithium-Ionen Akku Speicherkapazität beträgt 26 kWh. Eine Reichweite von 250 km wird vom Hersteller angegeben

Beispiel 6: Elektrifizierter Güterverkehr: eHighway (Brünglinghaus, 2013)
Der Technologiekonzern Siemens arbeitet an der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs zusammen mit dem schwedischen Nutzfahrzeughersteller Scania. Das Konzept des eHighway von Siemens, zur Stromversorgung von schweren Lastfahrzeugen über Oberleitungen, soll in der Forschungskooperation mit der Expertise zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs in Lkw und Bussen von Scania kombiniert werden. Die Kosten dieser Techniken sind nach wie vor eine Herausforderung für die wirtschaftliche Durchführbarkeit.

13.1.4.5 Schienenfahrzeuge

Elektrifizierte Strecken gibt es bei unterschiedlichen Schienenfahrzeugen bereits seit Jahrzehnten. Die Vorteile der „unendlichen“ Reichweite und der Rekuperations-Möglichkeiten sind somit keine Neuheit. Die Rekuperation erfolgt allerdings meist direkt ins Netz und nicht wie bei Hybrid-Anwendungen in einen Zwischenspeicher im Fahrzeug.
Gleichzeitig sind alleine in Österreich fast 40 % des Bahn Streckennetzes (2009) in Österreich nicht elektrifiziert. Die dort eingesetzten Dieselfahrzeuge bergen relativ großes Potential hinsichtlich CO_2-Reduktion. Die naheliegende Elektrifizierung der Strecke muss aus Infrastruktur-Kostengründen mit Betriebskosten einer Hybridisierung abgewogen werden.

Beispiel 1: Hybrid-Triebfahrzeug "Desiro“ (Czycholl, 2012)
Durch Hybrid-Technologie kann dieser Diesel-Triebwagen Kraftstoff einsparen: Dabei wird ausschließlich die beim Bremsen frei werdende Energie in Akkus gespeichert und später wieder für den Antrieb genutzt. Der von Siemens gebaute Triebwagen Desiro Classic (Baureihe VT 642) wurde dafür umgebaut. An der Stelle von zwei diesel-mechanische Antriebsanlagen mit einer Leistung von jeweils 275 Kilowatt, arbeiten jetzt zwei dieselelektrische 315-Kilowatt-Powerpacks des Motorenherstellers

MTU. Bis zu 25 Prozent weniger Kraftstoffverbrauch gegenüber dem konventionellen Modell und entsprechend geringere Kohlendioxid-Emissionen können lt. Herstellerangaben erreicht werden.

Beispiel 2: Elektro-Straßenbahn (Koch, 2010)
Neue Speichertechniken machen auf kurzen Strecken Oberleitungen für die Straßenbahn überflüssig und sparen Energie. Ein Grund, warum dieser Straßenbahntyp auf einer neuen Strecke im Universitätsviertel von Heidelberg eingesetzt werden soll, ist das eine Oberleitung durch elektromagnetische Felder die empfindlichen Messgeräte im Physikalisch-technischen Institut und die des Deutschen Krebsforschungszentrums stören können. Die Lösung: Über eine Distanz von 400 bis zu 700 Meter, je nach Geschwindigkeit und Zahl der Passagiere, macht ein auf dem Dach der Straßenbahn montierter Kondensatorpack, wie er in kleiner Bauform auch bei Hybridautos zum Speichern von elektrischer Energie benutzt wird, die Oberleitung verzichtbar. Weiters können durch Rekuperation pro Zug etwa 93.000 Kilowattstunden Strom pro Jahr zurückgewonnen werden.

13.1.4.6 Schiff

Über 90 % des Welthandels findet auf dem Seewege statt. Damit nimmt die Schifffahrt nicht nur in der globalen Warenlogistik eine Schlüsselrolle ein, sondern auch beim Verbrauch von Energiereserven und der Emission klimaschädlicher Gase. Mit einem Ausstoß von über 1 Mrd. Tonnen Kohlendioxid pro Jahr ist der Schiffsverkehr für über 3 % der globalen CO_2-Emissionen verantwortlich. Die Schifffahrt emittiert damit mehr CO_2 als ganz Deutschland.
Zu größeren Umweltproblemen in der Frachtschifffahrt im Off-Shore-Bereich kommt es durch die Verwendung von Schweröl. Schweröl ist eine zähflüssige Masse, die als Abfallprodukt bei der Erdölverarbeitung in den Raffinerien zurück bleibt. Durch den Schwefelgehalt im Schweröl entstehen Schwefeloxide. Diese können zu Krankheiten der Atemwege führen und gelten als Mitverursacher des "sauren Regens".
Viele hundert Jahre lang fuhren Menschen mit Segelschiffen zur See. Mit dem Aufkommen der Motorschifffahrt verlor das Segel in der kommerziellen und militärischen Schifffahrt jedoch an Bedeutung, während es im Segelsport weiterhin perfektioniert wurde. Durch „Skysails“ wird diese Art der Fortbewegung wieder angewendet. Als weitere Alternative, eher für den Personenverkehr bieten sich die Möglichkeiten der Elektromobilität mittels Photovoltaik an.
Keine Zukunft sagen Schiffsexperten dem Atomantrieb voraus (Kazim, 2008). Der Einsatz von LNG und LPG wird kontrovers diskutiert: Die Innovationen für den Ausbau des LNG-Einsatzes kommen aus den Niederlanden und können als zukunftsträchtig eingeschätzt werden. Auf langfristige Sicht sind LPG, Wasserstoff und Biokraftstoffe durchaus in der Diskussion als Schiffstreibstoffe, allerdings nicht gegenwärtig und auch nicht als direkter Ersatz für LNG, eher als Ergänzung oder Nachfolger. LNG-Einsatz könnte das Emissionsproblem in Häfen lindern (Schrögel, 2012).
Nachfolgend werden drei konkrete Beispiele für alternative Antriebsysteme in der Schifffahrt angeführt:

Beispiel 1: Skysails (Kazim, 2008; Skysails, 2013)
In Zeiten hoher Ölpreise wird das Segel wiederentdeckt. Seit Ende 2007 sind erneut Frachtschiffe mit einem zusätzlichen Gleitschirmantrieb auf Fahrt. Das Segel hilft Kraftstoff sparen - nach Angaben von Skysails bis zu 50 Prozent bei optimalen Windbedingungen.

Der SkySails-Antrieb befindet sich zurzeit im Vorserienstadium. Weltweit sind weniger als 10 Schiffe mit dem Antriebssystem ausgerüstet. Die Komponenten des SkySails-Systems können in zwei Kategorien unterteilt werden: bordseitige Komponenten (Start- & Landesystem / Steuerungssystem), die fest auf dem Schiff installiert sind und das sogenannte „Fliegende System“ (Zugdrachen, Steuergondel, Zugseil), das sich in geregelten, dynamischen Flugmanövern vor dem Schiff in der Luft bewegt und somit den Vortrieb erzeugt. Im Regelbetrieb ist das Zugseil des 160m² großen Zugdrachen SKS C 160 auf eine Länge von ca. 280m ausgebracht. Das Zugseil des ca. 300 m² großen Zugdrachen des SKS C 320 wird auf max. 420 m ausgefiert.
Der Autopilot lässt den Zugdrachen auf der Leeseite des Schiffes definierte Standardmanöver – beispielsweise in Form einer liegenden oder stehenden Acht „8“ – auf einer Flughöhe zwischen 150 und 200m fliegen.

Beispiel 2: Solarboot (Kazim H. 2008)
Ende 2006/Anfang 2007 überquerte mit der Schweizer "Sun21" erstmals ein ausschließlich mit Sonnenenergie betriebenes Boot den Atlantik. Dem Schweizer Verein "Transatlatic21" ging es darum zu zeigen, "welches Potential die Solarenergie für die Schifffahrt hat".
Weiter Anwendungen finden sich in Heidelberg oder Berlin, wo mittels Ausflugsschiffen mit Solarantrieb Touristen befördert werden. Bei Sonnenschein kann das Heidelberger Schiff beispielsweise 150 PS verwirklichen. Die meisten Modelle funktionieren auch bei bewölktem Himmel, einfaches Tageslicht genügt und ein Teil der so erzeugten Energie wird in Batterien gespeichert.
Boote mit Solarantrieb sind relativ langsam und meist zu leistungsschwach, um schwerere Lasten zu transportieren. In der Frachtschifffahrt wird lt. Expertenmeinung Solartechnologie so bald keine Rolle spielen.

Beispiel 3: Brennstoffzellen Boot (Kazim H. 2008)
Eine Alternative zum Öl-Aggregat (Antrieb oder Nebenaggregat) wäre die Brennstoffzelle. In der Schifffahrt hat das System im U-Boot-Bau seinen festen Platz, weil es leise ist und unabhängig von der Außenluft - ideale Voraussetzungen für den Unterwassereinsatz.
Ende August 2008 wurde das erste Fahrgastschiff mit Brennstoffzelle getauft. Die "Alsterwasser" befördert rund hundert Passagieren über die Alster durch die Hamburger Kanäle. Mit 50 Kilogramm Wasserstoffgas kann das 25 Meter lange Schiff drei Tage lang fahren. Die Kosten für diese Art der emissionsfreien Fahrt betrugen gut fünf Millionen Euro, etwa doppelt so viel wie für ein Schiff mit herkömmlichem Dieselmotor.

13.1.5 Kraftstoff und Energiespeicher Entwicklung

In diesem Unterkapitel wird allgemein auf mögliche Kraftstoffarten und Energiespeicher-möglichkeiten eingegangen. Im Fokus liegen jene Beispiele die für alternative Antriebe besonders in Frage kommen.
Energie kann im Fahrzeug mit verschiedenen Systemen gespeichert werden. Die bislang höchste Energiedichte wird mit einem herkömmlichen Treibstofftank (Benzin oder Diesel) aufgrund der hohen Energiedichte des Treibstoffs erreicht. Weitere mögliche Energiespeicher sind Batterien, Kondensatoren, Schwungräder oder pneumatische bzw. hydraulische Systeme und Wasserstoff. (Abbildung 62)

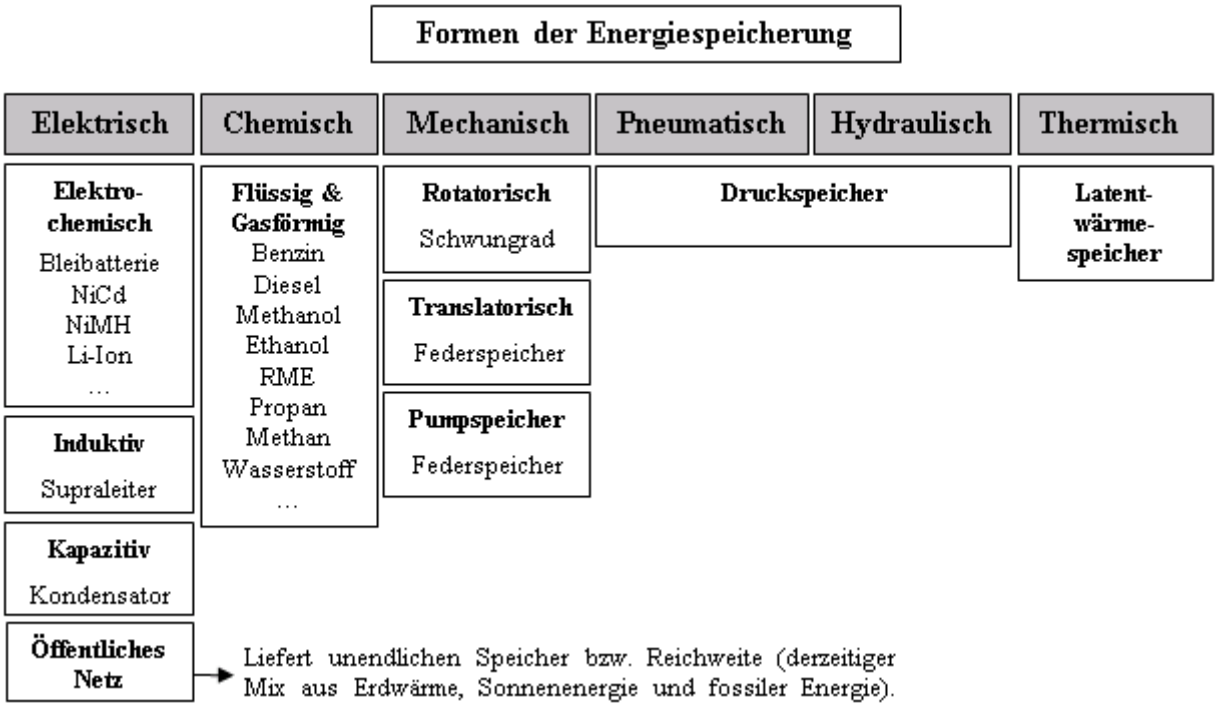


Abbildung 62: Übersicht über mögliche Energiespeicher

13.1.5.1 Flüssige- und Gasförmige Treibstoffe

Neben überwiegend auf fossilen Rohstoffen basierenden flüssigen Treibstoffen, wie Benzin, Diesel, Kerosin etc. gibt es sogenannte Alternativtreibstoffe wie z.B. Pflanzenöl, „Biodiesel“, Methanol oder Ethanol. Treibstoffe in flüssiger Form zählen zu den in der Vergangenheit am häufigsten genutzten Energiespeichern. Die hohe Speicherdichte bei hohem Heizwert bringt für die individuelle mobile Anwendung große Reichweitenvorteile. Abbildung 63 zeigt einige Brennstoffe bzgl. Heizwert und Gemischheizwert.[37]

[37] Unter Gemischheizwert wird der Heizwert des Luft-Kraftstoff Gemisches verstanden. Dieser hängt vom unteren Heizwert des Kraftstoffes und vom bei der Verbrennung vorherrschenden Luft-Kraftstoff-Verhältnis ab. Der Gemischheizwert des zündfähigen Luft-Kraftstoff-Gemisches und nicht der Heizwert des Kraftstoffs ist maßgebend für die Leistung des Motors.

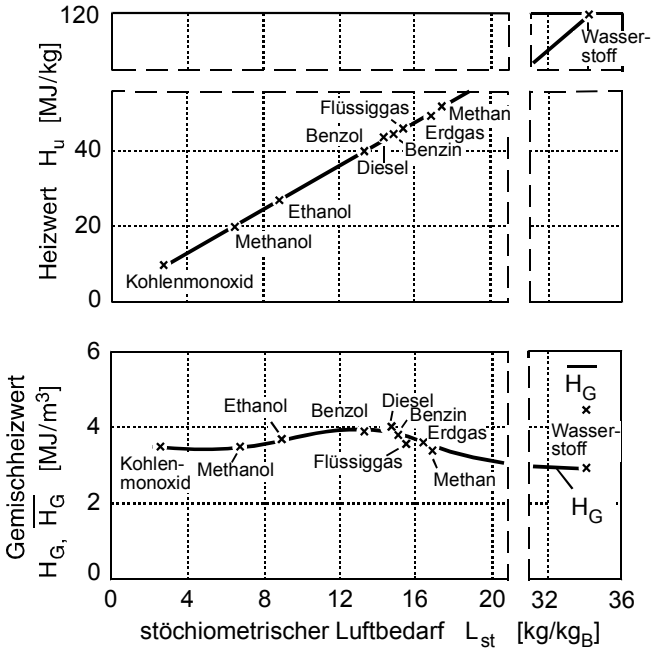


Abbildung 63: Heizwerte und Gemischheizwerte bei Lamda=1 für verschiedene Brennstoffe (Eichelseder, 2005)

Tankzeiten von flüssigen bzw. gasförmigen Kraftstoffen betragen je nach Tankvolumen ca. 2 bis 5 Minuten. Der Treibstofftank kann individuell der Fahrzeuggeometrie angepasst werden, was ebenfalls einen Vorteil darstellt. Als Nachteil gilt der hohe CO_2 Ausstoß bei der Verbrennung, neben anderen verbrennungsbedingten Emissionen, nicht nur wenn es sich um fossile Energie handelt. Alternativen die auf Biomasse aufbauen sind hinsichtlich Flächenverbrauch und bei Betrachtung der gesamten Ökobilanz nur limitiert als Ersatz für fossile Treibstoffe geeignet, z.B. (Jungmeier,2003). Bei Verwendung von Biotreibstoffen könnte aus fahrzeugtechnischer Sicht das bestehende System des Verbrennungsmotors und das vorherrschende Fahrzeugkonzept beibehalten werden.

Beispiel 1: Erdgas und Biogas

Für den Einsatz von Erdgas gibt es zwei Möglichkeiten: Erdgas wird in flüssiger Form bei ca. -161 °C als LNG (Liquified Natural Gas) oder unter Druck von ca. 250 bar als CNG (Compressed Natural Gas) im Fahrzeug eingesetzt. Hauptbestandteil von Erdgaskraftstoff ist Methan (CH4).

Durch Fermentation von Biomasse oder Abfallstoffen kann Biogas mit einem durchschnittlichen Methangehalt von ca. 60 Volumen-% erzeugt werden. Bei entsprechender Aufbereitung kann es in das bestehende Erdgasnetz eingespeist oder im Fahrzeug genutzt werden kann.

Beispiel 2: synthetische Erzeugung flüssiger Kraftstoffe

„Biomass to Liquid“ (BtL) sind synthetische Kraftstoffe, die aus Biomasse hergestellt werden. Die Verfahren zur BtL-Produktion sind noch in der Entwicklung und noch nicht konkurrenzfähig. Für die BtL-Herstellung kann prinzipiell jede verfügbare pflanzliche Biomasse verwendet werden (wie beispielsweise: Pflanzenabfälle, Laub, Restholz), womit eine direkte Flächenkonkurrenz vermieden werden kann. Das Potential der BtL-Kraftstoffe ist damit aber begrenzt.

Beim „Gas to Liquid“-Verfahren (GtL) wird Erdgas durch Zufuhr von Sauerstoff und Wasserdampf zu Synthesegas, welches weiter in einer Fischer-Tropsch-Synthese zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt

wird. Die flüssigen Kohlenwasserstoffe werden zum Hauptprodukt nach dem Crackprozess - dem Kraftstoff für Dieselmotoren. „Coal to Liquid“ (auch CtL), stellt auch ein chemisches Verfahren zur Herstellung von flüssigem Kraftstoff aus Kohle dar.
Mit den beiden letztgenannten Methoden könnte die fossile Versorgung von flüssigen Kraftstoffen, aufgrund größerer Vorkommen an Gas und Kohle als Öl, weiter aufrechterhalten werden. Im Hinblick auf die Klimaproblematik als nicht wünschenswerter Trend einzustufen, auch wenn er fahrzeugtechnisch möglich wäre (IPCC, 2013).

Beispiel 3: Wasserstoff

Der prinzipiell kohlenstofffreie Kraftstoff birgt große Chancen für Verbesserungen hinsichtlich Treibhausgasemissionen. Das CO_2-Einsparpotential wird jedoch durch den Herstellungsprozess begrenzt. Hauptquelle für Wasserstoff sind derzeit fossile Energieträger (ca. 50% Erdgas, 30% Erdöl, 10% Kohle). Es wird durch Dampfreformierung ein Synthesegas gewonnen und anschließend reiner Wasserstoff abgetrennt (Mock, 2010). Als Ausgangsprodukt zur Erzeugung des Synthesegases kann jedoch auch Biomasse genutzt werden. Eine weitere regenerative Erzeugungsmethode stellt die Elektrolyse von Wasser mittels Ökostrom dar.
Um den volumenbezogenen Energieinhalt von Wasserstoff zu erhöhen, wird er für einen Einsatz im Fahrzeug in gasförmiger komprimierter Form (Compressed Hydrogen – oft als „CH_2“ abgekürzt) oder in tiefkalt verflüssigter Form (Liquified Hydrogen – „LH_2“) angeboten (Braess, 2005). Flüssigtanks müssen bei längeren Stillstandszeiten in begrenzten Mengen Wasserstoff abblasen, da der Wärmeübergang in den Tank zu Verdampfungsvorgängen führt.
Die effizientere Produktion in zentralen Anlagen birgt Verluste bei der Distribution des Kraftstoffs. Alternativ dazu ist eine dezentrale Produktion vor Ort (on-site) denkbar.

13.1.5.2 Batterietechnologie

Energie kann elektrochemisch in folgenden Systemen gespeichert werden (Schwingshackl, 2009):

- Primärelemente (irreversibler Prozess, nicht wiederaufladbar)
- Akkumulatoren oder Sekundärelemente (reversibler Prozess, aufladbar)
- Hochtemperatur-Sekundärelemente (reversibel, aufladbar, Betriebstemperatur: ca.300 - 400°C)
- Brennstoffzellen (Brennstoffe werden von außen zugeführt)

Den wünschenswerten Eigenschaften von hoher Reichweite, großer Leistungsdichte, langer Lebensdauer etc. sind bei den Batterien vielerlei physikalische und chemische Grenzen gesetzt.
Um den hohen Ansprüchen zu entsprechen müsste eine Batterie eines Hybrid, PHEV oder BEV eine Reihe von Kriterien erfüllen

- hohe spezifische Energie (Wh/kg),
- hohe Energiedichte (Wh/m³),
- hohe spezifische Leistung (W/kg) sowie hohe Leistungsdichte (W/m^3),
- hohe Lebensdauer (hohe Anzahl an Lade- und Entladezyklen ohne wesentlichen Leistungsabfall),
- gute Ladefähigkeit (inkl. kurze Aufladezeit) und mögliche Tiefenentladungsfunktion (nahezu vollständig Entladung ohne Funktionsverlusten möglich),
- breites Temperaturspektrum für einen sicheren Betrieb,

- guter Lade- und Entladewirkungsgrad,
- wieder verwertbar und
- preiswert.

In der Praxis können je nach Anwendung niemals alle Eigenschaften positiv erfüllt sein. Der beste Kompromiss macht auch hier eine gute technische Lösung. Aus einer Übersicht (Abbildung 64), dem sg. *Ragone-like plot*, in dem spezifische Leistungen über den spezifischen Energien aufgetragen werden, können die für die Traktionsbatterien wichtigsten Batteriearten entnommen werden. Die Entwicklung geht von Blei-, Nickel-Cadmium, Nickel-Metallhydrid bis hin zur heute viel versprechenden Technologie der Lithium-Ionen Batterien. Superkondensatoren ergänzen dieses Bild, gehören aber nicht zu den chemischen Energiespeichern.

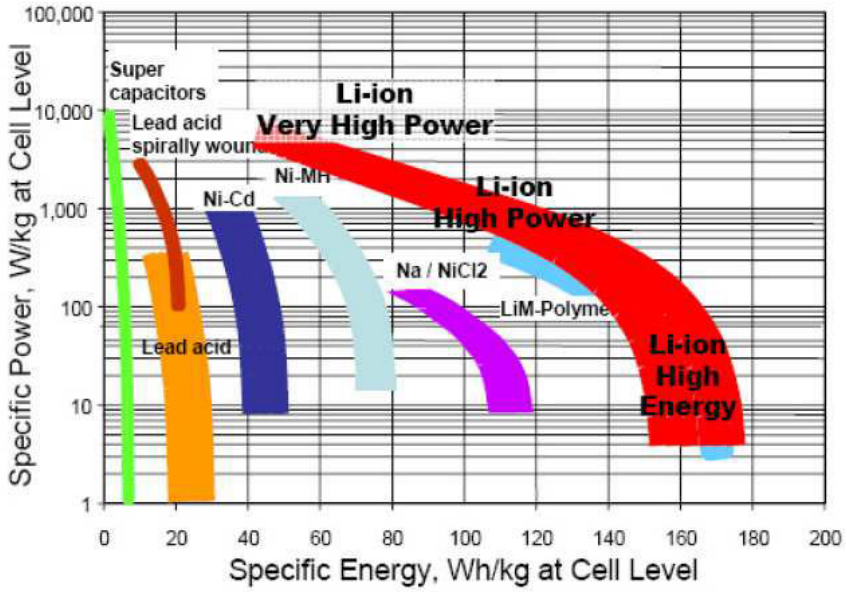


Abbildung 64: Ragone-like plot: Spezifische Leistungen und spezifische Energien von verschiedenen Energiespeichersystemen (Köhler, 2007)

Bei Lithium-Ionen Batterien sind die Eigenschaften für Systeme mit hoher spezifischer Leistung (Einsatz im Hybridfahrzeug) ebenso möglich wie Batteriesysteme mit hoher spezifischer Energie (Einsatz im reinen Elektrofahrzeug). Somit kann gefolgert werden, dass für jedes Fahrzeugkonzept auch die beste Li-Ionen Batterie gefunden werden kann und keinerlei Limitierungen für bestimmte Fahrzeugkonzepte entstehen könnten. Aus der spezifischen Energie [Wh/kg] dividiert durch die spezifische Leistung [W/kg] lassen sich typische Entladezeiten für verschiedene Speicher für eine Abschätzung derer Einsetzbarkeit bestimmen. (Abbildung 65)

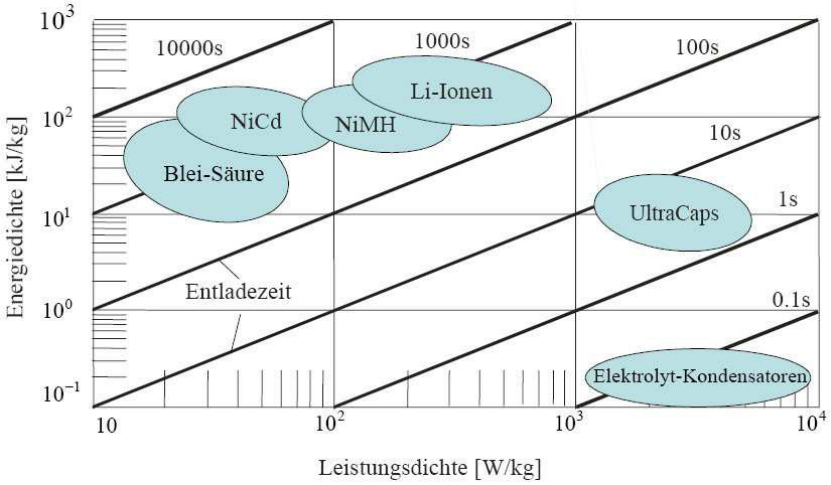


Abbildung 65: Ragone-Diagramm mit typischen Entladezeiten von elektrischen Energiespeichern (Böcker, 2007)

Diese Arbeit widmet sich nicht näher der detaillierten Analyse verschiedener Batteriesysteme. Die Lithium-Ionen Batterie ist aus heutiger Sicht eine besonders viel versprechende Technologie für die Zukunft. Bei vielen derzeitigen Li-Ionen Batterien wird neben Grafit, Lithium, Nickel, Mangan u.a. Cobalt eingesetzt. Cobalt ist ein seltenes Element und würde bei 100% BEV Anteil in der Fahrzeugflotte nicht in ausreichender Menge vorhanden sein (Koller, 2009). Li-Ionen Batterien ohne Cobalt sind lt. Koller aber bereits heute technisch machbar, mit ähnlichen Eigenschaften und gleichen Einsatzgebieten wie die Li-Ionen Systeme mit Cobalt.

Weitere Knappheiten sind nicht bekannt, ein funktionierendes Recyclingsystem wird aber in jedem Fall als notwendig erachtet.

Doppelschicht-Kondensatoren

Doppelschicht-Kondensatoren (DSK), auch Superkondensatoren genannt, bestehen zwar aus elektrochemischen Komponenten, für die Energiespeicherung werden jedoch keine chemischen Reaktionen, sondern die Polarisierung einer elektrolytischen Lösung für die elektrostatische Energiespeicherung genutzt. Mit diesem reversiblen Mechanismus kann ein Doppelschicht-Kondensator über eine Million Mal geladen und wieder entladen werden und bringt gegenüber Batterien einen großen Lebensdauervorteil.

Im Vergleich zeigt sich, dass Batterien eine höhere Energiedichte aufweisen, während DSK mit einer hohen Leistungsdichte punkten. Aus diesem Gesichtspunkt sind DSK ideal für Anwendungen geeignet, bei denen wiederholt für kurze Zeit – von Sekundenbruchteilen bis zu einigen Sekunden – Spitzenleistungen gespeichert und wieder gefordert werden sollen. Diese Art des Energiemanagements ist v.a. beim Rekuperieren von Hybrid oder Elektrofahrzeugen notwendig und bringt eine schnelle und effiziente Aufnahme der Bremsenergie mit ebenso verlustarmer Rückspeisung. Die geringen leistungsspezifischen Kosten sind ein weiterer Vorteil von Doppelschicht-Kondensatoren.

Ein dynamisches Auftreten von Leistungsspitzen beeinflusst die Lebensdauer einer Batterie in der Regel negativ. Eine Kombination von Batterien und Kondensatoren stellt dabei eine Möglichkeit dar, in der die Batterie die kontinuierlichen Energiebedarfe sicherstellt und der Kondensator die Leistungsspitzen abdeckt. Bei einer s.g. „aktiv parallelen Konfiguration“ werden die unterschiedlichen Spannungsniveaus der beiden Speicher mittels Leistungselektronik kombiniert. Ein Zweispannungsbordnetz ist zwar

komplexer und kostenaufwändiger als ein herkömmliches Bordnetz, dennoch hat dieses System gerade in Bezug auf Start-Stopp Strategien, Rekuperation und deren Verbrauchseinsparungen Vorteile, auch bei schwereren Fahrzeugen.

13.1.5.3 Elektrizität

Die Art des Strommix entscheidet über die Sinnhaftigkeit von jeglicher Form von Elektromobilität. Aus den drei globalen Energiequellen entstehen folgende für den Menschen nutzbaren erneuerbaren Energieströme:

- Strahlung aufgrund von Kernfusion in der Sonne,
- vorhandene Erdwärme (Geothermie),
- der Erdrotation und den damit verbundenen Effekten (Gezeiten).

Auf der Erde können diese Energiequellen in Form von Sonnenlicht und -wärme, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse und Erdwärme genutzt werden.

Österreichischer Strommix (inkl. Importe) hat lt. GEMIS 4.8 ca. 322 gCO_2/kWh wohingegen Ökostrom in Österreich bereits ca. 23 g CO_2/kWh erreicht. Der Trend hin zu 100 % Ökostrom kann zukünftig verwirklicht werden. Ein Vergleich von Potentialen und aktueller Nutzung der erneuerbaren elektrischen Stromerzeugung in Österreich, soll die Möglichkeiten bzgl. Energiebereitstellung zeigen (Abbildung 66). Der erwartete Stromverbrauch im Jahr 2020 kann vollständig gedeckt werden, durch das Ausnützen vom Gesamtpotential erneuerbarer Energien. Auch in (Beermann, 2010) wird das mögliche Potential ebenfalls aufgezeigt (Abbildung 67).

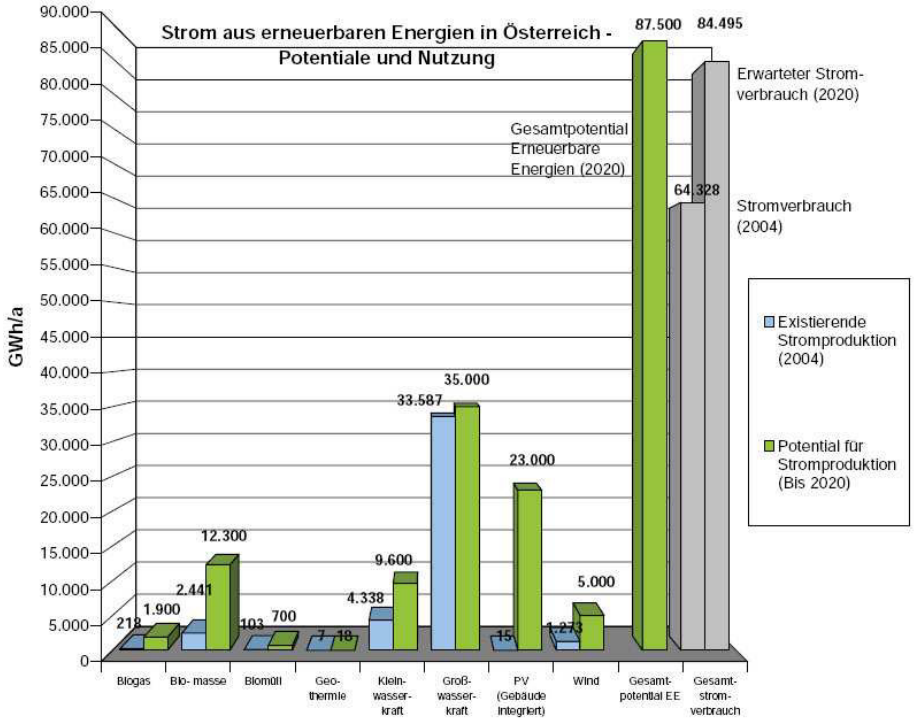


Abbildung 66: Strom aus erneuerbaren Energien in Österreich – Potentiale und Nutzung (Fechner, 2007)

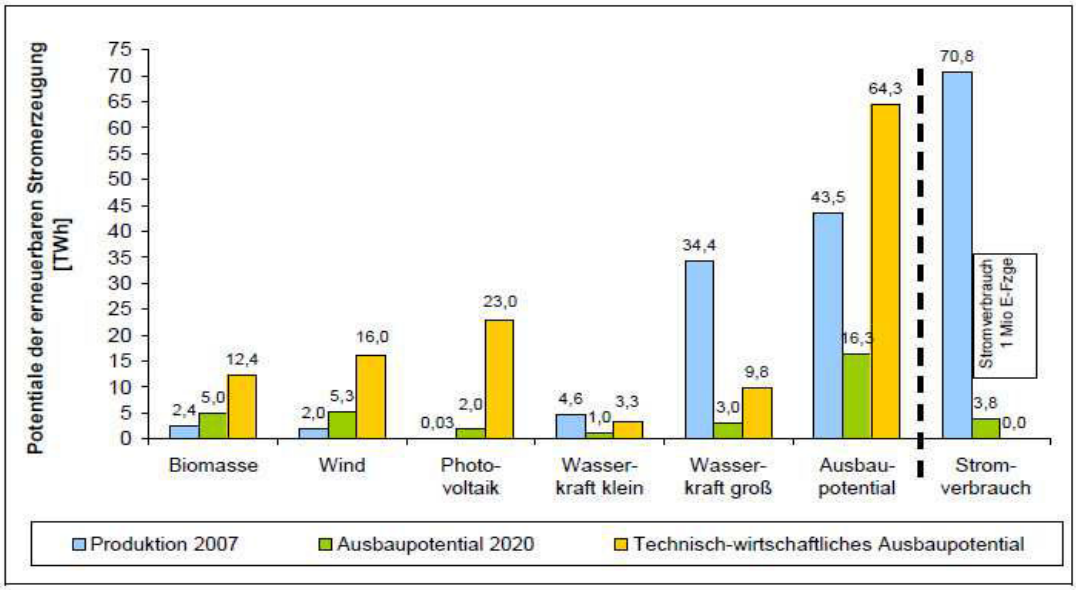


Abbildung 67: Strom aus erneuerbaren Quellen (Beermann M., G. Jungmeier et al 2010)

13.1.6 Kosten der Antriebskonzepte

(Produktions-)Kosten stellen ein sehr diffuses Thema für die wissenschaftliche Analyse dar. Einerseits handelt es sich bei diesen oft um vertrauliche Informationen, andererseits sind diese vielfach bei Fahrzeugen durch (Markt-)Taktik beeinflusst. In diesem Kapitel wird dies anhand eines Elektrofahrzeugs und seinem weltweit sehr variablen Preis dargestellt, sowie ein kurzer Überblick über entscheidende Aspekte der Kosten von Antriebskonzepten gegeben.

<u>Otto und Dieselfahrzeuge:</u>

In (Mock, 2010) wird eine genaue Analyse hinsichtlich möglicher Energieverbrauchs-Verbesserungspotentiale und den damit verbundenen Kosten dargestellt. Abbildung 68 zeigt eine Übersicht über die Möglichkeiten bis hin zur Hybridisierung. Letztere kann eine große Variabilität aufweisen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass ähnliche Energieeinsparungen wie durch eine Hybridisierung auch mittels Verbesserungen konventioneller Fahrzeuge geleistet werden können (Schwingshackl, 2009) und dass die Kostenentwicklung von vielen Einzelfaktoren abhängt. Eine darauf beruhende wissenschaftliche Trendprognose ist nur schwer möglich, da wie eingangs schon erwähnt auch wirtschaftstaktische Mechanismen relevant sind.

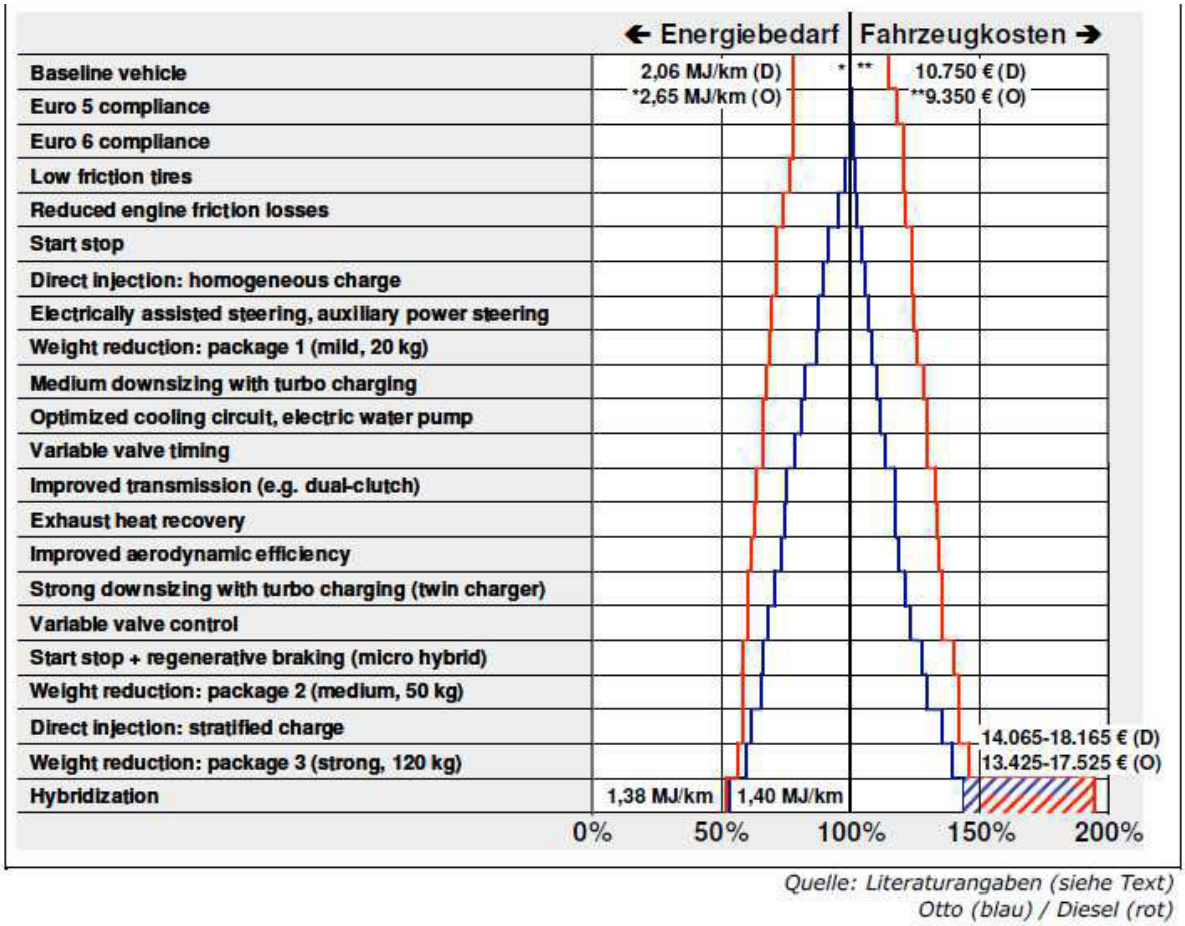


Abbildung 68: Überblick Einzelmaßnahmen mit Kosten für mittlere Otto- und Dieselfahrzeuge (Mock, 2010)

Die Preise am Markt entstehen generell aus einem Geflecht aus:

- Von Produktion getriebene Kosten
- Konsumenten Akzeptanz (der Technologie)
- Kaufbereitschaft
- Produktionskapazitäten
- Produkt-Wertschöpfung
- Rohstoff- und Energiepreise (für den Betrieb)

Personenkraftwagen:

Die Analyse in (Schwingshackl, 2013) ergab hinsichtlich der (Brutto-)Marktpreise folgende Durchschnittswerte für den Kauf eines Neuwagens. Mit dem Grad der Elektrifizierung des Antriebstrangs steigen die Kosten, hauptsächlich getrieben durch die derzeit hohen Batteriekosten. Weit abgeschlagen hinsichtlich der Kosten ist das Brennstoffzellenfahrzeug hauptsächlich aufgrund der hohen Materialkosten.

Tabelle 1: Durchschnittliche Brutto Marktpreise für Mittelklasse Pkw im Jahr 2010 in Ö.

	Marktpreis (2010) €
HEV-Fahrzeug	22 300
PHEV, REEV	32 600
EV	40 500
FCEV	128 060

Beispielsweise zeigt der i-MiEV Verkaufspreis (sales prices) am Markt je nach Land in dem das Fahrzeug verkauft wurde große Abweichungen. Insgesamt betrug die Abweichung im Jahr 2011 insgesamt über 28.000 US$, was fast einer Verdopplung des Preises zwischen einem I-MiEV Kauf in Canada oder Costa Rica entspricht. (Tabelle 2) Dass dies kein Einzelfall ist belegt ein zweites Beispiel. Der Nissan Leaf hatte für den Markteintritt im Jahr 2011 eine weltweite Preisdifferenz von 21.700 US$ und im Jahr 2012 von 8.660 US$.

Tabelle 2: Mitsubishi i-MiEV Verkaufspreis am Markt [Mitsubishi i-MiEV 2012]

Mitsubishi i-MiEV sales price by market (without any government tax credits or grants)			
Country	**Sales price**	**Equivalent US$(1)**	**Launched/ scheduled**
Japan[21]	¥4.0 million	US$51,570	Apr 2010
Hong Kong[140]	HK$395,000	US$50,840	May 2010
Australia(2)	A$62,240 (2011)[69]	US$63,175	Jul 2010
	A$48,800 (2012)[72]	US$49,530	Aug 2011
Germany[95]	€34,990	US$45,280	Dec 2010
Spain[108]	€29,153	US$37,730	Dec 2010
United Kingdom[117]	GB£28,990	US$44,750	Jan 2011
Costa Rica[141]	¢30.5 million	US$60,795	Feb 2011
Chile[142]	CLP27.7 million	US$53,270	May 2011
Russia[143]	руб.1,799,000	US$55,990	June 2011
New Zealand[144]	NZ$59,990	US$46,345	Jul 2011
United States[4]	US$29,125		Dec 2011
Canada[79]	CAD 32,998	US$32,340	Dec 2011

Notes (1): Exchange rates as of December 31, 2011.
(2) The 2011 i-MiEV is available for leasing only, at a price of A$1,740/month during 36 months totaling A$62,240. Retail sales only for the 2012 i-MiEV

2-Räder:

Bei 2-Rädern ist die Variabilität bei der Wahl des Fahrzeugtyps eindeutig größer als die Wahl der unterschiedlichen Technologie bei Elektrifizierung. Die Verfügbarkeit der Angebote für gleiche Anwendung (z.B. lange Motorradausflüge) ist aufgrund der begrenzten

Batteriespeicherkapazität noch nicht gegeben. Elektromotorräder sind aus diesem Grund meist auch geringer motorisiert und kleiner als konventionelle Motorräder.
In Tabelle 3 werden die im Modell VeTCoM („Vehicle technology and cost model“) (Schwingshackl, 2013) verwendeten Kaufpreise von Mittelklasse 2-Rädern (kleine Motorräder und Moped) dargestellt. Der in Tabelle 3 angeführte Preisunterschied tritt in der Form auf wenn eine Reichweite von 60 km bereitgestellt werden soll.

Tabelle 3: Durchschnittliche Brutto Marktpreise für mittelklasse 2-Räder in 2010 in Ö.

	Marktpreis (2010) €
reines VKM-Fahrzeug	2840
reines VKM-Fahrzeug	4420

13.1.6.1 Kosten von Komponenten alternativer Antriebe

In (Schwingshackl, 2013) wird eine ausführliche Analyse der Kostenkomponenten für Pkw dargestellt. Während bei heutigen sich bereits in Serienfertigung befindlichen Komponenten zukünftig abgesehen von Materialpreisentwicklungen wenig an den Kosten ändern wird, tragen Komponenten von alternativen Fahrzeugen ein hohes Potential für Reduktionen.

Als wichtigste Komponente hinsichtlich zu erwartender technologischer Lerneffekte soll an dieser Stelle die Traktionsbatterie angeführt werden. Die Lithium-Ionen Batterie wird diesbezüglich als die mit Abstand zukunftsträchtigste Lösung angesehen. Eine breite Literaturanalyse zeigt folgendes Bild der zu erwartenden Kostenentwicklung (Abbildung 69).

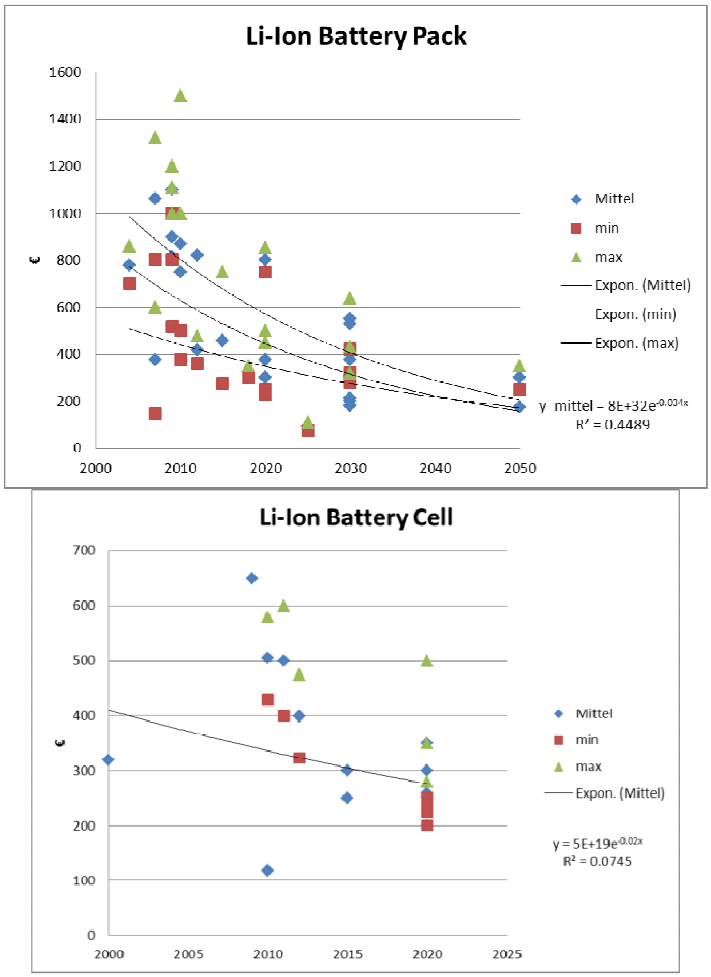


Abbildung 69: Li-Ion Batterie Kosten auf Zellniveau (rechts) und Batterie Pack Level (links)

Folgende Unsicherheiten treten in dieser Literaturanalyse auf:

- Unpräzise Kostenbezeichnungen (z.B.: Batteriekosten, Zellkosten, Kosten pro kWh, Gesamtkosten pro Batterie) in den einzelnen Quellen
- Fehlende Informationen über Subventionen
- Fehlende Informationen zu Annahmen bzgl. “ecology of scale”

Für die zwei unterschiedlichen Batterietypen (Leistung bzw. Energie optimiert) ist im Bezugsjahr 2010 von folgenden Kosten pro KWh auszugehen:

- Li-Ion Batterie Typ „Energie“: 640 €/KWh
- Li-Ion Batterie Typ „Leistung“: 1060 €/KWh

Abbildung 70 zeigt die Produktionskostenentwicklung in VeTCoM für die Li-Ion Batterie Typ „Energie“ durch technologische Lerneffekte. Im Jahr 2050 erreichen die Kosten in etwa ein Niveau von 200 €/kWh.

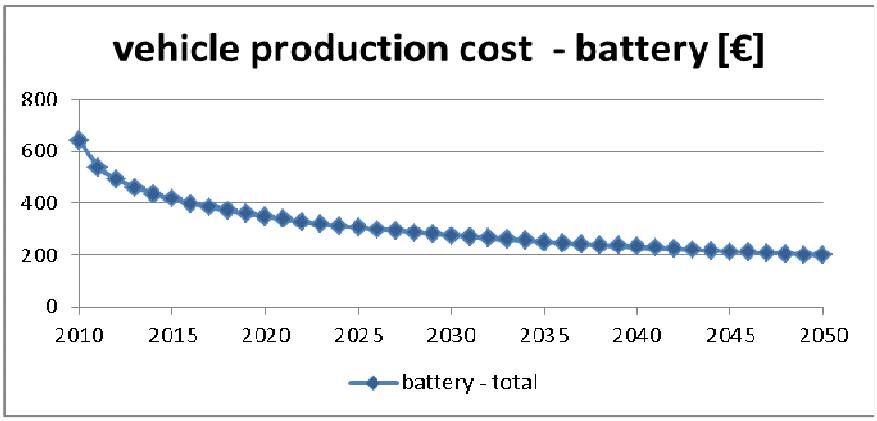


Abbildung 70: Entwicklung der Batterie Produktionskosten einer Li-Ion Batterie-Energie

Der Batterie Preis ist im Jahr 2012 lt. Automobil-Industrie naher Literatur (Automotive Agenda 2012 S.46) bei einer Li-Ionen Typ „Energie“ auf ca. 500 €/kWh gesunken. In VeTCoM wurden die Kosten für 2012 hinsichtlich der Effekte des Technologischen Lerneffekte auf 486 € modelliert.

Wenn Lithium-Silicon, Lithium-Luft, Lithium-Schwefel oder andere Batterie Technologien entwickelt werden, könnte der Preis höher als die der Lithium Ionen Batterie sein. Bessere Eigenschaften der neuen Batterien würden dann den Einsatz fördern und das Ablösen der Li-Ionen Batterie beschleunigen. Die Trend-Einschätzung kann im Vorentwicklungsstadium nicht ernsthaft durchgeführt werden, somit kann eine weitere Kostenreduktion ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

13.1.7 Prognosen für die Flottenentwicklung in den mit NEMO gerechneten Szenarien

Für die mit dem Modell NEMO durchzuführenden Emissionsberechnungen waren Prognosen für die Entwicklung der Fahrzeugflotte bezüglich alternativer Antriebe zu erarbeiten. Darzustellen waren eine Basis-Entwicklung „Business As Usual (BAU)“ sowie ein Szenario „Forcierung der Elektromobilität“.

In AP4-2 war vorgesehen ein Berechnungstool zu erstellen das aus den in den Szenarien vorgegebenen Rahmenbedingungen wie z.B. Entwicklung der Energiepreise, BIP sowie Technologiekosten die Entwicklung der Fahrzeugflotte (Bestandsentwicklung bzw. Entwicklung der Neuzulassungsanteile nach eingesetzten Technologien, Fahrzeugmassen etc.) prognostiziert. Parallel zur Projektlaufzeit von STREET2030 hatte ein ebenfalls vom Klima- und Energiefond finanziertes Projekt „STEP“ (Steininger, 2013) ebenfalls diese Aufgabenstellung als zentrales Projektziel. Dazu wurde in STEP eine Koppelung eines Modells für Entwicklung der Technologiekosten (als Funktion von Rahmenbedingungen wie Energiepreise, Stückzahlen etc.) mit einem ökonomischen Nachfragemodell durchgeführt, um zu ermitteln, wie sich alternative Antriebstechnologien in Österreich durchsetzen werden und wie dies durch Politikinstrumente beeinflusst werden kann. Diese Aufgabenstellung wurde im Rahmen von STEP zwar gelöst, erheblicher weiterer Forschungsbedarf wurde jedoch identifiziert. Beispielsweise wären aus der ökonomischen Modellierung, die zu relativ starken Sprüngen bei Neuzulassungen führen, die reale Produktionsbedingungen, reales Konsumverhalten und andere Rahmenbedingungen abseits der ökonomischen Bedingungen einzuarbeiten. Die entsprechende Berechnungslogik wurde diesbezüglich noch nicht gefunden. Diese Arbeiten würden den Projektrahmen von STREET2030 übersteigen, daher wurde dieses Thema daraufhin im Rahmen der für AP4-2 zur Verfügung stehenden Ressourcen in STREET2030 nicht weiter verfolgt und auf bereits vorhandene Prognosen aus der Literatur verwendet unter Berücksichtigung der Ergebnisse von STEP mittels „expert judgement“ abgeschätzt.

Business as Usual Szenario

In den Berechnungen zum Straßenverkehr im Basisfall wurde mit den Daten bzw. Prognosen zur österreichischen Flottenzusammensetzung aus der österreichischen Luftschadstoffinventur (Schwingshackl, 2012) bzw. aus dem Input zur Grundlagenstudie für den Monitoring Mechanism 2013 (Schwingshackl, 2013) gerechnet. Zusätzlich wurden die Besonderheiten der Wiener Linienbusflotte (Wiener Linien verwenden zurzeit LPG-Busse) berücksichtigt.

Insbesondere in dieser Arbeit von Relevanz sind die Annahmen zur Entwicklung der Elektromobilität. In der Entwicklung für den Planfall wurden in der vorliegenden Arbeit die Annahmen aus dem „WEM“-Szenario („With Existing Measures“) der Grundlagenstudie für den Monitoring Mechanism 2013 übernommen. In diesem Szenario wird angenommen, dass allgemeine Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität (z.B. finanzielle Unterstützung bei Forschungsförderungsprojekten, Förderung von Elektromobilitäts-Modellregionen, Entwicklung eines Masterplans Elektromobilität etc.) existent sind.

Weiters wird von deutlichen Senkungen der Batteriekosten bzw. Nutzungsbeschränkungen für konventionelle Kfz z.B. in ausgewählten innerstädtischen Bereichen ausgegangen, auch in Wien. Im Basisszenario liegt der Fahrzeugbestand an PKW die mit Netzstrom fahren (PHEV und EV Konzepte) im Jahr 2020 bei rund 60.000 Fahrzeugen. Dies entspricht 1 % der österreichischen Gesamtflotte bzw. einem Anteil von 8% an den Pkw-Neuzulassungen. Nachdem mit NEMO im Gegensatz zum in der Grundlagenstudie für den Monitoring Mechanism 2013 eingesetzten Modell GLOBEMI alternative Antriebskonzepte für alle Fahrzeugkategorien abbildbar sind, waren in den Berechnungen zusätzliche Annahmen zur Zukunftsentwicklung für mit Netzstrom fahrende Elektrofahrzeuge zu unterstellen. Folgende Entwicklungen wurden angenommen:

Leichte Nutzfahrzeuge:

Die Anteile an PHEV und EV an den Neuzulassungen betragen 20% der Werte bei PKW.

Schwere Nutzfahrzeuge:

Es werden keine PHEV und EV Fahrzeuge eingesetzt. Zur Anwendung kommen HEV-Antriebe in verschiedenen Anwendungen.

Zweiräder:

Bei Mopeds nehmen die Neuzulassungsanteile der Elektrofahrzeuge ausgehend vom aktuellen Wert von gut 5% linear zu bis zu 40% ab Mitte des nächsten Jahrzehnts. Bei Motorrädern erreicht der Elektroantrieb einen Anteil von max. 10%.

Die in den NEMO-Rechnungen für den „BAU“-Fall verwendeten Neuzulassungsanteile sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Neuzulassungsanteile alternativer Antriebe Szenario „Business As Usual“

	PKW	PKW	PKW	LNF	LNF	LNF
Jahr	Neuzulassungen reine EV	Neuzulassungen PHEV	HEV	Neuzulassungen reine EV	PHEV	HEV
	[Anteil an Gesamt]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Gesamt]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Fzg mit VKM]
2010	0.0%	0.0%	KEINE*	0.0%	0.0%	KEINE*
2011	0.2%	0.0%		0.0%	0.0%	
2012	0.1%	0.1%		0.0%	0.0%	
2013	0.0%	0.1%		0.0%	0.0%	
2014	0.0%	0.2%		0.0%	0.0%	
2015	0.1%	0.3%		0.0%	0.1%	
2020	2.0%	5.5%		0.4%	1.1%	
2025	8.1%	16.7%		1.6%	3.3%	
2030	17.3%	27.6%		3.5%	5.5%	

	Solo LKW	Solo LKW	Solo LKW	Stadtbus	Stadtbus	Stadtbus	Moped	Motorrad
Jahr	Neuzulassungen reine EV	PHEV	HEV	Neuzulassungen reine EV	PHEV	HEV	EV	EV
	[Anteil an Gesamt]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Gesamt]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Gesamt]	[Anteil an Gesamt]
2010	KEINE	KEINE	0.0%	KEINE	KEINE	0.0%	4.0%	1.0%
2011			0.0%			0.0%	5.0%	2.0%
2012			0.0%			1.0%	7.0%	3.0%
2013			0.0%			2.0%	9.0%	4.0%
2014			0.0%			3.0%	11.0%	5.0%
2015			0.0%			4.0%	14.0%	6.0%
2020			1.0%			5.0%	29.0%	10.0%
2025			1.0%			5.0%	40.0%	10.0%
2030			1.0%			5.0%	40.0%	10.0%

* HEV sind in VKM Segment mitberücksichtigt und hier nicht gesondert dargestellt

13.1.7.1 Szenario Forcierung der Elektromobilität

Im Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ wurde angenommen, dass die Nachfrageseite nach Elektrofahrzeugen besonders stark ausgeprägt ist. Dieses Szenario orientiert sich an dem politischen Zielwert für rein elektrische PKW und Plug-in Hybrid-PKW im Jahr 2020 in der Höhe von 250.000 Kfz gemäß Energiestrategie Österreich [BMWFJ & BMLFUW (2010)]. Das Modell wurde dabei gemäß dem „WAM“-Szenario (With Additional Measures) aus der MonMech-Studie bedatet.

In den Berechnungen ergibt sich für das Jahr 2020 bei PKW ein Bestand an PHEVs von ca. 155.000 Fahrzeugen sowie von rund 52.000 reinen Elektro-PKWs. Dies entspricht in Summe ca. 4% der österreichischen Gesamtflotte. Bis zum Jahr 2030 steigt der Bestand auf rund eine Million PHEVs sowie zusätzlich knapp 600.000 reine Elektrofahrzeuge an, was in Summe einem Anteil an der österreichischen PKW Gesamtflotte von ca. 27% entspricht.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die hier im Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ unterstellten Anteile an Elektrofahrzeugen nur dann realistisch sind, wenn die Preise für Batterien deutlich sinken und deutliche ökonomische, rechtliche und bewusstseinsbildende Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität umgesetzt werden. Die Bestandszahlen für E-PKW erfordern entsprechend noch drastischere Änderungen in Preis- und/oder Nutzungsstrukturen und sollten nicht als einfach realisierbar interpretiert werden. Die Ergebnisse können aber gut als Maximalszenario für die Einführung elektrische Antriebe im Straßenverkehr interpretiert werden. Zusätzlich zu den für PKW übernommenen Randbedingungen aus dem WAM Szenario der Monmech-Studie wurden in NEMO für das Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ noch folgende Randbedingungen vorgegeben:

<u>Leichte Nutzfahrzeuge:</u>

Die Anteile an PHEV und EV an den Neuzulassungen betragen 40% (statt 20% im Basisszenario) der Werte bei PKW.

<u>Schwere Nutzfahrzeuge:</u>

Es werden verstärkt HEVs eingesetzt. Relevante Anteile an mit Netzstrom fahrende SNF in der Flotte kommen auch im Szenario „Forcierung der Elektromobilität“ nicht vor.

<u>Zweiräder:</u>

Bei Mopeds erreichen die Neuzulassungsanteile der Elektrofahrzeuge 40% im Jahr 2020 und steigen auf 80% im Jahr 2030. ab Mitte des nächsten Jahrzehnts. Bei Motorrädern erreicht der Elektroantrieb einen Anteil von 20%.

Die in den NEMO-Rechnungen für das Szenario „Forcierung der Elektromobilität verwendeten Neuzulassungsanteile sind Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Neuzulassungsanteile alternativer Antriebe Szenario „Forcierung der Elektromobilität“

	PKW	PKW	PKW	LNF	LNF	LNF
Jahr	Neuzulassungen reine EV	Neuzulassungen PHEV	HEV	Neuzulassungen reine EV	PHEV	HEV
	[Anteil an Gesamt]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Gesamt]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Fzg mit VKM]
2010	0.0%	0.0%	KEINE*	0.0%	0.0%	KEINE*
2011	0.2%	0.0%		0.1%	0.0%	
2012	0.3%	0.2%		0.1%	0.1%	
2013	0.3%	0.4%		0.1%	0.2%	
2014	0.4%	0.7%		0.1%	0.3%	
2015	0.4%	3.6%		0.2%	1.4%	
2020	3.9%	12.4%		1.6%	5.0%	
2025	15.7%	34.0%		6.3%	13.6%	
2030	29.5%	53.3%		11.8%	21.3%	

	Solo LKW	Solo LKW	Solo LKW	Stadtbus	Stadtbus	Stadtbus	Moped	Motorrad
Jahr	Neuzulassungen reine EV	PHEV	HEV	Neuzulassungen reine EV	PHEV	HEV	EV	EV
	[Anteil an Gesamt]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Gesamt]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Fzg mit VKM]	[Anteil an Gesamt]	[Anteil an Gesamt]
2010	KEINE	KEINE	0.0%	KEINE	KEINE	0.0%	4.0%	1.0%
2011			0.0%			0.0%	5.0%	2.0%
2012			0.0%			2.5%	7.0%	3.0%
2013			0.0%			5.0%	9.0%	4.0%
2014			0.0%			7.5%	11.0%	6.0%
2015			1.0%			10.0%	16.0%	8.0%
2020			5.0%			22.5%	41.0%	18.0%
2025			5.0%			30.0%	66.0%	20.0%
2030			5.0%			30.0%	80.0%	20.0%

* HEV sind in VKM Segment mitberücksichtigt und hier nicht gesondert dargestellt

13.1.8 Literaturverzeichnis für den Anhang „Technologische Entwicklung“ (AP3)

Back M. 2005: Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen, Dissertation, Universität Karlsruhe, Universitätsverlag Karlsruhe, ISBN 3-86644-031-6, S5 ff, 2005.

Braess, H.-H. and U. Seiffert (2005). Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH

Brünglinghaus C. 2013: Redaktion Springer für Professionals: Wie man Nutzfahrzeuge effizienter macht http://www.springerprofessional.de/wie-man-nutzfahrzeuge-effizienter-macht/4732836.html?linktyp=teaser5&newsletterID=136&sendID=12454&cm_mmc=ecircleNL-_-LM_GE-B2B+NL+SpringerProfessional+Automobiltechnik_NL_11.10.2013-_-S_Infiniti+Q50+|+Zukunft+bei+Ford+|+Natrium+als+Lithium-Alternative+|+Hoffnungstr%C3%A4ger+Brennstoffzelle-_-L_25 , letzter Zugriff 03.2013

Cappadonia, M., U. Stimming, et al. (2003). Fuel Cells. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry - Volume 15. Weinheim, Wiley-VCH

Czycholl H.: Bremse als Kraftwerk, Der erste Hybrid-Zug – So grün kann Bahn sein, http://www.welt.de/wissenschaft/article112281574/Der-erste-Hybrid-Zug-So-gruen-kann-Bahn-sein.html , 30.12.12

Eichlseder H. 2005: Verbrennungskraftmaschinen - Vertiefte Ausbildung, Vorlesungsskript, TU-Graz, Februar 2005

Eichlseder H., Blassnegger J. 2008: Der zukünftige Ottomotor – überlegener Wettbewerber zum Dieselmotor?, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz

EU 2009: Verordnung zu CO_2-Emissionen von Neuwagen (VO (EG) 443/2009)

Göschel B. 2004: Einsatzmöglichkeiten für Hybridantriebe in BMW Fahrzeugen, 25. Internationales Wiener Motorensymposium Wien, 30. April 2004.

Heinzel, A., F. Mahlendorf, et al. (2006). Brennstoffzellen - Entwicklung, Technologie, Anwendung. Heidelberg, C.F. Müller.

IFEU 2009: Homepage vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Elektromobilität, http://www.ifeu.org, letzter Zugriff 10.03.2009.

IPCC 2013: www.**ipcc**.ch *, Letzter Zugriff 04.2013*

Kazim H. 2008: Spiegel Online, http://www.spiegel.de/wirtschaft/antrieb-ohne-oel-reeder-planen-das-hochsee-schiff-der-zukunft-a-569312-3.html, 08.2008

Klell M. 2010: Vortrag: Hydrogen – Potentials and Perspective, A3PS, Vienna, 18. November 2010

Klink G., Krubasik S., Gräf A.: A. T. Kearney Studie: Nutzfahrzeuge werden grün, 2010

Koch K. C.: Alternative Antriebe Bahn mit Batterie http://www.sueddeutsche.de/auto/alternative-antriebe-bahn-mit-batterie-1.53796 , 17. Mai 2010

Koller S. 2009: Mitarbeiter des Institutes für Chemische Technologien von Materialien der TU-Graz, persönliches Gespräch am 16.2.2009

Küçükay F. 2008: Präsentationsunterlagen der Vorlesung: Alternativ- und Hybridantriebe am Institut für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, 2008.

Kurzweil, P. (2003). Brennstoffzellentechnik. Wiesbaden, Vieweg

Lastauto Omnibus 2012: Lastauto Omnibus Zeitschrift – Test Technik Trends, 8/12

Leopold J. 2008: Vortragsunterlagen: Elektrisch unter 40 Gramm?, Veranstaltungsreihe “Mobil im Dialog”, Berlin, 22.April.2008.

M. BEERMANN, G. JUNGMEIER, A. WENZEL, J. SPITZER, L. CANELLA, A. ENGEL, M. SCHMUCK, S. KOLLER: QUO VADIS ELEKTROAUTO?, Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich, April 2010

Mathoy A. 2010: MTZ 09/2010, Elektroantrieb, S557

Mitsubishi i-MiEV 2012: http://en.wikipedia.org/wiki/Mitsubishi_i-MiEV, last access 03.7.2013

MITSUBISHI MOTORS 2012: Homepage of MITSUBISHI MOTORS Deutschland GmbH, http://www.imiev.de/, last access 30.5.2012

Mock P. 2010: Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO2-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart

Mohrdieck C. 2007: Are Plug-In-Hybrids the future, in 19th International AVL Conference "Engine & Environment", September 6th - 7th, Graz, Austria, 2007

Nissan Leaf 2011: http://en.wikipedia.org/wiki/Nissan_Leaf, last access 03.7.2013

Pekny W., Petri F., Kaller N., Aldrian M.: Presseaussendung Plattform Footprint, WWF, Greenpeace, GLOBAL 2000; Overshoot-Day ist heuer am 20. August, Das Jahresbudget der Erde ist für dieses Jahr aufgebraucht, www.footprint.at, http://www.footprintnetwork.org, Wien, 20.08.2013

Schrögel P.: Fachdialog zur Erarbeitung einer Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie für Deutschland, Workshop „Antriebe: Schifffahrt" in Bonn/Bad Godesberg am 12. Juni 2012

Schwingshackl M. 2009: Diplomarbeit an der TU-Graz „Simulation von elektrischen Fahrzeugkonzepten für PKW", Download unter www.fairmove.at, Graz 12.05.2009.

Schwingshackl M., Hausberger S., Rexeis M., Dippold M.: Impacts of policy scenarios on vehicle stock and emissions: Linking CGE model and Network Emission Modell (NEMO), 25.08.2013

Schwingshackl M., Hausberger S.: Monitoring Mechanism 2013 – Verkehr; Erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds; Bericht Nr. Inst-01/13/ SchwiEm 03/12-679 vom 31.01.2013; Graz University of Technology

Schwingshackl M., Hausberger S.: Straßenverkehrsemissionen und Emissionen sonstiger mobiler Quellen Österreichs für die Jahre 1990 bis 2011; Erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes GmbH; Graz; Bericht Nr. FVT-78/12/ Haus Em 09/12-6790 vom 14.12.2012

Schwingshackl M.: Vehicle Technology and Cost Model – VeTCoM, technical report, 25.8.2013

Skysails 2013: http://www.skysails.info/deutsch/infothek/hintergrund-informationen/frachtschifffahrt-umwelt/ , letzter Zugriff 04.2013

Steininger K. Kulmer V., Seebauer S., Schwingshackl M., Hausberger S.: Supporting technological and market success for low-carbon vehicle propulsion, Endbericht, Austrian Climate Research Programme, 3rd call, Graz, 02.09.2013

VDI Bericht 1998: VDI - Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge, Rahmenbedingungen und Zukunft des E-Mobils aus der Sicht eines Herstellers von Quissek F., Lück P., Köhle S., Wolfsburg, S1f, 1998.

VDI Bericht_a 2008: VDI - Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Innovative Fahrzeugantriebe, ISBN 987-3-18-092030-6, Thermoelektrische Modellierung eines Lithium-Ionen-Energiespeichers für den Fahrzeugeinsatz von Morawietz L. [et al.], Dresden, November 2008.

Wallentowitz H. et al. 1999: Strukturvarianten von Hybridantrieben, In VDI-Bericht 1459: Hybridantriebe, 1999

IMPRESSUM

Verfasser
Umweltbundesamt GmbH

Nikolaus Ibesich
Spittelauer Lände 5
1090 Wien/Österreich
Tel: +43-(0)1-31304
Fax: +43-(0)1-31304/5400
E-Mail: office@umweltbundesamt.at

AutorInnen
Martin Dippold; TU Graz
Nikolaus Ibesich, Umweltbundesamt
Günther Lichtblau, Umweltbundesamt
Christian Obermayer, komobile W7
Werner Pölz, Umweltbundesamt
Martin Rexeis, TU Graz

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber
Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer
Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes
ZS communication + art GmbH